

激光与光电子学进展

基于 MODIS 参数的卷云光学厚度计算方法

叶松^{1,2}, 付思梦^{1,2}, 李树^{1,2*}, 王新强^{1,2}, 王方原^{1,2}, 屈文学^{1,2}

¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

²广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 卷云光学厚度是对全球气候、地球辐射收支影响较大的云光学参数之一。在军事、大气科学等领域对卷云光学参数的求解算法有广泛的应用需求。应用中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据求解卷云参数的算法,多采用卫星多通道数据,数据处理过程较为复杂。为解决这一问题,利用RT3模型结合MODIS云参数,模拟计算卷云反射率,建立卷云光学厚度查找表,设计简单算法,实现了卷云光学厚度的有效反演。对比卷云光学厚度反演结果和MODIS实际测得的数据,可得两者相关性达到0.97,验证了此算法下卷云光学厚度反演的可靠性。选取MODIS不同时间段的数据,分析了卷云光学厚度在不同时间、空间范围的变化情况,平均误差小于0.16,进一步验证了基于RT3模型的查找表反演卷云光学厚度的有效性。研究结果有助于实现全球范围内卷云光学特性的简单有效反演。

关键词 大气光学; 卷云; 光学厚度; 倍加累加法; 反演

中图分类号 TP79

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1901003

Optical Thickness Calculation Method of Cirrus Based on MODIS Parameters

Ye Song^{1,2}, Fu Simeng^{1,2}, Li Shu^{1,2*}, Wang Xinqiang^{1,2}, Wang Fangyuan^{1,2}, Qu Wenxue^{1,2}

¹*School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;*

²*Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin, Guangxi 541004, China*

Abstract Cirrus optical thickness is one of the cloud optical parameters that have great influence on global climate and earth radiation budget. In military, atmospheric science and other fields, there is a wide demand for cirrus optical parameter solving algorithm. Moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data is used to solve cirrus parameters, and satellite multi-channel data is mostly used, so the data processing process is relatively complex. The RT3 model combined with MODIS cloud parameters was proposed to simulate and calculate cirrus reflectance, and a cirrus optical thickness lookup table was established. A simple algorithm was designed to achieve effective inversion of cirrus optical thickness. The correlation coefficient between the inversion results of cirrus optical thickness and the actual data measured by MODIS is 0.97, which verifies the reliability of cirrus optical thickness inversion. By selecting MODIS data at different time periods, the variation of cirrus optical thickness in different time and space ranges is analyzed, and the average error is less than 0.16, which further verifies the effectiveness of the RT3 model-based lookup table for inversion of cirrus optical thickness. The results are helpful to realize simple and effective inversion of cirrus optical properties worldwide.

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-02-04; 录用日期: 2021-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(41961050)、广西特聘专家团队项目资助、广西自然科学基金(2019GXNSFB A245048)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ20105)、广西科技基地和人才专项(桂科 AD19245117)

通信作者: *lishu_owen@sina.com

Key words atmospheric optics; cirrus cloud; optical thickness; multiplier method; retrieval

OCIS codes 010.1615; 280.4991; 290.1310

1 引言

云在气候预测中是一个重要的不确定因素。卷云等冰云位于对流层上部,在时空的覆盖范围内较为广阔,约占全球的 30%^[1]。通常,卷云的构成较为复杂,涵盖多种冰晶粒子模型,其微观物理光学特性以及宏观物理光学特性都有很大的差异,这种差异性使得准确反演卷云光学参数具有重大意义。而在卷云的光学参数中,云光学厚度是理解卷云辐射强迫以及气候反馈的关键因素。因此,简单有效地反演卷云的光学厚度(COT),对评估和进一步改进冰云模型,从而拓宽卷云在气候预测甚至军事方面的应用范围至关重要。

卷云的观测,主要是通过地面激光雷达、卫星遥感、高空飞机探测三种方式来实现^[2]。由于卷云在时间空间上的变换范围较大,飞机实测和地面激光雷达在卷云探测方面的应用容易受到限制,故应用卫星遥感数据反演卷云参数具有重大意义^[3]。美国国家航空航天局(NASA)在 21 世纪初,先后发射了 Terra、Aqua 卫星,这两卫星均携带了 MODIS 仪器^[4]。2017 年 Yang 等^[5]指出准确估计冰云光学厚度和云粒子有效半径(R_e)是研究全球气候模式(GCMs)中云辐射效应参数化、理解地球辐射的基础。同年,Platnick 等^[6]分析了由 MODIS 反演得到的 0.65 μm 波段陆面卷云的光学厚度。

卷云反射率的数值模拟计算,是反演卷云光学厚度的第一步。2012 年,曹亚楠等^[7]利用 CART 辐射传输软件对卷云的反射率进行了模拟计算。2015 年,孙贤明等^[8]根据 Monte Carlo 方法模拟了准直光束入射到由冰云及水云构成的双层云时的后向散射特性。2018 年,赵凤美等^[9]利用离散坐标辐射传输模型(DISORT)建立查找表,计算了卷云的反射率。Evans 等依据倍加累加法原理,提出 RT3 模型,该模型可应用于卷云反射率的模拟计算。相较于其他模拟计算方法,RT3 模型得到的结果相对稳定精确,且低层气溶胶对反演结果的影响较小^[10]。

本文利用 RT3 矢量辐射传输模式建立卷云光学厚度查找表(LUT),分析输入端太阳和仪器的几何参数对反射率的影响。依据 MODIS 云产品

等,将模拟计算结果同 MODIS 实际观测数据进行对照分析,验证了 LUT 反演卷云光学厚度的可靠性,并从时间及空间角度分析了卷云的分布变化情况。

2 理论基础及方法

2.1 卷云光学参数的计算

卷云的光学厚度和微物理特性粒子有效半径的反演,通常依据辐射传输技术来实现^[11]。计算卷云的光学厚度及粒子有效半径,需要根据辐射传输模式计算反射辐射亮度,若卫星探测的某一像元对应的天顶角和方位角分别为 θ 和 φ ,反射辐射亮度为 $I_\lambda = (\mu, \varphi)$,其中 $\mu = \cos \theta$,则粒子的有效半径 R_e 可表示为

$$R_e = \frac{\int_0^\infty R^3 n(R) dR}{\int_0^\infty R^2 n(R) dR}, \quad (1)$$

式中, $n(R)$ 代表粒子的尺度分布, R 代表粒子的半径。根据数值模拟和渐进理论,用 τ'_c 和 s 两个参数确定光学厚度较厚的卷云的反射特征^[12],两者的表达式分别为

$$\tau'_c = (1 - \omega_0 g) \tau_c, \quad (2)$$

$$s = \left(\frac{1 - \omega_0}{1 - \omega_0 g} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式中, τ'_c 为尺度化光学厚度, τ_c 为光学厚度, g 为非对称因子, ω_0 为单次散射反照率, s 主要与粒子有效半径有关。

实际反演卷云光学厚度及云粒子有效半径时,需要将卫星探测的多通道反射率与数据库中不同冰云模型的反射率作对比,计算反射率对数差平方和。反射率对数差平方和可表示为

$$\chi^2 = \sum_k (\ln c_k - \ln r_k)^2, \quad (4)$$

式中 c_k 为卫星第 k 个通道观测的反射率, r_k 为数据库中模拟计算的第 k 个通道的反射率。选取最小 χ^2 值对应的模拟计算反射率,此反射率对应的 COT 和云粒子有效半径就是最终卷云光学参数反演的结果。

2.2 矢量辐射传输模型 RT3

基于 RT3 模式计算辐射亮度信息,建立卷云光

学厚度查找表,结果表明计算数值较为稳定,气溶胶光学厚度对计算结果的影响较小,且对复杂大气条件下的光散射特性的求解较为精确^[13]。研究大

气辐射传输时,假定光穿过的大气是均匀且水平的,则可将介质分为多个相互平行的薄层。若不考虑红外热辐射问题,矢量辐射传输方程可表示为

$$-\mu \frac{d\mathbf{I}(\tau, \mu, \varphi)}{d\tau} = -\mathbf{I}(\tau, \mu, \varphi) + \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi; \mu', \varphi') \mathbf{I}(\tau', \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' + \frac{\omega}{4\pi} F_0 \exp(-\tau/\mu_0) \mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi; \mu_0, \varphi_0), \quad (5)$$

式中: \mathbf{I} 是 Stokes 参量矢量; τ 表示大气的光学厚度; ω 代表单次散射反照率; \mathbf{M} 代表散射相矩阵; $F_0 = [F_0, 0, 0, 0]^T$ 为太阳辐射通量密度; μ_0 代表太阳天顶角余弦; φ_0 是太阳方位角; τ' 为上边界的光学厚度; μ' 和 φ' 分别为散射层上行辐射天顶角余弦和方位角。单次散射相矩阵 $\mathbf{P}(\Theta)$ 经过参考平面旋转变换得 \mathbf{M} (Mueller 矩阵)^[14], 表达式为

$$\mathbf{M} = (\mu, \varphi; \mu', \varphi') = \mathbf{L}(\pi - i_2) \mathbf{P}(\Theta) \mathbf{L}(i_1), \quad (6)$$

式中: $\mathbf{P}(\Theta)$ 为散射体的散射相矩阵; i_1 为 (μ', φ') 方向与天顶方向确定的子午面与散射面之间的夹角,负号表示是逆时针旋转, $\mathbf{L}(-i_1)$ 表示参考面由子午面转到散射面所对应的斯托克斯矢量变换矩阵; i_2 为 (μ, φ) 方向与天顶方向确定的子午面与散射面之间的夹角, $\mathbf{L}(\pi - i_2)$ 表示参考面由散射面转到子午面所对应的斯托克斯矢量变换矩阵。散射相矩阵 $\mathbf{P}(\Theta)$ 可表示为

$$\mathbf{P}(\Theta) = \begin{bmatrix} P_{11}(\Theta) & P_{12}(\Theta) & 0 & 0 \\ P_{21}(\Theta) & P_{22}(\Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}(\Theta) & P_{34}(\Theta) \\ 0 & 0 & P_{43}(\Theta) & P_{44}(\Theta) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{L}(i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2i & \sin 2i & 0 \\ 0 & -\sin 2i & \cos 2i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 i 为 $=i_1, i_2$ 。

R_p 为偏振反射率,可表示为

$$R_p = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{\mu_0 E_0}, \quad (9)$$

式中 Q, U 为 Stokes 参数, μ_0 为太阳天顶角的余弦值, E_0 为大气顶辐射通量。

在应用 RT3 矢量辐射传输模式计算卷云光学厚

度时,首先需要结合上述公式计算设定输入参数 (Stokes 个数、地表类型、天顶角等),大气层文件 (包括层数、温度、高度等参数) 以及散射矩阵文件 (包括 Mie 散射理论计算的散射矩阵、粒子散射模型、复折射率等)。再根据反演波段,结合输出参数建立光学厚度查找表,最后通过查找表对应的 MODIS 二级云产品,实现卷云光学厚度的反演。具体流程如图 1 所示。

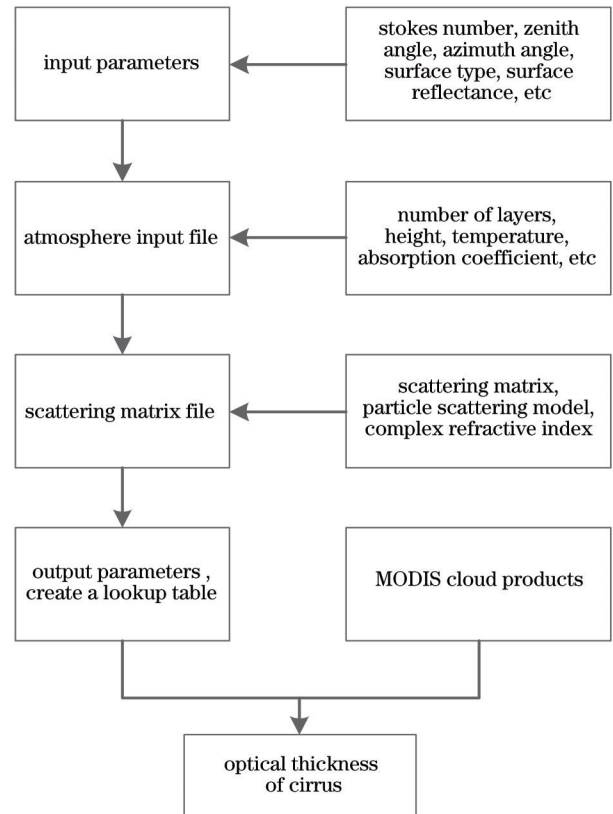


图 1 利用 RT3 计算卷云光学厚度的流程图

Fig. 1 Flow chart for calculating cirrus optical thickness using RT3

3 反演数据处理及结果分析

3.1 卷云光学厚度查找表的建立

MODIS 卫星数据有覆盖区域广、数据较为精确等优点。MODIS 卫星的探测通道多于其他卫星,反演陆地表面云光学厚度的可见光通道的中心

波长包括 0.65, 2.13, 1.64, 3.75 μm 。此外,在反演卷云光学厚度时,需要考虑卷云中存在不同形状的冰晶粒子,不同形状冰晶粒子对应的复折射率,尺度参数等微物理参数对光散射特性的影响。为了更好地描述冰晶粒子的散射特性,MODIS 研究团队提出了 SC (Solid Columns)、ASC (Aggregate Solid Columns)、GHM (General Habit Mixture) 三种冰晶粒子散射模型。其中,卷云的 GHM 冰晶粒子模型,涵盖了较多空心柱状、子弹花状、实心柱状等非球形冰晶粒子形态^[15]。

为了建立光学厚度查找表,首先将卷云冰晶粒子模型设定为 GHM,并把大气层划分为三层:高层(大气分子层)、中层(卷云层)、低层(气溶胶层)。依照 RT3 模型的辐射传输理论,将大气层等分为多个不同的薄层,利用各个均一薄层大气的已知参数,对薄层进行逐次倍加递推,再结合第 2 节公式计算,就可快速得到整层大气的参数。考虑到几何参数(如观测天顶角、太阳天顶角、相对方位角等)、地面地表反射率(A_g)及云粒子有效半径等对卷云反射率有不同程度的影响,将 LUT 变量设为 COT,模

拟计算了 0.65 μm 波段,不同参数条件下地面卷云的反射率。

图 2 展现了在不同光学厚度、地表反射率、观测角、有效粒子半径下卷云反射率的具体变化情况。从图 2(a)中可看到在相同光学厚度下,太阳高度角增加,卷云反射率相应增大,0.65 μm 波段的卷云反射率随光学厚度成正比例增加。在光学厚度小于 5 时,各个太阳高度角对应的卷云反射率增长趋势明显,在光学厚度大于 5 后增长速率明显减缓。

图 2(b)呈现了卷云反射率随地表反射率的变化,可以看出在确定的地表反射率条件下,卷云光学厚度值越大,对应的反射率值相应增加。随着地表反射率的增大,各个光学厚度条件下的卷云反射率的差距越来越小,在地表反射率接近 1 时,卷云反射率几乎取相同值。图 2(c)反映了在相对方位角为 0° 时,卷云反射率随观测角的变化。在观测角为 50° 左右,不同光学厚度的卷云反射率增长速率明显变大,在观测角为 75° 时,卷云反射率出现明显峰值,并在观测角为 75° 至 80° 时卷云反射率有明显的下降趋势。由图 2(d)可得到卷云反射率和有效粒子半

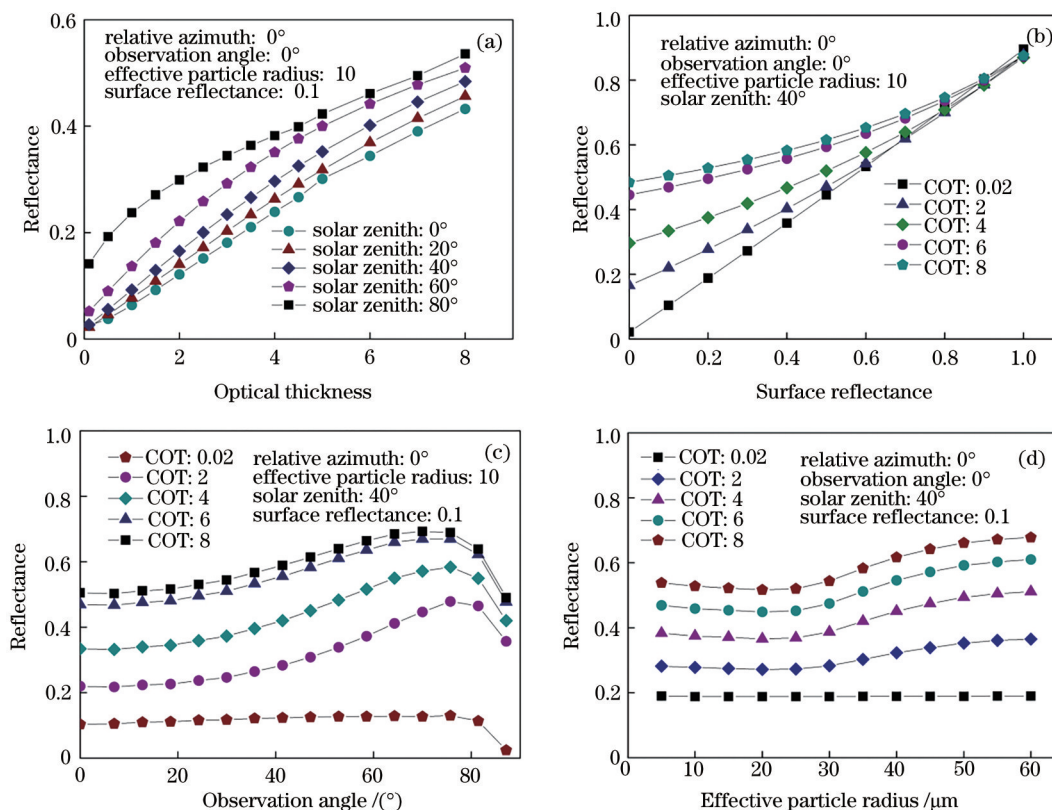


图 2 不同光学厚度、地表反射率、观测角、有效粒子半径条件下卷云反射率的变化。(a)光学厚度;(b)地表反射率;(c)观测角;(d)有效粒子半径

Fig. 2 Change of cirrus reflectance under different optical thickness, surface reflectance, observation angle and effective particle radius. (a) Optical thickness; (b) surface reflectance; (c) observation angle; (d) effective particle radius

径之间的关系,随着有效粒子半径的增大,卷云反射率变化不明显,在有效粒子半径等于 $30\ \mu\text{m}$ 时,除光学厚度为 0.02 外,其他光学厚度对应的卷云反射率出现明显增大的情况,但在有效粒子半径大于 $50\ \mu\text{m}$ 之后,曲线呈平滑状态,增长速率有明显降低。

依据以上卷云反射率随光学参数的变化情况,设定卷云光学厚度为变量,取值范围为 $0.01\sim 100$,冰晶粒子有效半径为 $10\ \mu\text{m}$ 。太阳天顶角的取值范围为 0° 至 80° (取样间隔为 1°),相对方位角为 0° 至 180° ,地表反射率 A_g 的取值在 0 至 1 (取样间隔为 0.1) 范围内,共 11 个取样点,实现了卷云光学厚度查找表的建立。

3.2 基于 MODIS 数据的反演结果分析

为验证 LUT 的准确有效性,应用 MODIS 云产品数据进行对比分析。首先在地图上选取 h27v06 (地球投影系统下分片标示为水平 27,垂直 06) 的区域,依据 MOD06 产品确定云相态为冰云的像元,利用同一时刻同一地点的 MOD06 及 MOD03 产品的同一性,确定 LUT 有效粒子半径设定值相同的像元、对应几何参数信息(太阳天顶角、仪器天顶角、相对方位角等)、地表类型、经纬度信息等。其次根据 MODIS 地表数据产品对应 LUT 的地表反射率信息和 MODIS 一级数据对应的反射率信息,通过数学函数线性插值运算,得到对应像元的 COT 值。

图 3 表明了由 LUT 反演和 MODIS 观测得到的卷云 COT 之间的关系,图中每个散点 COT 代表不同像元的光学厚度值。由图 3 可以看出:LUT 反演

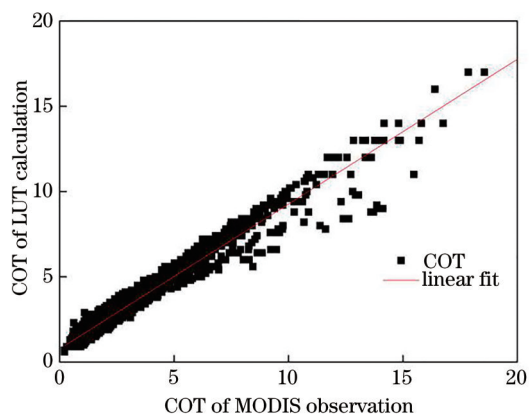


图 3 MODIS 观测卷云光学厚度与 LUT 计算结果对比
Fig. 3 Comparison on cirrus optical thickness between MODIS observation and LUT calculation

结果同 MODIS 实测数据有较高的一致性。经线性拟合处理,可知两者相关性可达 0.97;图中也有个别离散点出现,LUT 计算的 COT 值相较 MODIS 实际观测值略小。这种误差的出现,可能由以下几方面原因引起:1)由 MODIS 反演的云参数存在误差,即有可能在云相态识别过程中没有对冰水云进行准确地有效区分,尤其是在冰云水云混合的情况下;2)由 LUT 计算的卷云参数的冰晶粒子模型和 MODIS 使用的冰晶粒子模型不一致,用单一的冰晶粒子模型反映的实际卷云冰晶粒子情况存在一定误差;3)卷云云场的不均匀性会对 MODIS 云参数反演产生影响。

本质上,MODIS 采用多波段 DISORT 实现卷云光学厚度的反演时,方法的精度取决于多项式展开的次数,次数越多,精确度越高,但复杂度也越高。在参数相同的条件下,利用 DISORT 建立 LUT,计算得到的云光学参数与 MODIS 云产品的相关性最高为 0.93,低于应用 RT3 模拟计算方法时的对应结果,这进一步说明了应用 RT3 模拟计算方法的简单有效性。

为了在时间和空间上体现 LUT 卷云的反演情况,在全球范围内选定东经 $85^\circ\sim 110^\circ$,北纬 $15^\circ\sim 40^\circ$ 区域,根据实际反演卷云光学厚度的情况,设定 COT 范围为 $0\sim 30$,并用色度条标记,图中底部线条为标记海岸线。图 4(a)、(c)代表 MODIS 实际观测情况,图 4(b)、(d)代表对应的 LUT 反演计算结果。图 4(a)、(b)分别表明 2020 年 7 月 17 日 3 时 15 分(协调世界时,UTC,下同)不同光学厚度值的卷云分布情况。图 4(c)、(d)分别表明 2020 年 7 月 17 日 5 时不同光学厚度值的卷云分布情况。计算分析两个时间段的反演数据,得到两时间段卷云反演的平均误差小于 0.16。

从图 4 中可以看出 LUT 的反演结果和 MODIS 实际观测数值分布情况基本一致,在图 4(a)和图 4(b)中,东经 $95^\circ\sim 105^\circ$,北纬 $20^\circ\sim 30^\circ$ 范围内两组数据出现明显差异,这主要由两方面原因造成。一方面是在建立 LUT 数据库时,设定的 COT 范围较大,设定步长随着 COT 的变化逐渐加大,这就使得 COT 较大区域内数值反演出现一定误差,即在 $0\sim 10$ 光学厚度范围内反演数据较为准确,卷云光学厚度值增大,反演精度降低。另一方面是设定的卷云冰晶粒子模型 GHM,虽然考虑了较多不同类型的冰晶粒子,但仍不能完全代表实际

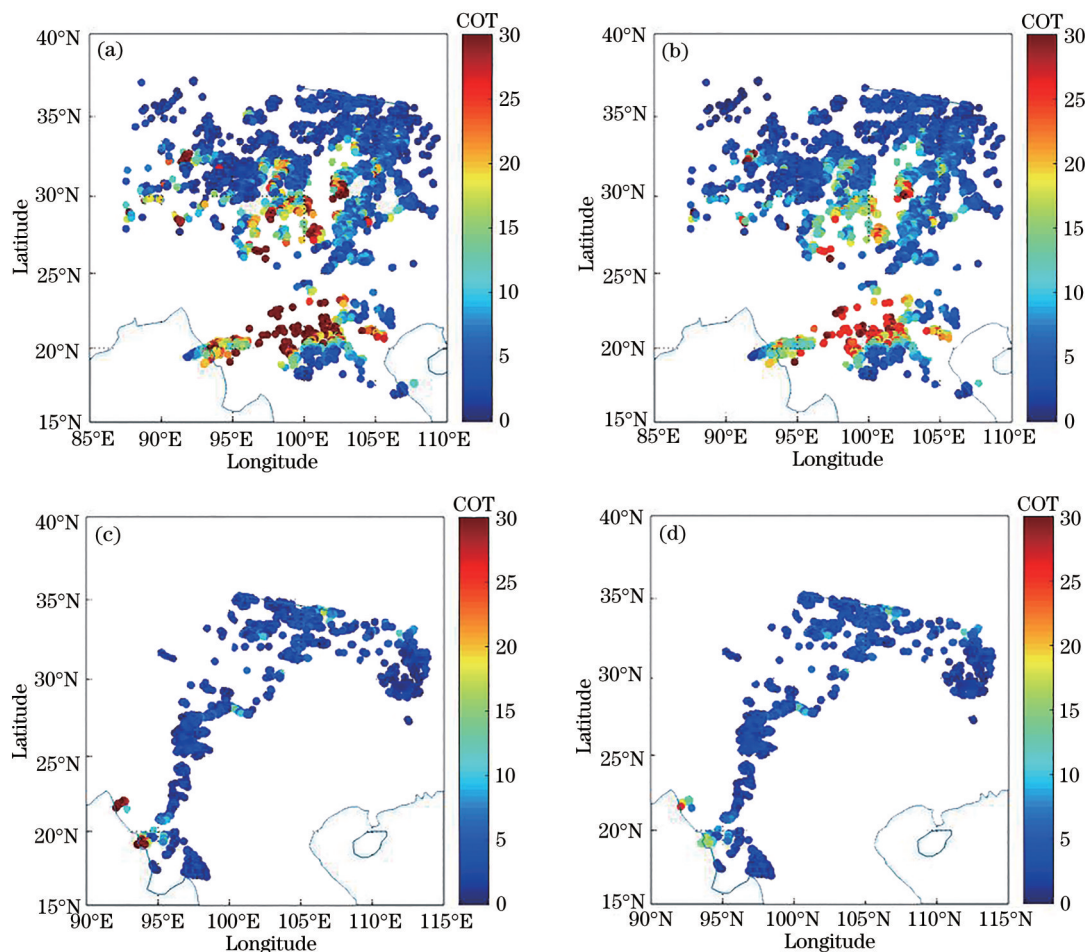


图 4 MODIS 观测与 LUT 计算的 COT 分布情况。(a) MODIS-UTC2020-07-17T03:15:00; (b) LUT-UTC2020-07-17T03:15:00; (c) MODIS-UTC2020-07-17T05:00:00; (d) LUT-UTC2020-07-17T05:00:00

Fig. 4 MODIS observed and LUT calculated the optical thickness distribution of cirrus. (a) MODIS-UTC2020-07-17T03:15:00; (b) LUT-UTC2020-07-17T03:15:00; (c) MODIS-UTC2020-07-17T05:00:00; (d) LUT-UTC2020-07-17T05:00:00

观测时的卷云冰晶粒子情况,这会对卷云光学厚度的反演结果产生影响。图 4(c)和图 4(d)体现了 UTC05:00 的卷云分布图,由于光学厚度值主要集中在 0~10 范围内,反演结果相对图 4(a)和图 4(b)好一些。从图中可以看出,05:00 时冰云分布相较于 03:15 时有了明显减少,大部分集中在北纬 25°~35° 范围内,这从时间和空间上体现了卷云分布的变化情况。

4 结 论

基于 MODIS 数据,采用 RT3 矢量辐射传输模型模拟计算卷云反射率,结合卷云的几何参数变化,构建卷云光学厚度查找表。利用设定的几何参数和 MODIS 云产品的对应关系,考虑地表类型对卷云反射率的影响,结合线性插值运算,实现了特定区域内,陆地表面卷云光学厚度的简单、有效反

演。MODIS 实际观测数据和反演结果的相关性达到 0.97,由此验证应用 RT3 模拟计算方法建立 LUT 反演云参数的可行性。选取不同时段、空间范围一致时的 MODIS 数据进行反演分析,平均误差小于 0.16,这不仅验证了算法的有效性,也在时间空间范围上体现了卷云分布的变化,有助于军事活动及气候的预测。下一步将研究此算法应用于不同地区及不同波段条件时卷云对全球气候的影响。

参 考 文 献

[1] Fauchez T, Platnick S, Sourdeval O, et al. Cirrus horizontal heterogeneity and 3-D radiative effects on cloud optical property retrievals from MODIS near to thermal infrared channels as a function of spatial resolution[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(19): 11141-11153.

- [2] Liao Z J. Study on light scattering characteristics of cirrus and reflectivity inversion[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
廖子君. 卷云光散射特性研究及反射率反演[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [3] Xing Y, Huang J W, Yi F. Inversion of cirrus cloud parameters based on AIRS and MODIS data fusion [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(5): 74-82.
邢颖, 黄佳伟, 易凡. 基于 AIRS 和 MODIS 数据融合的卷云参数反演[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(5): 74-82.
- [4] Wang Y, Yang P, Hioki S, et al. Ice cloud optical thickness, effective radius, and ice water path inferred from fused MISR and MODIS measurements based on a pixel-level optimal ice particle roughness model[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(22): 12126-12140.
- [5] Loeb N G, Yang P, Rose F G, et al. Impact of ice cloud microphysics on satellite cloud retrievals and broadband flux radiative transfer model calculations [J]. Journal of Climate, 2018, 31(5): 1851-1864.
- [6] Platnick S, Meyer K G, King M D, et al. The MODIS cloud optical and microphysical products: collection 6 updates and examples from terra and aqua [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(1): 502-525.
- [7] Cao Y N, Wei H L, Chen X H, 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.
- [8] Sun X M, Xiao S, Wang H H, et al. Transportation of Gaussian light beam in two-layer clouds by Monte Carlo simulation[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(18): 184204.
孙贤明, 肖赛, 王海华, 等. 高斯光束在双层云中传输的蒙特卡罗模拟[J]. 物理学报, 2015, 64(18): 184204.
- [9] Zhao F M, Dai C M, Wei H L, et al. Calculating the reflectance of cirrus clouds based on cirrus properties from MODIS[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(9): 0917006.
赵凤美, 戴聪明, 魏合理, 等. 基于 MODIS 云参数的卷云反射率计算研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0917006.
- [10] Zhang Y, Zhang Y, Zhao H J. A skylight polarization model of various weather conditions[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(4): 453-459.
张颖, 张熠, 赵慧洁. 多种天气条件下的天空光偏振模型[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(4): 453-459.
- [11] Baum B A, Platnick S. Introduction to MODIS cloud products[M]//Qu J J, Gao W, Kafatos M, et al. Earth science satellite remote sensing. Heidelberg: Springer, 2006: 74-91.
- [12] Yang P, Wei H L, Huang H L, 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.
- [13] Li S, Sun X B, Ti R F, et al. Influence of scattering model and effective particle radius on cirrus cloud optical thickness retrieval[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0701001.
李树, 孙晓兵, 提汝芳, 等. 散射模型和有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0701001.
- [14] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. California: Academic Press, 2002: 317-324.
- [15] Baum B A, Yang P, Heymsfield A J, et al. Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 146: 123-139.