

利用 MODIS 数据反演多层云光学厚度和有效粒子半径^{* 1}

叶 晶^{1,2} 李万彪¹ 严 卫³
YE Jing^{1,2} LI Wanbiao¹ YAN Wei³

1. 北京大学物理学院大气科学系,北京,100871

2. 解放军 95871 部队,衡阳,421002

3. 解放军理工大学气象学院,南京,211101

1. *Department of Atmospheric Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*

2. *No. 95871 Navy of PLA, Hengyang 421002, China*

3. *Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China*

2008-01-21 收稿,2009-04-17 改回.

Ye Jing, Li Wanbiao, Yan Wei. 2009. Retrieval of the optical thickness and effective radius of multilayered cloud using MODIS data. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(4):613—622

Abstract The retrieval of cloud microphysical properties using satellite data is crucial to not only weather monitoring and forecast but also the weather modification research. At present the main assumption for the operational retrieval of cloud microphysical properties is that only single-layered clouds exist in the view field of the satellite. However, multilayer clouds appear very frequently. An algorithm using a combination of MODIS absorbing and nonabsorbing channels is presented for the retrieval of the optical thickness and effective particle radius of multilayer cloud, specially for cases with optically thin ice clouds overlying lower-level water clouds. Base on this algorithm the impact of the multilayer cloud that ice cloud lies over water cloud on the retrieval of cloud microphysical properties is simulated with SBDART radiative transfer model. The stimulated result shows that the error caused by considering a multilayer cloud as a single layer cloud is evident. In terms of the stimulation, an algorithm for the retrieval of the optical thickness and effective particle radius considering the effect of the multilayer cloud is presented in this paper, and a scheme is designed for the retrieval of the optical thickness and effective particle radius. In this scheme, the radiative databases of the optical thickness and effective particle radius of water cloud, ice cloud and multilayered cloud are established with SBDART radiative transfer model, considering various geometrical conditions, surface types, and atmospheric environment. After the detection of cloud mask, cloud phase and multilayer cloud, the optical thickness and effective particle radius are retrieved based on those databases, processing the channel 1 data and channel 7 data of MODIS with the method of least-squares fit. The scheme is applied to the MODIS data of TERRA on 12 July 2007, and the case study shows that our retrieval results are in good agreement with those of the MOD06 released by NASA, which indicates that the scheme is reasonable.

Key words SBDART, Multilayer cloud, Optical thickness, Effective particle radius

摘 要 利用卫星资料反演云微物理参数不仅有助于对天气变化的监测和预报,而且对人工影响天气的研究十分有益。目前卫星反演云微物理参数的算法一般是假设视场中只有一层云,但是实际环境中多层云出现很频繁。文中研究了多层云的光学厚度和有效粒子半径微物理参数的反演算法,主要针对薄的冰云覆盖在低层水云的多层云情形。算法利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)吸收通道和非吸收通道同时进行反演,在此基础上利用 SBDART 辐射传输模式模拟冰云覆盖在低层水云上的多层云对云微物理参数反演的影响,模拟表明反演时将多层云作为单层云处理会使反演结果产生较大误差。为此,文中

* 资助课题:国家科技支撑计划课题(2006BAC12B02-03)。

作者简介:叶晶,主要从事大气辐射与遥感应用方面的研究。E-mail: ye1999jing@sina.com

提出了云光学厚度和有效粒子半径反演算法中要考虑多层云的因素,并设计了一套云光学厚度和有效粒子半径反演方案。该方案使用 SBDART 辐射传输模式建立不同观测几何条件、下垫面类型、大气环境等条件下以光学厚度和有效粒子半径为函数变量的多层云、水云和冰云辐射查找表。经过云检测、云相态识别和多层云检测后,在该查找表的基础上,对 MODIS 通道 1 和通道 7 的数据采用最小方差拟合法反演光学厚度、有效粒子半径。利用该方案对 2006 年 7 月 12 日 TERRA 卫星 MODIS 数据进行反演试验,反演结果与 NASA 发布的 MOD06 产品中云的光学厚度和有效粒子半径的结果较一致,表明方案具有合理性。

关键词 SBDART, 多层云, 光学厚度, 有效粒子半径

中图法分类号 P401

1 引言

众所周知,云对地-气间的能量平衡具有强烈的调节作用。云的性质及其在空间和时间尺度上的变化对全球气候变化的研究是十分重要的。云的物理光学特性对地-气系统的辐射收支有很大的影响,云既是入射太阳辐射的反射体,同时也是地球长波辐射的有效吸收体。了解云的辐射特性和变化对理解气候辐射强迫具有非常重要的意义。云的光学厚度和有效粒子半径反演的重要性不仅在于它们可以反演,更在于云的短波反射辐射性质在很大程度上与这两个参数有关,它们构成了云辐射参数化方法的基础。MODIS 作为迄今为止最先进的空间星载传感技术和遥感应用技术的代表,是实现云的遥感和反演目的的理想遥感器。

有关云微物理参数反演的工作已经开展多年,国际上,20 世纪 70 年代就开始用机载可见光和近红外探测仪反演云的光学厚度和(或)有效粒子半径,并取得许多成功的试验研究结果(King, 1987; Twomey, et al, 1989; Makajima, et al, 1990; Makajima, et al, 1991; Platnick, et al, 1995)。随着卫星资料的广泛应用,使用卫星资料反演云微物理参数的研究不断增多,现在相关技术已经日趋成熟。最有代表性的反演算法是由 Nakajima 等(1990)提出的双通道同时反演云的光学厚度和云滴有效半径的算法。在中国,云的光学厚度和有效粒子半径反演工作开展相对较晚。刘健(1999)用 AVHRR 资料分析云和雾顶部粒子的尺度特征和分布状况,得到通道 3 发射率的大值区与大雾覆盖区之间有良好的对应性。赵凤生等(2002)建立了一种利用 AVHRR 0.64 和 3.75 μm 通道测量的辐射率同时反演云的光学厚度和云滴有效半径的迭代方

法,并将其应用于分析中国东海上空冬季层积云的辐射特性。刘健等(2003)利用 FY-1C 资料双通道同时反演水云的光学厚度和有效粒子半径。邓军等(2006)利用 MODIS 资料进行云雾光学厚度和有效粒子半径反演的研究。目前国内的研究主要是讨论了水云的反演。按照 MODIS 算法理论基础文档 ATBD(Algorithm Theoretical Basis Document)的说明,云相态是进行云光学厚度和有效粒子半径反演必须考虑的因素,对不同相态的云要选择相应的查找表进行反演(刘玉洁等,2001)。

另外,地基雷达和激光雷达已经证明多层云出现很频繁,但是目前业务卫星反演云参数的算法一般是在假设单一视场中只有一层云的情况下进行的。这种假设对于常规的以云地分离为主要目的的云检测是基本合理的,但在进行云有效粒子半径、云光学厚度等云微物理参数反演时,多层云的存在对云参数的反演精度有一定影响。目前国外已有一些有关多层云对云微物理参数反演影响的研究。Xiong 等(2002)利用 AVHRR 数据在北极地区进行云参数反演的研究,他们研究的对象是有效粒子半径 r_e 为 30 μm ,光学厚度 τ 为 0.2 的薄卷云覆盖在 r_e 和 τ 可变化的低层水云之上的多层云,得出的结论是:与真实的水云 r_e 相比,试验反演的水云粒子 r_e 要大 35%—50%, τ 要小 70%—80%。Dong 等(2002)研究了利用 GOES、机载传感器和地基仪器遥感层云,他们发现卷云($\tau=0.25$)的“污染”会导致 r_e 增大 4%—9%。国内还没有开展这方面的研究。因此,研究多层云对日益重视的云微物理参数反演的影响具有十分重要的意义。

本文利用 SBDART 辐射传输模式模拟了多层云的存在对云光学厚度和有效粒子半径反演精度的影响,特别研究了薄的冰云覆盖在低层水云上的多

层云情形。文章首先给出了利用双通道反演云光学厚度和有效粒子半径的算法,然后提出了 SBDART 进行模拟的设计方案,对多层云在反演中的影响进行误差分析,结合反演结果的相对误差百分比、真实光学厚度与真实有效粒子半径之间的三维图得出结论。

根据模拟的结论,本文尝试在实际的云光学厚度和有效粒子半径反演中考虑多层云的因素。首先利用 SBDART 辐射传输模式不仅计算水云、冰云的辐射查找表,还计算了多层云的辐射查找表。在得到查找表的基础上,针对 MODIS 数据每个像元,首先进行云检测、云相态识别和多层云检测,再进行观测几何条件、下垫面类型数据匹配处理,最后利用最小方差拟合法求取云的光学厚度和有效粒子半径。

2 算法原理

目前常用的云光学厚度和有效粒子半径反演算法是由 Nakajima 等(1990)提出的。算法的主要原

理是云在非吸收的可见光波段上,反射函数主要是云光学厚度的函数,在吸收的近红外波段上,反射函数主要是云粒子大小的函数。

为了研究在可见光和近红外波段情况下,云辐射值与云光学厚度 τ 和有效粒子半径 r_e 之间的关系,我们使用 SBDART 辐射传输模式模拟计算在不同 τ 和 r_e 条件下,MODIS 通道 1($0.65 \mu\text{m}$)和通道 6($1.64 \mu\text{m}$)、通道 7($2.13 \mu\text{m}$)、通道 20($3.75 \mu\text{m}$)的辐射值关系如图 1 所示。图中实线代表 r_e 一定、 τ 变化时的辐射值变化情况,虚线是 τ 一定、 r_e 变化时的辐射值变化情况。

通过对模拟计算结果的分析可知,通道 1 辐射值与云光学厚度密切相关,光学厚度越大,辐射值越大。通道 6、7、20 辐射值与云粒子尺度大小存在明显的函数关系,有效粒子半径越大,辐射值越小。因此,使用不同的通道组合(通道 1 和 6,通道 1 和 7,通道 1 和 20)可以同时反演云光学厚度和有效粒子半径。

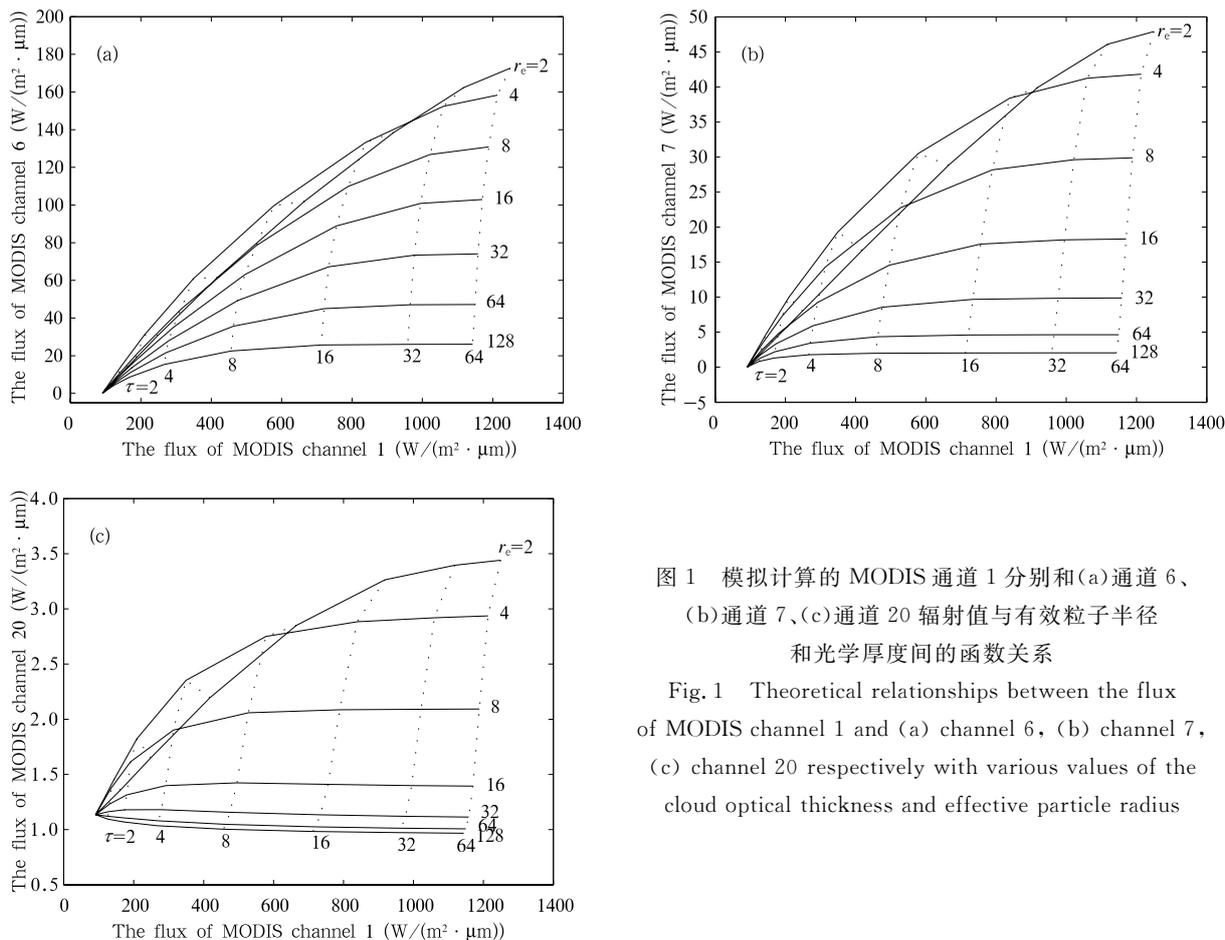


图 1 模拟计算的 MODIS 通道 1 分别和(a)通道 6、(b)通道 7、(c)通道 20 辐射值与有效粒子半径和光学厚度间的函数关系

Fig. 1 Theoretical relationships between the flux of MODIS channel 1 and (a) channel 6, (b) channel 7, (c) channel 20 respectively with various values of the cloud optical thickness and effective particle radius

3 模拟方案设计

SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) 模式是计算晴空和有云状况下地球大气和表面的平面平行大气辐射传输的程序包, 它包括所有影响紫外线、可见光和红外辐射的重要过程。该程序包使用离散坐标法求解辐射常数方程, 给出了完全稳定的解析解, 可求解垂直非均匀、各向异性并含热源的平面平行介质中的辐射传输问题。该程序包对基于 Chandrasekhar 公式的计算方法作了改进, 用标准矩阵解法直接求取齐次微分方程组的特征值, 提高了计算效率, 而且, SBDART 模式计算了热辐射、散射、吸收、下边界双向反射和发射等物理过程, 非常适合对云参数进行研究分析 (Paul, 1998; 王新炜等, 2003)。

本文选用 SBDART 模式对多层云进行模拟。模拟了两种多层云情形下的反演误差: 一是光学厚度 τ 为 1, 有效粒子半径 r_e 为 $32 \mu\text{m}$ 的冰云覆盖于低层水云上, 二是高层冰云被下层 τ 为 5, r_e 为 $8 \mu\text{m}$ 的水云“污染”。首先利用 SBDART 模式计算以上两种情形的多层云在通道 1 和 7 上云顶辐射率, 将其作为实际观测值, 然后利用模式计算单层水云和单层冰云通道 1 和 7 上的辐射查找表, 再在单层水云和单层冰云的查找表中利用最小方差拟合法, 寻找与实际观测值最接近的光学厚度和有效粒子半径, 将其作为反演结果, 最后求出反演值与真实值之间的相对误差百分比。真实 τ 和 r_e 是计算多层云顶辐射值时输入模式的 τ 和 r_e 的值。方案流程如图 2 所示。

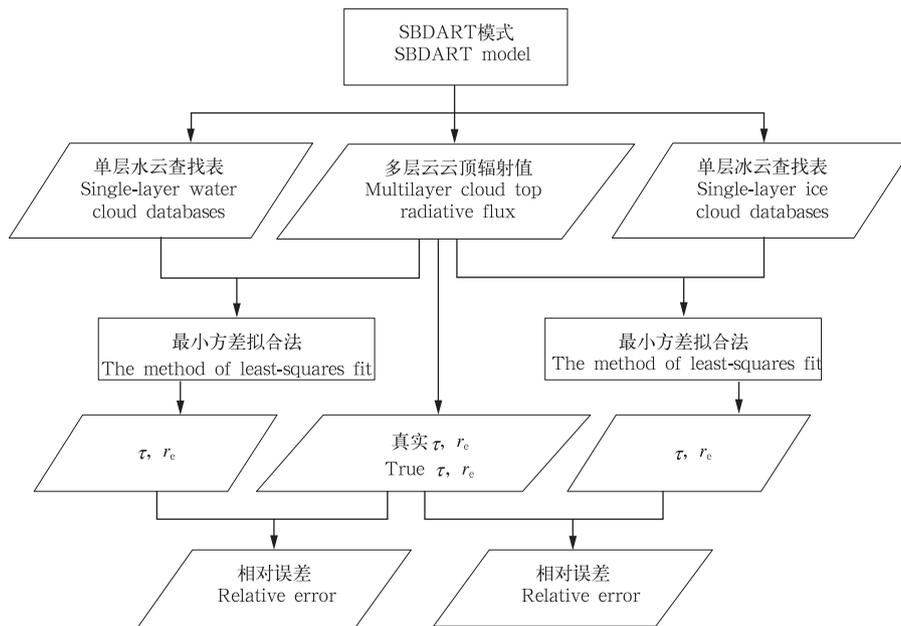


图 2 模拟流程图

Fig. 2 The flow chart of the simulation

4 模拟误差分析

按照图 2 的模拟流程, 我们可以获得两种情形下反演的相对误差。并绘制相对误差百分比、真实光学厚度与真实有效粒子半径之间的三维图 (图 3 和图 4)。

图 3 显示的是低层水云“污染”上层冰云时反演

冰云 r_e 和 τ 的相对误差组图。图 3a 和 3b 分别是利用冰云和水云查找表反演的冰云 r_e 与真实 r_e 值之间的相对误差。当 r_e 真实值较小时, 使用冰云和水云查找表反演的结果相对误差都很大, 前者的相对误差比后者要小, 同时就整体而言, 前者反演的相对误差要比后者小。图 3c 和 3d 显示了利用冰云和水云查找表反演 τ 值和真实 τ 值之间的相对误差。当

τ 真实值较小时, 使用冰云和水云查找表反演的结果相对误差都很大。随着 τ 的增大, 利用水云查找

表反演的 τ 值相对误差较大, 而使用冰云查找表反演的值相对误差较小。

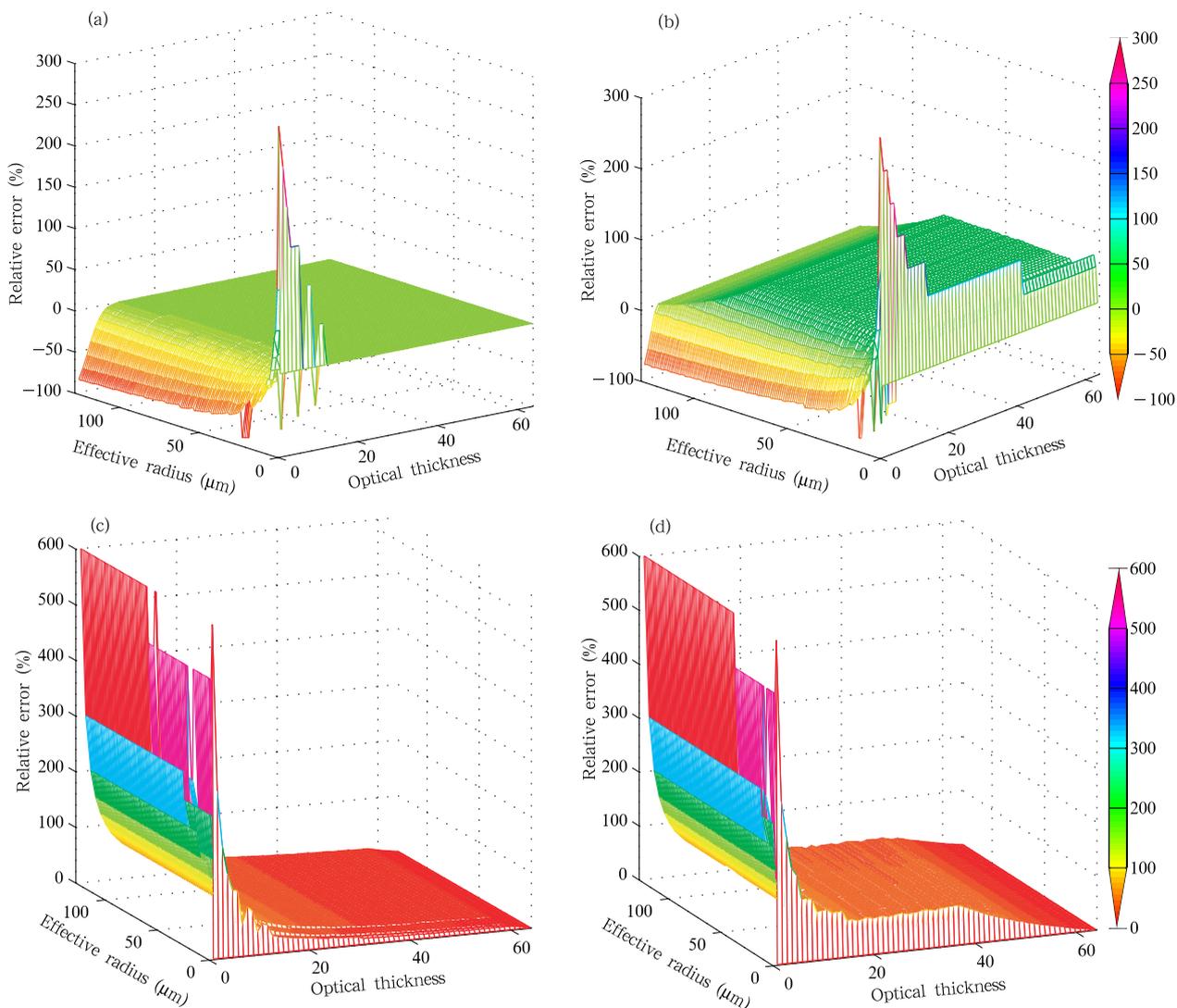


图 3 低层水云“污染”上层冰云时反演冰云 r_e 和 τ 的相对误差 (a) 用冰云查找表反演 r_e 的相对误差 (b) 用水云查找表反演 r_e 的相对误差 (c) 用冰云查找表反演 τ 的相对误差 (d) 用水云查找表反演 τ 的相对误差

Fig. 3 The relative errors of r_e and τ of ice cloud polluted by lower water cloud (a) The relative errors of r_e retrieved by ice cloud databases, (b) the relative errors of r_e retrieved by water cloud databases, (c) the relative errors of τ retrieved by ice cloud databases, and (d) the relative errors of τ retrieved by water cloud databases

图 4a 和 4b 显示了利用水云查找表和冰云查找表反演 r_e 的结果。可以看出, 真实 r_e 较小时, 利用冰云查找表反演 r_e 误差要小, 但是随着 r_e 增大, 利用水云查找表反演的误差较小, 同时整体上两者反

演的值均偏小。图 4c 和 4d 显示利用水云查找表和冰云查找表反演 τ 的结果。去除当 τ 值很小的情况, 与真实 τ 相比, 利用水云查找表反演的 τ 要偏大, 而用冰云查找表反演的 τ 要偏小。

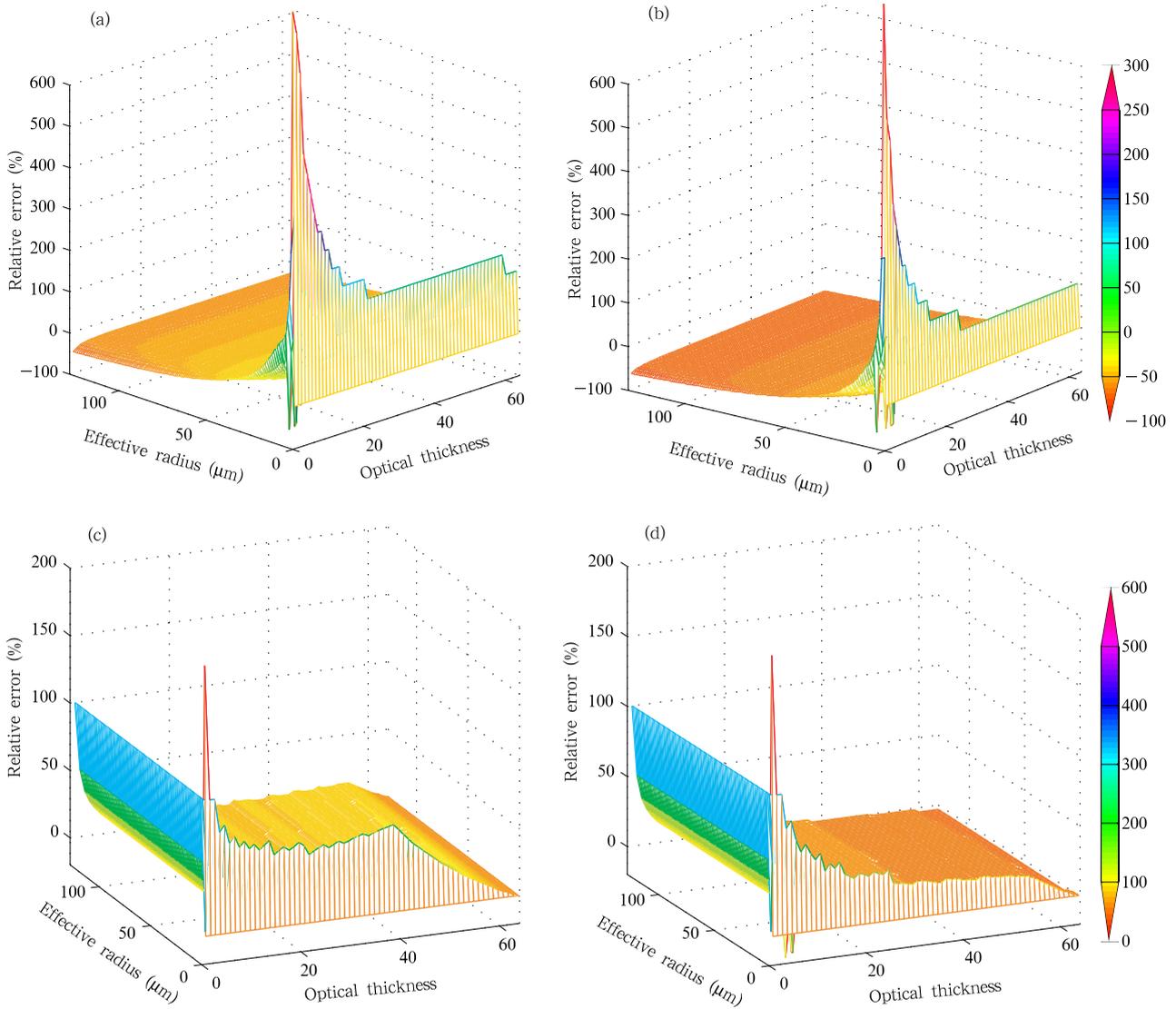


图4 水云上层有 τ 为1、 r_e 为 $32 \mu\text{m}$ 的冰云存在时反演水云 r_e 和 τ 的相对误差(a)用水云查找表反演 r_e 的相对误差(b)用冰云查找表反演 r_e 的相对误差(c)用水云查找表反演 τ 的相对误差(d)用冰云查找表反演 τ 的相对误差
 Fig. 4 The relative errors of r_e and τ of water cloud polluted by the ice cloud with $\tau=1$, $r_e=32 \mu\text{m}$ (a) The relative errors of r_e retrieved by water cloud databases, (b) the relative errors of r_e retrieved by ice cloud databases, (c) the relative errors of τ retrieved by water cloud databases, and (d) the relative errors of τ retrieved by ice cloud databases

为了反映整体偏差程度,我们还计算了两种情形下反演的相对误差平均值(表1)。从表1中可以看出,第1种情形下利用冰云查找表反演的光学厚度和有效粒子半径值精度更高,第2种情形下利用冰云查找表反演光学厚度整体相对误差较小,但反演的有效粒子半径精度比用水云查找表反演的精度低。综合以上分析我们可以得出结论,在进行云微物理参数反演时,将多层云作为单层云处理时会给反演结果带来较大误差。

表1 相对误差平均值
 Table 1 The average of relative errors

	情形1		情形2	
	冰云查找表反演	水云查找表反演	冰云查找表反演	水云查找表反演
光学厚度	5%	9%	1%	4%
有效粒子半径	3%	21%	28%	12%

5 多层云光学厚度和有效粒子半径反演

根据模拟的结论,本文尝试在云光学厚度和有

效粒子半径反演中考虑多层云的因素,设计了一套利用 MODIS 资料进行多层云光学厚度和有效粒子半径反演的方案,特别研究了薄的冰云覆盖在低层水云上的多层云情形。考虑到 NASA 发布的 MOD06 产品中云光学厚度和有效粒子半径是用 MODIS 通道 1(0.65 μm)和通道 7(2.13 μm)同时反演得到的,为了对比的需要,本文也采用 MODIS 通道 1 和 7 同时反演云光学厚度和有效粒子半径。多层云光学厚度和有效粒子半径反演的方案按下面步骤进行。

5.1 多层云检测

为了检测薄的冰云覆盖于低层水云上的多层云,本文的多层云检测算法参考了 Baum 等(2004)提出的检测算法,分 4 步进行:

第 1 步,对 MODIS 图像进行云检测。文中采用美国威斯康星-麦迪逊大学开发的 MODIS/AIRS 处理软件包 IMAPP (International MODIS/AIRS Preprocessing Package) 中的云检测算法,它也是 NASA 业务云检测所使用的算法。检测的结果用 4 级可信度表示:明确的晴空、大概的晴空、可能的云 and 明确的云。为方便得到多层云检测的辅助数据,本文按以下方式处理云检测结果:仅将被产品标注为明确的云的像素认为是有云的像素,而其他 3 种可信度的像素均认为是晴空。由此将 MODIS 图像分为晴空和有云区域。

第 2 步,在云检测的基础上,选取 200×200 像素点的检测框,利用 8.5、11 和 12 μm (MODIS 通道 29、31、32) 对有云区域进行云相态判识(刘玉洁等,2001),将检测框中有云区域分为单层水云和单层冰云。

第 3 步,由单层水云、单层冰云和晴空在 2.1 μm 通道反射率与 11 μm 通道亮温的散点图上的分布情况,推断出多层云在相应通道上的反射率和亮温范围,获取检测框中可能的多层云像素。

第 4 步,移动 200×200 的检测框,将以上 2、3 步重新运行一次,通过控制检测框移动步长,将该方案应用于整个 MODIS 图像,对除了图像边缘部分的其他像素点进行多次检测,统计每个像素包含多层云的可能性,最终确定整幅图像上的单层水云、单层冰云和多层云区域。

5.2 多层云辐射查找表的建立

辐射查找表是利用双通道同时反演云光学厚度和有效粒子半径最重要的辅助数据集。对于多层云

辐射查找表,由于文中使用的 Baum 等(2004)的多层云检测算法是针对薄的冰云覆盖于低层水云上的多层云情形,本文利用 SBDART 模式计算了此种多层云的辐射查找表。模拟计算中多层云的低层水云选取光学厚度(0.55 μm)的变化范围是 0—64,间隔为 1;选取的有效粒子半径范围为 2—128 μm ,间隔为 1 μm 。多层云的上层冰云按照 SBDART 的使用说明要将有效粒子半径的取值范围改为 -128—-2,光学厚度(0.55 μm)的变化范围仍设置为 0—64。模式的太阳天顶角选取计算的角度为:0°、10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°;卫星天顶角选取 0°、10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°;卫星观测方位角与太阳方位角之差:0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°、105°、120°、135°、150°、165°、180°。同时加入 MODIS 各通道的光谱响应函数,并计算了沙地、植被、水面、雪地 4 种地表的情况,使用相应的地表类型反照率作为模式输入参数。由此建立一个针对多层云的不同参数值与 MODIS 通道 1 和 7 接收到的辐射之间的查找表。

要说明的是,为了研究的需要本文还建立了单层水云和单层冰云的辐射查找表。与多层云查找表建立的不同在于模拟计算时没有特别设置云层高度,而取为默认值,其他设置分别与低层水云和上层冰云的计算相同。

5.3 辐射查找表的应用

多层云检测部分已经得到 MODIS 图像中的多层云、单层水云和单层冰云区域,要反演这些区域上的云光学厚度和有效粒子半径,首先要做的是找到合适的辐射查找表。本文采用了如下方法:在这些区域上,将 MODIS 的观测几何条件(如太阳天顶角、卫星天顶角等)和下垫面类型数据与查找表的相应参数进行匹配,从而找到相对应的查找表。接着要在相对应的查找表中搜索最终的光学厚度和有效粒子半径值。本文根据 MODIS 通道 1 和 7 反射率在相应的查找表中利用最小方差拟合法按下式求取最优解:

$$\chi^2 = [\ln R_{\text{meas}}^{\text{VIS1}}(\theta_0, \theta, \phi) - \ln R_{\text{calc}}^{\text{VIS1}}(r_e, \tau_c; \theta_0, \theta, \phi)]^2 + [\ln R_{\text{meas}}^{\text{NIR7}}(\theta_0, \theta, \phi) - \ln R_{\text{calc}}^{\text{NIR7}}(r_e, \tau_c; \theta_0, \theta, \phi)]^2 \quad (1)$$

式(1)中上标 VIS1、NIR7 分别表示 MODIS 可见光通道 1 和近红外通道 7,下标 calc、meas 分别表示查找表中的计算值和卫星实际观测值, θ_0 、 θ 和 ϕ 分别为太阳天顶角、卫星天顶角和卫星与太阳方位角之

差。通过获取最小方差 χ^2 , 将对应的 r_e 和 τ_e 作为反演的光学厚度和有效粒子半径值。需要注意的是, 对于 MODIS 图像上多云的象素点, 查找得到的光学厚度和有效粒子半径包括了上层冰云的值和低层水云的值, 为了方便结果分析, 文章将这点的的光学厚度值取为两层云的光学厚度之和, 有效粒子半径则取两层云的最大值。对于单层水云和单层冰云则没有以上的问题。

在实际计算中发现, 由于使用按表查找最小方差的方法找某一反射率组合下的最优光学厚度和有效粒子半径, 在对查找表进行查找时可能会出现“假点”的问题。“假点”主要有两种情况: 一是出现了两个极值点, 当两个极值点的值一样时, 将不能断定哪个才是真正的解, 就算两个极值大小不一样, 如在查找时使用了最速下降法则也很可能陷入局部极值点而不能找到真正的最小值点。对海上层云来说, Nakajima 等(1991)认为选取 r_e 较大的极值点作为真解比较符合实际。另一种情况是由于查找表的范围太小, “真值点”不在查找表的范围内, 而把某一边界点作为要求的解。要解决这两个问题首先要设计好查找表算法, 做到快速而准确, 减小“局部极小值”的影响。在本文中, 当出现双极值点的时候, 选取两个极值点中的最小 χ^2 点作为真解, 如两个极值点的值一样, 则选取 r_e 较大的极值点作为真解, 这种取值方法有待进一步验证。对第 2 种情况, 要尽可能模拟计算出光学厚度和有效粒子半径的变化范围都足够大的查找表, 使得要求的真解都落在查找表范围内。

5.4 结果分析

选取 2006 年 7 月 12 日 Terra 星 01 时 45 分(世界时)数据进行云的光学厚度和有效粒子半径反演试验。该数据通道 1(0.65 μm) 图像(图 5)显示了强热带风暴“碧利斯”位于台湾岛附近洋面的云图。从图中可看出, “碧利斯”的结构不对称, 南边云系特别多, 晴空区域很少。相对来说, 北边云系在副热带高压作用下, 云系少, 云系颜色的深浅说明其存在多层云系, 特别是位于台湾岛东边的云系中多层云表现得非常明显。

使用 NASA 提供的 IMAPP 软件包中的云检测程序对试验数据进行处理, 得到的云检测产品经等经纬度投影后显示如图 6。我们可以看出云检测结果是以可信度水平来表示的, 最终的检测可信度分为 4 个等级: 高可信度晴空、可能晴空、可能云和高

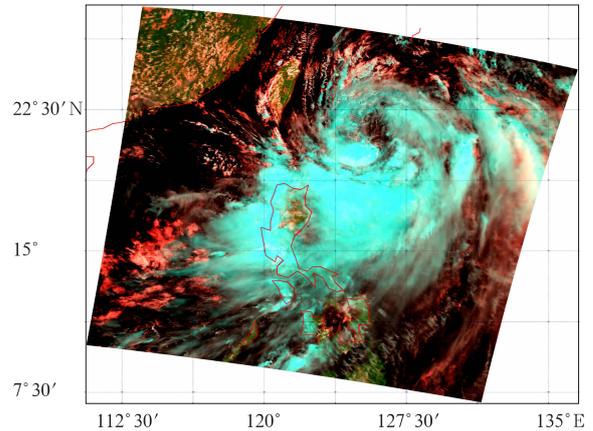


图 5 2006 年 7 月 12 日 Terra 星 01 时 45 分(世界时)MODIS 数据通道 1

Fig. 5 The image of MODIS channel 1 on Satellite TERRA at 01:45 UTC 12 July 2006

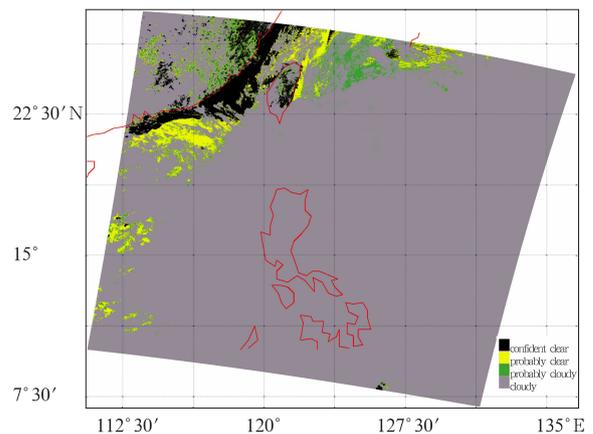


图 6 IMAPP 得到的云检测结果

Fig. 6 Cloud mask result from IMAPP

可信度云。由于云检测的结果要作为本文下面产品的辅助数据, 因此为了处理的方便, 本文对云检测结果按 5.1 节中所描述的方式进行处理, 处理结果分为晴空和云(图 7)。

在云检测的基础上进行云相态和多层云检测, 分为: 晴空、水云、冰云和多层云(图 8)。对比可见光云图 5, 我们可以发现图 8 中显示的多层云像元分布与热带风暴中心外围多层云系分布较为一致, 这说明算法能较好识别热带风暴云系边缘区域的多层云系。

NASA 发布的 MOD06 产品中包含了云光学厚度和有效粒子半径结果, 为验证本文反演的云光学厚度和有效粒子半径, 我们将两者进行对比(图 9)。

从图 9 中我们可以看出本文反演的云光学厚度

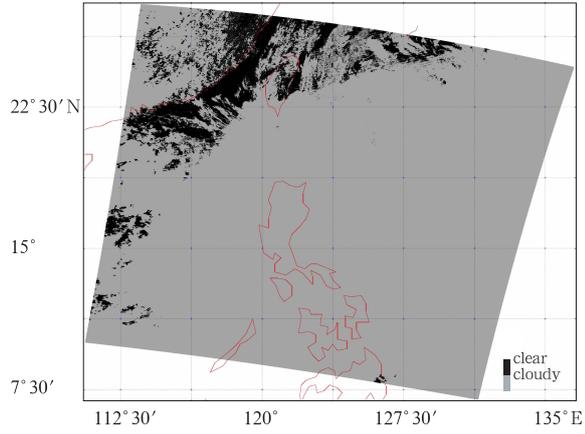


图 7 经过处理后的云检测结果

Fig. 7 Cloud mask result applied in this paper

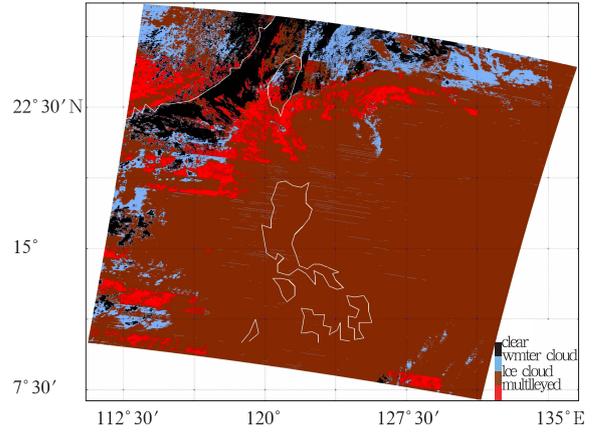


图 8 云相态识别和多层云检测结果

Fig. 8 The image of cloud phase identification and multilayer cloud mask

和有效粒子半径与 MOD06 产品的结果在大部分区域比较吻合;在某些区域(如图 9a 和 9b 的右上角,图 9c 和 9d 的右下角)结果存在差异,通过对比图 6

和图 7 的云检测图,我们认为这些差异产生的主要来源是云检测结果差异:图 6 MOD06 产品显示这

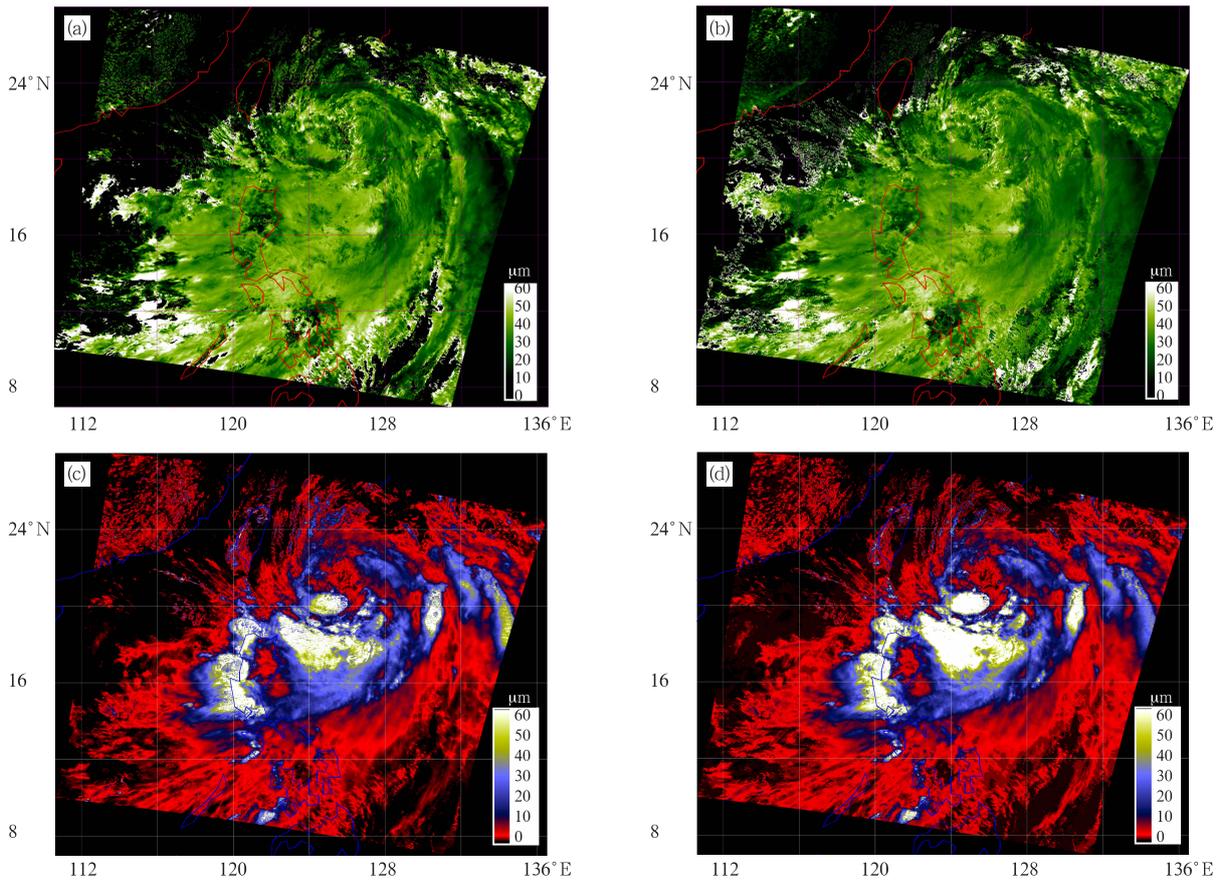


图 9 MOD06 产品中的云光学厚度和有效粒子半径产品与本文反演结果的对比

(a. MOD06 产品中的云有效粒子半径产品, b. 本文反演的云有效粒子半径结果, c. MOD06 产品中的云光学厚度产品, d. 本文反演的云光学厚度结果)

Fig. 9 The comparison of cloud optical thickness and effective particle radius between MOD06 and the retrieved product

(a. The cloud effective particle radius from MOD06, b. The cloud effective particle radius retrieved in this paper, c. the cloud optical thickness product from MOD06, and d. the cloud optical thickness retrieved in this paper)

些区域是晴空,而本文利用 NASA 发布的 IMAPP 得到的云检测结果(图 7)显示这些区域是有云区域,由此两者云光学厚度和有效粒子半径结果当然会存在较大差异。综合考虑对比效果,本文所得到的结果是较合理的。

6 结论与讨论

目前国内对云光学厚度和有效粒子半径反演的研究主要是针对水云而言,但是按照 NASA 发布的 MODIS 基础算法文档 ATBD 报告的描述,反演还要考虑冰云。本文以 ATBD 报告为基础,采用 IMAPP 软件包进行云检测,利用红外三光谱技术识别云相态,将云相态和云检测结果作为云光学厚度和有效粒子半径反演必须的输入数据,反演中考虑了冰云。

另外,目前业务卫星反演云参数的算法一般是在假设单一视场中只有一层云的情况下进行的,本文研究了冰云覆盖在低层水云的多层云对云微物理参数反演的影响,利用 SBDART 辐射传输模式模拟了将多层云作为单层云处理时云微物理参数反演结果。通过误差分析,发现多层云会给反演结果带来较大误差。为此,引入了 Baum 等(2004)提出的多层云检测算法,尝试在实际的云光学厚度和有效粒子半径反演中考虑多层云因素,在使用辐射传输模式模拟各种不同条件下各通道的辐射查找表时,不仅计算了水云、冰云辐射查找表,还计算了多层云辐射查找表。与 NASA 发布的云光学厚度和有效粒子半径结果对比表明本文所使用的整套反演方案具有合理性。

值得注意的是,根据 ATBD 报告的说明(刘玉洁等,2001),它所描述的云光学厚度和有效粒子半径算法,严格来说适用于平行大气中的液态水云。冰云的光学厚度和有效粒子半径的反演应该如同水云,但在反演中有两个复杂的问题:形状和方向性。由于目前对冰云认识的局限性,这两方面对反演结果的敏感性影响我们仍知之甚少,可以在以后相关的后续工作中进一步研究。

同时,NASA 发布的云微物理参数产品并没有考虑多层云的情况,本文无法找到参照数据对多层云的存在对云参数的反演精度进行实际检验,希望能在后续的研究中利用飞机实测数据或者 Cloud-Sat 产品进行检验。

References

Baum B A, Nasiri S L. 2004. Daytime multilayered cloud detection using multispectral imager data. *Geosci Remote Sens*, 21: 1145-1156

Deng Jun, Bai Jie, Liu Jianwen. 2006. Remoting sensing cloud's optical thickness and effective radius using MODIS multispectral

data. *Remote Sensing Techn Appl(in Chinese)*, 21(3): 220-226

Dong X, Minnis P, Mace G G, et al. 2002. Comparison of stratus cloud properties deduced from surface, GOES, and aircraft data during the March 2000 ARM cloud IOP. *J Atmos Sci*, 59: 3265-3284

King M D. 1987. Determination of the scaled optical thickness of clouds from reflected solar radiation measurements. *J Atmos Sci*, 44: 1734-1751

Liu Jian, Xu Jianmin, Fang Zongyi. 1999. Analysis of the particle sizes at top of cloud and fog with NOAA/AVHRR data. *Quart J Appl Meteor (in Chinese)*, 10(1): 28-33

Liu Jian, Dong Chaohuang, Zhang Wenjian. 2003. Determination of the optical thickness and effective radius of water clouds by FY-1C data. *J Infrared Millimeter Waves (in Chinese)*, 22(6): 436-440

Liu Yujie, Yang Zhongdong. 2001. *The Principle and Algorithm for Processing the Remote Sensing Information from MODIS (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 74-109

Nakajima T, King M D. 1990. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *J Atmos Sci*, 47: 1878-1893

Nakajima T, King M D, Spinhirne J D. 1991. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part II: Marine stratocumulus observations. *J Atmos Sci*, 47: 728-749

Paul Ricchiazzi. 1998. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bull Amer Meteor Soc*, 79: 2101-2114

Platnick S, Valero S F P J. 1995. A validation study of a satellite cloud retrieval during ASTEX. *J Atmos Sci*, 52: 2985-3001

Twomey S, Cocks T. 1989. Remote sensing of cloud parameters from spectral reflectance in the near-infrared. *Beitr Phys Atmos*, 62: 172-179

Wang Xinwei, Bai Jie, Liu Jianwen. 2003. SBDART radiative transfer model and its application in retrieval of potential aircraft icing area. *Meteor Sci Techn (in Chinese)*, 31(3): 152-155

Xiong, Lubin X D, Li W, et al. 2002. A critical examination of satellite cloud retrievals from AVHRR in the Arctic using SHEBA data. *J Appl Meteor*, 41: 1195-1209

Zhao Fengsheng, Ding Qiang, Kong Tongming, et al. 2002. An iterative algorithm for the retrieval of cloud properties from NOAA-AVHRR imagery. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 60(5): 594-601

附中文参考文献

邓军,白洁,刘建文. 2006. 基于 EOS/MODIS 的云雾光学厚度和有效粒子半径反演研究. *遥感技术与应用*, 21(3): 220-226

刘健,许健民,方宗义. 1999. 利用 NOAA 卫星的 AVHRR 资料试分析云和雾顶部粒子的尺度特征. *应用气象学报*, 10(1): 28-33

刘健,董超华,张文建. 2003. 利用 FY-1C 资料反演水云的光学厚度和粒子有效半径. *红外与毫米波学报*, 22(6): 436-440

刘玉洁,杨忠东. 2001. *MODIS 遥感信息处理原理与算法*. 北京:科学出版社, 74-109

王新炜,白洁,刘健文等. 2003. SBDART 辐射传输模式及其在飞机潜在积冰区反演中的应用. *气象科技*, 31(3): 152-155

赵凤生,丁强,孔同明等. 2002. 利用 NOAA-AVHRR 观测数据反演云辐射特性的一种迭代方法. *气象学报*, 60(5): 594-601