

周青, 赵凤生, 高文华. 2010. 利用 FY-2C 卫星数据反演云辐射特性 [J]. 大气科学, 34 (4): 827-842. Zhou Qing, Zhao Fengsheng, Gao Wenhua. 2010. Retrieval of cloud radiative properties from FY-2C satellite data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 827-842.

利用 FY-2C 卫星数据反演云辐射特性

周青¹ 赵凤生² 高文华²

1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

2 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 本文利用 FY-2C 静止卫星提供的可见光、中红外和热红外观测数据, 开展了水云光学厚度、粒子有效半径和云顶温度的云参数遥感探测理论和反演方法研究。基于 FY-2C 可见光、中红外 (3.75 μm) 与热红外 (11 μm) 通道辐射率对云光学厚度、云滴有效半径、云顶温度辐射参数的敏感性分析, 提出三通道同时反演云的光学厚度、云滴有效半径及云顶温度的迭代方案; 通过个例分析进行了云参数反演试验, 并将结果与 MODIS 的云反演产品进行了对比, 最后对反演误差进行了分析。主要结论如下: (1) 个例反演得到的云参数与各通道探测数据有着较好的对应关系, 迭代计算标准偏差在允许的计算精度范围内 ($<0.89\%$), 反演结果具有合理性; (2) 通过与 MODIS 云反演产品的对比可以看到, 两者云光学厚度、云滴有效半径的均值和直方图分布都非常一致, 而 MODIS 的云顶温度比 FY-2C 反演值要高, 考虑到 FY-2C 的 11 μm 通道测量的辐射值与 MODIS 相比偏小, 因此认为我们的反演方法与 MODIS 方法的精度是相当的。

关键词 云光学厚度 云滴有效半径 云顶温度 三通道迭代反演

文章编号 1006-9895 (2010) 04-0827-16

中图分类号 P405

文献标识码 A

Retrieval of Cloud Radiative Properties from FY-2C Satellite Data

ZHOU Qing¹, ZHAO Fengsheng², and GAO Wenhua²

1 *Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081*

2 *National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract This paper describes the theories of remote sensing and algorithms for retrieving cloud radiative properties such as cloud optical thickness, cloud particle effective radius, and cloud top temperature, using multispectral images such as visible, middle-infrared, and far infrared channel reflectance, and brightness temperature from the Visible and Infrared Spin Scan Radiometer (VISSR) sensor of FY-2C satellite. Based on the sensitivity analysis between FY-2C visible, middle-infrared, far infrared channel radiance, and radiative parameters such as cloud optical thickness, cloud particle effective radius, cloud top temperature, surface albedo, and surface temperature by radiative transfer calculations, an iterative algorithm for retrieval of cloud optical thickness, cloud particle effective radius; and cloud top temperature simultaneously by three channels of FY-2C sensor is developed and applied to experimental study. The retrieval results are compared with MODIS cloud products. Finally, the retrieval errors are analyzed. Conclusions are as follows: 1) There is a good correspondence between observed data of FY-2C channels and retrieved cloud parameters, standard deviation (SD) of iterative algorithm is reasonable (0.89%); 2) A comparison with MODIS cloud products shows a good coherence of cloud optical thickness and cloud particle effective radius

收稿日期 2009-08-26, 2010-02-23 收修定稿

资助项目 国家高技术研究发展计划项目 2009AA12Z150, 国家重点基础研究发展计划项目 2004CB418305

作者简介 周青, 女, 1984 年出生, 硕士, 助理工程师, 主要从事卫星遥感大气参数以及综合气象观测系统运行监控方面的研究。

E-mail: tomzq@qq.com, asilanming@yahoo.com.cn

between FY-2C and MODIS, while the cloud top temperature of FY-2C retrieval results is lower than that of MODIS. In view of lower-valued $11\mu\text{m}$ channel radiance from FY-2C, the precision of this algorithm is equivalent to that of MODIS.

Key words cloud optical thickness, particle effective radius, cloud top temperature, iterative retrieval by three channels

1 引言

云对地气系统能量收支平衡具有强烈的调节作用,云通过辐射强迫、潜热强迫和对流强迫三个机制影响地球大气运动状态和地球气候。云和辐射的相互作用不仅严重地影响着长期气候变化,而且也影响着各种尺度天气过程。大气环流模式(GCM)是进行气候研究的有力工具, Cess et al. (1989, 1990) 对不同 GCM 进行了比较,指出采用现有的环流模式模拟温室气体的气候效应,其结果存在着很大的不确定性,而产生这种不确定性的主要原因之一是人们对云辐射特性及其如何随气候变化而变化缺乏足够的了解;现今还没有一种大气环流模式能准确给出云量以及云的微物理特性(云粒子大小等)对气候系统的综合影响。因此,在 GCM 中建立可靠的云和云辐射参数化已是迫切需要解决的问题。云的光学厚度和云滴有效半径是决定云辐射特性的两个重要参数。近年来,国内外利用机载可见光和近红外探测器反演云光学厚度和有效粒子半径的研究工作已有很多(Hansen and Pollack, 1970; King, 1987; Foot, 1988; Twomey and Cocks, 1989; Rawlins and Foot, 1990; Nakajima and King, 1990; Spinhirne and Hart, 1990; Nakajima et al., 1991)。然而,实地观测的时空代表性较差,要获取全球范围内的云参数及其时空变化信息,对卫星观测资料的利用是必不可少的。近年来,利用卫星观测资料反演云光学厚度和云滴有效半径的研究日益受到人们的重视,国内外已开展了不少相关工作,研究利用卫星遥感资料反演云光学厚度和粒子有效半径(Curran and Wu, 1982; Rossow et al., 1985, 1989; King et al., 1997; Minnis et al., 1998; Baum et al., 2000a, 2000b; Baum and Spinhirne, 2000),并研究利用 $0.64\mu\text{m}$ 、 $0.84\mu\text{m}$ 、 $1.6\mu\text{m}$ 、 $3.7\mu\text{m}$ 等通道来研究这两个参数的反演方法,并取得了一些应用成果(Arking and Childs, 1985; Durkee, 1989; Zhao and Nakajima, 1992; Platnick

and Twomey, 1994; Han et al., 1994, 1995; Nakajima and Nakajima, 1995; Platnick and Valero, 1995)。卫星遥感云的光学厚度和云滴有效半径的基本原理是在可见光波段(如 $0.6\mu\text{m}$),云的反射函数主要依赖于云的光学厚度;在近红外或中红外波段(如 $1.6\mu\text{m}$ 、 $2.1\mu\text{m}$ 、 $3.7\mu\text{m}$),云的反射函数主要依赖于云滴有效半径。

自从 20 世纪 80 年代以来,我国利用飞机、雷达,特别是气象卫星遥感资料在云辐射特性反演方面做了大量工作,有众多研究成果(Zhao and Nakajima, 1992; 赵凤生等, 2002; 刘健和董超华, 2002; 刘健等, 2003; 陈英英等, 2007; 官莉等, 2007; 邱金桓等, 2008)。Zhao and Nakajima (1992) 利用 LOWTRAN-7 中计算分子吸收的 K-分布方法改进了散射大气辐射传输方程,在此基础上提出一种在晴空下利用 AVHRR 可见光通道辐射值和 NDVI 值同时反演气溶胶光学厚度和 Junge 指数,以及在有云时利用 AVHRR 可见光、近红外和中红外通道辐射值同时反演云的光学厚度、有效半径和几何标准差(假定云谱分布为 log-normal 型)的迭代方法,并将其应用于分析中国东海上空气溶胶和云的辐射特性,取得了较为合理的初步结果;刘健等(2003)利用 FY-1C 极轨气象卫星扫描辐射计的通道 1 ($0.58\sim 0.68\mu\text{m}$)、通道 3 ($3.55\sim 3.95\mu\text{m}$) 和通道 6 ($1.58\sim 1.64\mu\text{m}$) 所提供的探测数据,进行了水云光学厚度和粒子有效半径的反演试验。陈英英等(2007)基于 SBDART 辐射传输模式,利用 FY-2C 通道 4 ($3.5\sim 4.0\mu\text{m}$) 的探测数据反演了云粒子有效半径,并与 TERRA 上 MODIS 的相应产品作了比较,但由于光学厚度影响着中红外通道对粒子有效半径的敏感性,因此只单独反演粒子有效半径的计算精度是有待提高的。

综上所述,人们已开展不少利用极轨卫星观测资料反演云的光学厚度和云滴有效半径的相关工作,但利用静止卫星反演这两个参数的相关工作还未见报道。FY-2C 是我国第一代业务静止气象卫

星, 星上搭载的扫描辐射计具有可见光、中红外和热红外探测通道。由于 FY-2C 可以提供每隔半小时一次的观测数据, 具有比极轨卫星时间分辨率高的优势, 能够对云的生成、发展和消亡的全过程作更好的监测, 因此, 利用 FY-2C 观测数据反演云辐射特性将是很有意义的一项工作。本文提出并建立了利用 FY-2C 静止卫星三通道遥感信息同时反演水云光学厚度、粒子有效半径和云顶温度的迭代方法, 并进行了反演试验。

2 辐射传输模式简介

本文所依据的模式是赵凤生等 (2002) 将 LOWTRAN-7 中计算分子吸收的 K-分布方法和用于计算散射大气辐射传输的离散纵标法结合起来, 建立的散射、分子吸收和热辐射过程同时存在条件下的一套辐射传输计算程序。计算中各通道的波长积分采用梯形积分公式。将每个通道按波长等分为 10 个间隔, 每个分点上的辐射强度为:

$$I(\mu, \Phi) = \sum_{i=1}^3 f(k_i) I_i(\mu, \Phi), \quad (1)$$

式中, $f(k_i)$ 为取自 LOWTRAN-7 中计算分子吸收的 K-分布函数, μ 是观测天顶角的余弦, Φ 是方位角, $I_i(\mu, \Phi)$ 是与吸收系数 k_i 对应的辐射强度, 可以通过求解如下辐射传输方程得到:

$$\begin{aligned} \frac{dI_i(\mu, \Phi)}{d\tau_k} = & -I_i(\mu, \Phi) + \frac{\omega_k}{4\pi} \int_{\Omega} P(\mu, \Phi, \mu', \Phi') \cdot \\ & I_i(\mu', \Phi') d\Omega + \frac{\overline{\omega_k}}{4\pi} P(\mu, \Phi, \mu_0, \Phi_0) \cdot \\ & \pi F e^{-\tau_k/\mu_0} + (1 - \overline{\omega_k}) B(\tau_k), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, μ_0 和 Φ_0 是太阳天顶角的余弦和方位角, $B(\tau_k)$ 是普朗克函数 (为书写方便, 省去了 k_i 的下标 i), πF 是太阳入射在大气层顶的辐射强度, τ_k 是大气光学厚度, $\overline{\omega_k}$ 是单次散射反照率, $P(\mu, \Phi, \mu', \Phi')$ 为散射相函数, 由云散射相函数、气溶胶散射相函数和分子散射相函数加权平均得到。求解方程 (2) 的方法为离散纵标法, 模式中的云滴谱为单模分布, 云滴有效半径与模式半径和几何标准偏差的关系为:

$$r_c = r_0 \exp\left(\frac{5}{2} \ln^2 \sigma\right). \quad (3)$$

式中, r_c 是有效半径, r_0 是模式半径, $\sigma (=1.48)$ 是几何标准偏差。

3 反演原理与方法

3.1 敏感性分析

3.1.1 可见光通道辐射率的敏感性分析

为了进一步研究辐射观测值与云光学厚度和粒子有效半径的关系, 我们利用辐射传输模式计算在不同光学厚度 (τ_c) 和粒子有效半径 (r_c) 条件下, 水云 FY-2C 可见光通道 ($0.55 \sim 0.90 \mu\text{m}$) 的辐射率, 地表温度和地表气温分别取 283 K、275 K, 云顶温度取 263.824 K, 太阳天顶角 56° , 卫星天顶角 32° , 相对方位角取 176° , 地表反照率取 0.24, 计算中大气分为 17 层, 大气微量气体浓度、温度递减率和相对湿度廓线 (云层内部除外) 与美国标准大气相同。计算结果如图 1a 所示。由图 1a 可以清楚地看到, FY-2C 可见光通道辐射率与云粒子有效半径的关系不明显, 当 $r_c < 10 \mu\text{m}$ 时, 可见光通道辐射率随 r_c 的增大缓慢减小; 当 $r_c > 10 \mu\text{m}$ 后, 可见光通道辐射率对 r_c 的变化不敏感。另一方面, 可见光通道辐射率对光学厚度 τ_c 的变化比较敏感, 随着光学厚度的增加辐射率显著增大。

3.1.2 中红外、热红外通道辐射率的敏感性分析

利用辐射传输模式计算在不同光学厚度 (τ_c) 和粒子有效半径 (r_c) 条件下, 水云 FY-2C 中红外通道 ($3.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$) 的辐射率, 计算结果如图 1b 所示。

当光学厚度 τ_c 较小时 (约 < 6), 中红外通道 ($3.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$) 辐射率随 τ_c 的增加变化相对明显, 但远不及可见光通道辐射率对 τ_c 变化的灵敏度; 当光学厚度达到一定的值时 (大约 $\tau_c > 6$), 中红外通道辐射率对光学厚度 τ_c 的变化就不太敏感了。但该通道辐射率随云粒子有效半径的变化很明显, 云粒子有效半径越大, 中红外通道辐射率值越小, 这是因为云滴对 $3.75 \mu\text{m}$ 辐射具有较大的吸收系数且云滴吸收系数随 r_c 的增大而增大, 该处云滴吸收系数和不对称因子都随 r_c 的增大而增大, 因此云的反射函数随 r_c 的增大而减小, 从而导致中红外通道 ($3.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$) 辐射率随 r_c 的增大而减小。

应该指出的是, $3.75 \mu\text{m}$ 通道辐射率不仅依赖于云的反射函数, 同时也依赖于热辐射。赵凤生等 (2002) 的图 2 给出了考虑和不考虑热辐射情况下 $3.75 \mu\text{m}$ 通道辐射率的对比。可以看出, 热辐射和散射辐射占总辐射的比率随 r_c 的变化而改变。当

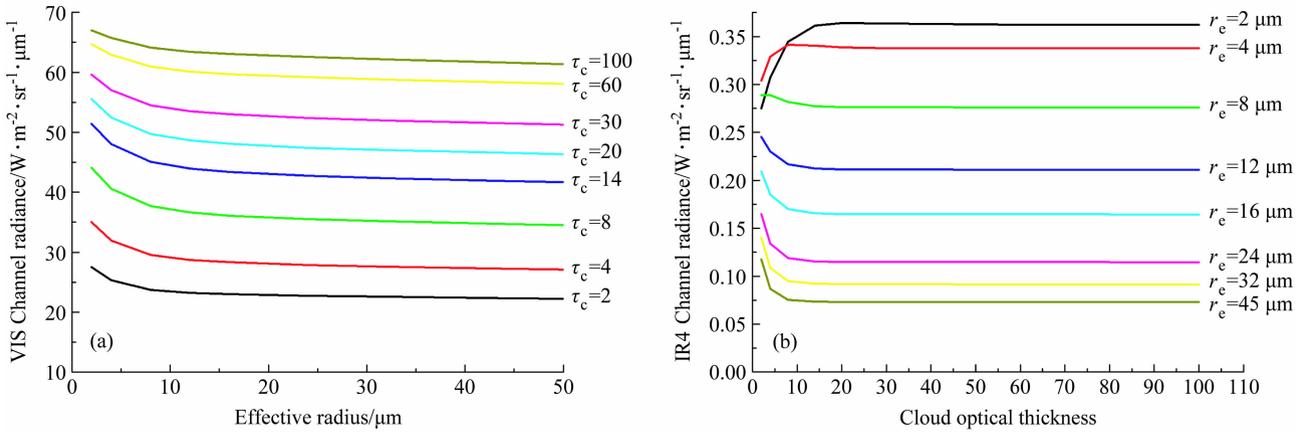


图1 FY-2C通道辐射率、光学厚度 (τ_c) 和粒子有效半径 (r_e) 间函数关系: (a) 可见光通道; (b) 中红外通道

Fig. 1 The functional relationships among channel radiance of FY-2C satellite, cloud optical thickness (τ_c), and cloud particle effective radius (r_e): (a) Visible channel; (b) middle-infrared channel

$r_e = 5 \mu m$ 时, 热辐射大约为散射辐射的 20% ~ 34%。当 $r_e = 20 \mu m$ 时, 热辐射和散射辐射的大小基本相当。考虑到热辐射的影响问题, 一般是通过红外窗区通道来做订正, FY-2C 具有 10.3 ~ 11.3 μm 的热红外通道 (大气窗口通道), 因此, 热辐射的大小可以通过比较计算和观测的 11 μm 通道的辐射率得到。

图 2 为利用辐射传输模式计算的不同光学厚度和粒子有效半径条件下热红外通道 (11 μm) 辐射率随云顶温度的变化曲线, 由图可以看出, 11 μm 通道辐射率对云顶温度的敏感性较大, 可用来反演云顶温度; 另外还可看出, 光学厚度和有效半径影响着热红外通道辐射率对云顶温度的敏感性, 当热红外通道辐射率为 $4 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 时, $\tau_c = 8, r_e = 4 \mu m$ 与 $\tau_c = 30, r_e = 24 \mu m$ 两种情况下反演的云顶温度相差约 5 K。

通过对模拟计算结果的分析, 可以清楚地看到, FY-2C 可见光通道 (0.55 ~ 0.90 μm) 辐射率与云光学厚度密切相关, 光学厚度越大, 通道辐射率越大; FY-2C 中红外通道 (3.5 ~ 4.0 μm) 辐射率与云粒子尺度间存在明显的函数关系, 粒子有效半径越大, 通道辐射率越小; FY-2C 热红外通道 (10.3 ~ 11.3 μm) 辐射率对云顶温度较敏感, 云顶温度越高, 通道辐射率越大。因此, FY-2C 可见光通道适用于反演云的光学厚度, 中红外通道可用于反演云滴有效半径, 而热红外通道则可用于反演云顶温度。另外, 中红外通道受云顶温度的影响, 热红外通道受云滴有效半径的影响。我们在下文将要

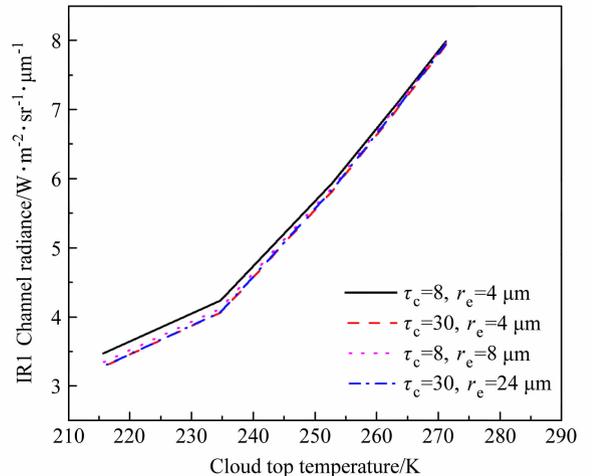


图2 热红外通道辐射率随云顶温度的变化曲线

Fig. 2 The variation of thermal infrared channel radiance with cloud top temperature

介绍的迭代方法中用热红外通道反演的云顶温度来扣除中红外通道热辐射的影响, 用中红外通道反演得到的云滴有效半径来计算热红外通道云的发射率。

基于赵凤生等 (2002) 提出的双通道同时反演云光学厚度和有效粒子半径的迭代方法, 并在以上 FY-2C 各个通道辐射率对辐射参数的敏感性分析之后, 我们提出利用 FY-2C 可见光、中红外 (3.75 μm) 和热红外 (11 μm) 三通道同时反演云光学厚度、有效粒子半径以及云顶温度的迭代方法以减小反演误差。

3.2 辐射函数数据库及反演迭代方案的建立

根据上述 FY-2C 可见光通道和 3.75 μm 通道

辐射率对云光学厚度和云滴有效半径的敏感性分析, 在利用 FY-2C 通道辐射率反演云辐射特性时要综合考虑云光学厚度、云滴有效半径、云顶温度以及地表反照率、地表温度等参数。

首先, 利用辐射传输模式计算在 FY-2C 探测仪器光谱响应函数条件下, 不同太阳天顶角 (θ_0)、卫星天顶角 (θ)、太阳—卫星相对方位角 (Φ)、云光学厚度 (τ_c)、粒子有效半径 (r_c)、下垫面反照率 (A_g)、云顶温度 (T_c)、地表气温 (T_a) 和地表温度 (T_s) 情形下像元可见光通道、3.75 μm 通道、11 μm 通道的辐射率值, 生成不同初始条件下的九维变量模拟辐射函数数据库, 在辐射模拟计算中, 取光学厚度变化范围为 2.0~100.0, 粒子有效半径为 $r_c=2.0, 4.0, 8.0, \dots, 150.0$, 地表反照率取 0.006 到 0.84, 太阳天顶角为 $\theta_0=2.0, 12.0, \dots, 80.0$, 卫星天顶角为 $\theta=0.0, 8.0, 16.0, \dots, 72.0$, 相对方位角取 0.0 到 176.0。然后, 利用最小标准偏差拟和及单纯形迭代方法, 在模拟辐射函数数据库中, 寻找与实际观测值最为相近的一组值, 作为反演结果。

图 3 为利用 FY-2C 观测数据反演云光学厚度和云顶粒子有效半径及云顶温度的算法流程图。反演步骤如下:

(1) 首先, 选取云像元。风云二号 02 批静止气象卫星的标称投影数据集 (NOM) 产品中包含云产品分类, 存放了由国家卫星气象中心采用多通道卫星探测数据进行聚类分析归纳出的云分类结果 (见表 1)。我们直接采用该云产品分类来选取云像元。

(2) 建立辐射率插值查找表。如前所述已生成辐射模拟函数数据库, 通过对该数据库进行多维数

组插值建立辐射率数据查找表, 这样就能将观测几何角度、下垫面反照率、地温及气温等相关初始量进行数据匹配处理。由于数组中包含九维变量: 太阳天顶角、卫星天顶角、方位角、光学厚度、有效半径、地表反照率、云顶温度、地表温度和地表气温, 因此针对这类多维数组插值, 我们采用降维法处理, 从九维开始, 用样条函数插值后变成八维数组, 然后再插值成七维……以此类推, 将变量一维一维地消除, 最后插值得到数据库中相应通道的辐射率计算值。

(3) 输入 FY-2C 可见光波段的反射率与 3.75 μm 和 11 μm 通道亮温的观测值、地表温度和地表气温、地表反照率以及观测几何角度数据。在 FY-2C 探测仪器光谱响应函数条件下, 根据反射函数定义, 计算可见光通道的辐亮度值 (辐射率值); 根据普朗克函数定义, 计算热红外 (11 μm) 与中红外 (3.75 μm) 通道的辐亮度值 (辐射率值):

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \{ \exp[hc/(\lambda KT)] - 1 \}} \quad (4)$$

输入参数中的地温和气温使用 NCEP/NCAR 分析资料, 地表反照率采用 MODIS 云产品数据。周青等 (2008) 曾对 NCEP/NCAR 分析资料在我国的可信度作了分析, 得出结论: NCEP/NCAR 分析地表温度较观测值普遍偏低约 2 K, 而 NCEP/NCAR 分析地表气温在空间分布上也与观测值比较一致, 冬季时与我国大范围地区实测值的误差在 0~-3 K, 夏季则在 3~-3 K, FY-2C 各通道值对于这样的地温和气温偏差基本不敏感, 因此, 在我国利用 NCEP/NCAR 分析地表温度和地面气温资料作为云辐射特性反演的辅助资料是可行的。

(4) 迭代计算。选取可见光通道、3.75 μm 通道和 11 μm 通道辐射率的观测值与数据库计算值的标准偏差作为目标函数:

$$\delta = \left[\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(1 - \frac{I_i^c(\tau_c, r_c; \theta_0, \theta, \Phi, A_g)}{I_i^m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中, I_i^c ($i=1, 2, 3$) 和 I_i^m ($i=1, 2, 3$) 分别表示可见光通道、3.75 μm 通道以及 11 μm 通道辐射率的计算和观测值。

云光学厚度 τ_c 、有效半径 r_c 以及云顶温度 t_c 通过最小化目标函数求得, 为了最小化 (5) 式定义的目标函数, 我们采用了单纯形迭代算法。输入地

表 1 FY-2C 云产品分类数据内容

Table 1 FY-2C cloud classification product contents

数据内容	中文含义	英文含义
0	晴空海面	Clear oceans
1	晴空陆地	Clear lands
11	混合像元	Mixed pixels
12	高层云或雨层云	Altostratus or nimbostratus
13	卷层云	Cirrostratus
14	密卷云	Cirrus densus
15	积雨云	Cumulonimbus
21	层积云或高积云	Stratocumulus or altocumulus

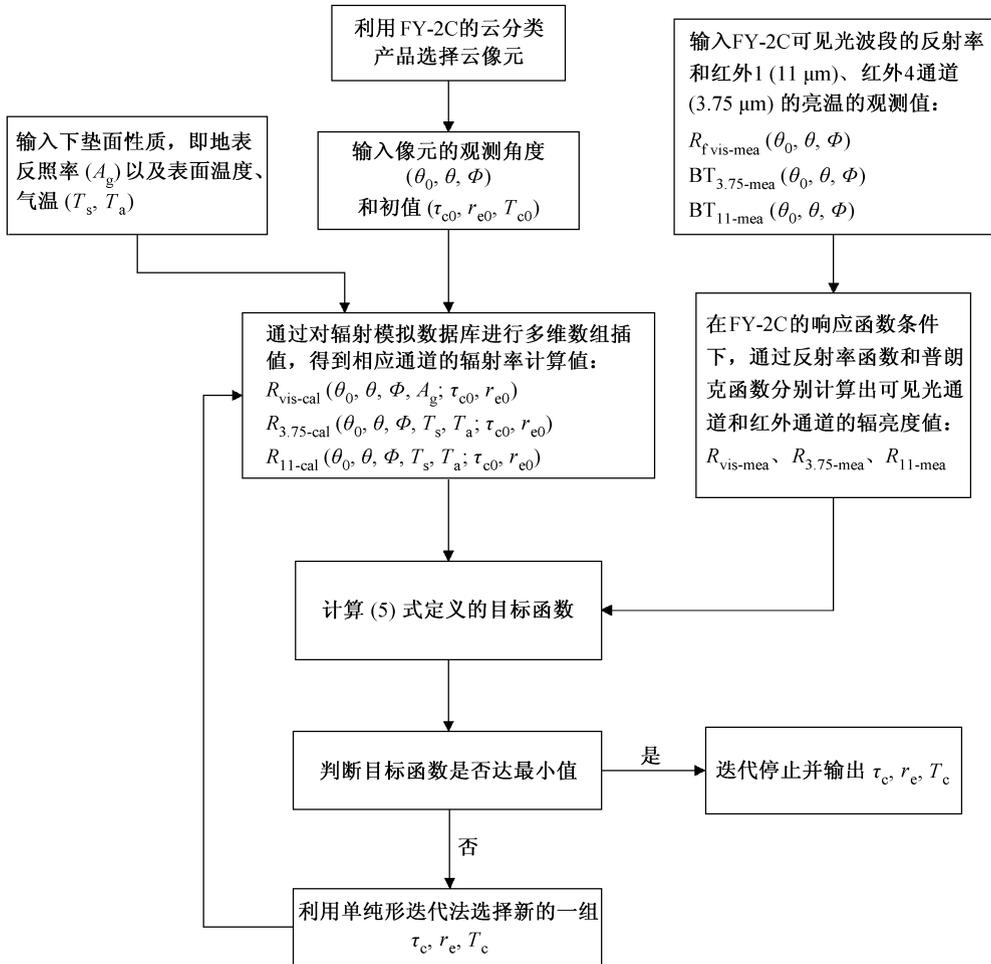


图3 反演流程示意

Fig. 3 Retrieval flow chart

表温度和地表气温、地表反照率、散射几何参数和 τ_c 、 r_e 、 t_c 的初始值 ($\tau_{c0} = 10$ 、 $r_{e0} = 10 \mu\text{m}$ 、 $t_{c0} = 270 \text{K}$), 通过辐射率插值查找表, 内插得到可见光通道、 $3.75 \mu\text{m}$ 通道以及 $11 \mu\text{m}$ 通道辐射率的计算值, 将计算值和 FY-2C 数据中的相应通道观测值代入式 (5) 计算目标函数, 判断目标函数是否达到一个给定的极小值, 如果不满足判据, 利用单纯形方法求出一组新的 τ_c 、 r_e 和 t_c 。重复上述步骤直到收敛判据得到满足。对应于目标函数最小值的 τ_c 、 r_e 和 t_c 即为利用辐射率 I_i^m ($i = 1, 2, 3$) 反演得到的云光学厚度、云滴有效半径及云顶温度。

4 初步反演试验

选取 2006 年 1 月 20 日 06:00 (协调世界时, 下同) (个例 1) 与 2005 年 11 月 17 日 06:00 (个例

2) 的 FY-2C 数据进行云光学厚度、有效粒子半径以及云顶温度的反演试验。图 4 为选取个例的 FY-2C 全圆盘标称文件 (NOM) 快视图, 星下点位置为 (0°N , 104.5°E), 数据分辨率为 5km , 即 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的精度。选取的反演区域范围分别是: ($23^\circ\text{N} \sim 29^\circ\text{N}$, $106^\circ\text{E} \sim 116^\circ\text{E}$) (个例 1); ($25^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$, $113^\circ\text{E} \sim 118^\circ\text{E}$) (个例 2)。

为方便进行比较分析, 这里选取同时同地的 MODIS 云参数反演产品。图 5 (见文后彩图) 为 2006 年 1 月 20 日 0600 UTC 和 2005 年 11 月 17 日 0600 UTC 的 AQUA-MODIS 真彩图, 从图上看, 选取反演区域的云均比较平整、均匀。

为了通过与 MODIS 云产品对比来验证我们反演方法的正确与否, 必须使 MODIS 和 FY-2C 的初始资料保持一致, 即相同参数条件下 MODIS 和

FY-2C 的通道值应相等。因此，利用上述辐射函数数据库可将 MODIS 在 FY-2C 所处参数条件下的通道观测值计算出来：

$$\frac{R_{fy}^c}{R_{mod}^c} = \frac{R_{fy}^m}{R_{mod}^m}, \quad (6)$$

其中， R_{fy}^c 和 R_{mod}^c 是数据库中 FY-2C 和 MODIS 两

种参数条件下的通道辐射值， R_{mod}^m 为 MODIS 相应通道的观测值， R_{fy}^m 为 MODIS 在 FY-2C 参数条件下的相应通道观测值。

图 6 为依据上述原理对个例 1 所作的 MODIS 与 FY-2C 两星在 FY-2C 观测条件下对应通道的反射率散点图。X 轴为 FY-2C 反射率值，Y 轴为 MO-

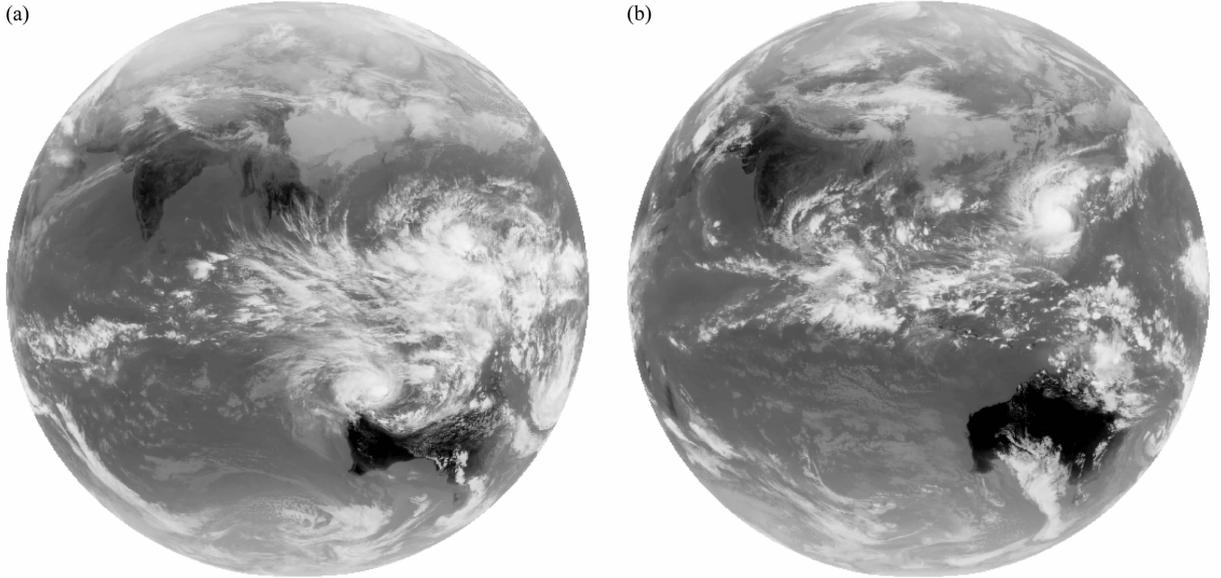


图 4 (a) 2006 年 1 月 20 日 06:00 和 (b) 2005 年 11 月 17 日 06:00 FY-2C 全圆盘标称文件 (NOM) 快视图
Fig. 4 FY-2C full-disk images in nominal projection at (a) 0600 UTC 20 Jan 2006 and (b) 0600 UTC 17 Nov 2005

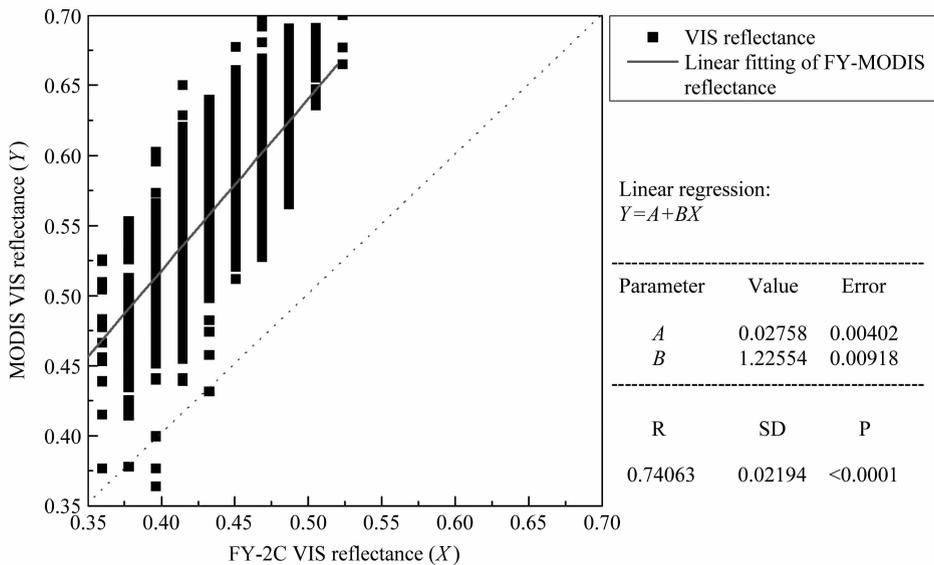


图 6 MODIS 与 FY-2C 在 FY-2C 观测条件下对应通道的反射率散点图 (个例 1, 图中 R 是相关系数, SD 是拟合的标准差, P 是 R 为 0 的概率)

Fig. 6 The scatter diagram between MODIS and FY-2C reflectance of corresponding channel in FY-2C's observational condition (example 1, R is correlation coefficient, SD is standard deviation, P is probability when R is zero)

DIS 反射率值。可以清楚看到, 相同参数条件下 MODIS 反射率明显大于 FY-2C, 因此必须以 MODIS 为参考系对 FY-2C 的反射率进行相应订正。通过对这些散点作线性拟和, 得到 X 与 Y 的近似关系式:

$$Y = 0.02758 + 1.22554X. \quad (7)$$

根据式 (7), 可以对 FY-2C 通道反射率进行订正, 同样对个例 2 进行相应订正。

图 7a、图 8a 和图 9a (见文后彩图) 分别是选取个例的 FY-2C 可见光通道反射率图像、中红外通道和热红外通道亮度温度图像 (每类图像均包含个例 1 与个例 2)。在反射率图像上以不同颜色表示反射率大小, 图像色调越红, 说明反射率越大, 色调越蓝则表示反射率越小; 同样地, 对于亮度温度图像, 图像色调越红, 亮度温度越高。图 7b、图 8b 和图 9b (见文后彩图) 分别是利用 FY-2C 可见光通道、中红外通道和热红外通道反演得到的光学厚度、云顶有效粒子半径以及云顶温度图像, 用不同颜色表示了三个反演参数的大小分布, 色调越红表示反演值 (光学厚度、粒子有效半径、云顶温度) 越大, 越蓝则表示反演值越小。

对比原始通道图像和反演图像可知, 可见光通道反射率越大, 对应反演的云光学厚度越大, 反射率越小对应光学厚度越小; 中红外通道亮温越大, 对应反演的粒子有效半径越小, 亮温越小对应有效半径越大; 热红外通道亮温越大, 对应反演的云顶温度越高, 亮温越小对应云顶温度越低。因此可推知反演结果具有合理性, 且迭代计算标准偏差在允许的精度范围内 (个例 1: 0.89%; 个例 2: 0.85%)。

图 7c、图 8c 和图 9c (见文后彩图) 分别是选取个例的 MODIS 水云光学厚度、粒子有效半径以及云顶温度的反演图像。比较图 7b 与 7c、图 8b 与 8c、图 9b 与 9c 可知, 两者反演图像基本相似。个例 1 中 ($26^{\circ}\text{N} \sim 29^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\text{E} \sim 109^{\circ}\text{E}$) 区域, FY-2C 反演的水云光学厚度值为 $80 \sim 100$, 相比同区域的 MODIS 反演值 ($60 \sim 70$) 要偏大; 在 ($25.5^{\circ}\text{N} \sim 26^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\text{E} \sim 116^{\circ}\text{E}$) 区域, FY-2C 反演的水云粒子有效半径约为 $3 \sim 4 \mu\text{m}$, 相比同区域的 MODIS 反演值 ($4 \sim 6 \mu\text{m}$) 要偏小, 其它区域分布都基本一致; MODIS 的云顶温度反演值比 FY-2C 普遍偏大 $4 \sim 5 \text{K}$, 集中体现在 ($23^{\circ}\text{N} \sim 26^{\circ}\text{N}$, $114^{\circ}\text{E} \sim 116^{\circ}\text{E}$) 区域以及 ($24^{\circ}\text{N} \sim 26^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$) 区域。个

例 2 中, 二者光学厚度和粒子有效半径反演结果均基本一致, 仅 MODIS 的云顶温度反演值比 FY-2C 整体偏大 $5 \sim 6 \text{K}$ 。

为了进一步对 MODIS 与 FY-2C 的反演结果作比较, 我们对所选区域的反演结果进行了统计分析。图 10a、图 11a 和图 12a 分别是 MODIS 反演的云光学厚度、粒子有效半径以及云顶温度的统计直方图, 图 10b、图 11b 和图 12b 则分别是 FY-2C 反演的云光学厚度、粒子有效半径以及云顶温度的统计直方图, 从图上可清晰地看到, 两者云光学厚度和粒子有效半径的平均值均非常一致, 个例 1 中 MODIS 反演光学厚度平均值为 53.528 , 小于 FY-2C 的平均值 54.985 , 从直方图分布来看, 两者比较相似, FY-2C 反演结果中 $\tau_c > 80$ 的像元频率比 MODIS 高, 由图 7b 可知, 这些像元主要集中在 ($26^{\circ}\text{N} \sim 29^{\circ}\text{N}$, $106^{\circ}\text{E} \sim 109^{\circ}\text{E}$) 区域; 个例 2 中 MODIS 与 FY-2C 的反演图像基本一致。两个例中, MODIS 反演有效半径平均值均与 FY-2C 的反演值很相近, 但最大值均比 FY-2C 大 (个例 1: $29.25 \mu\text{m} > 15.43 \mu\text{m}$; 个例 2: $29.49 \mu\text{m} > 18.72 \mu\text{m}$), 从分布看, 个例 1 中 MODIS 反演粒子有效半径为 $7 \sim 8 \mu\text{m}$ 的粒子出现频率最高, 且比左右粒子有效半径分布频率高出很多, 而 FY-2C 则是 $8 \sim 9 \mu\text{m}$ 粒子频率最高, 且邻近直方图分布比较均衡。两个例中, MODIS 的云顶温度平均值均比 FY-2C 高 (个例 1: $268.53 \text{K} > 264.15 \text{K}$; 个例 2: $267.66 \text{K} > 261.20 \text{K}$), 最大值也比 FY-2C 高, 见图 12a 与 12b, 但两者的直方图分布还比较相似。

5 关于反演参数误差的讨论

云光学厚度的反演误差主要来源于仪器测量误差和表面反照率的不确定性。仪器测量误差对光学厚度反演精度的影响取决于测量误差的大小和可见光通道辐射率对光学厚度的敏感程度 (Platnick and Valero, 1995)。

图 13a 给出了可见光通道辐射率随光学厚度、云滴有效半径的变化曲线。计算中地表温度、地表气温、云顶温度、散射几何参数、地表反照率、大气模型等参数取值同图 1。由图 13a 可知, 随着 τ_c 的增大, 辐射率对 τ_c 的敏感性逐渐降低, 因此, 在同样测量误差条件下的反演误差随 τ_c 的增大而增大。当 $\tau_c = 30$ 时, 5% 的测量误差会引起大约 15%

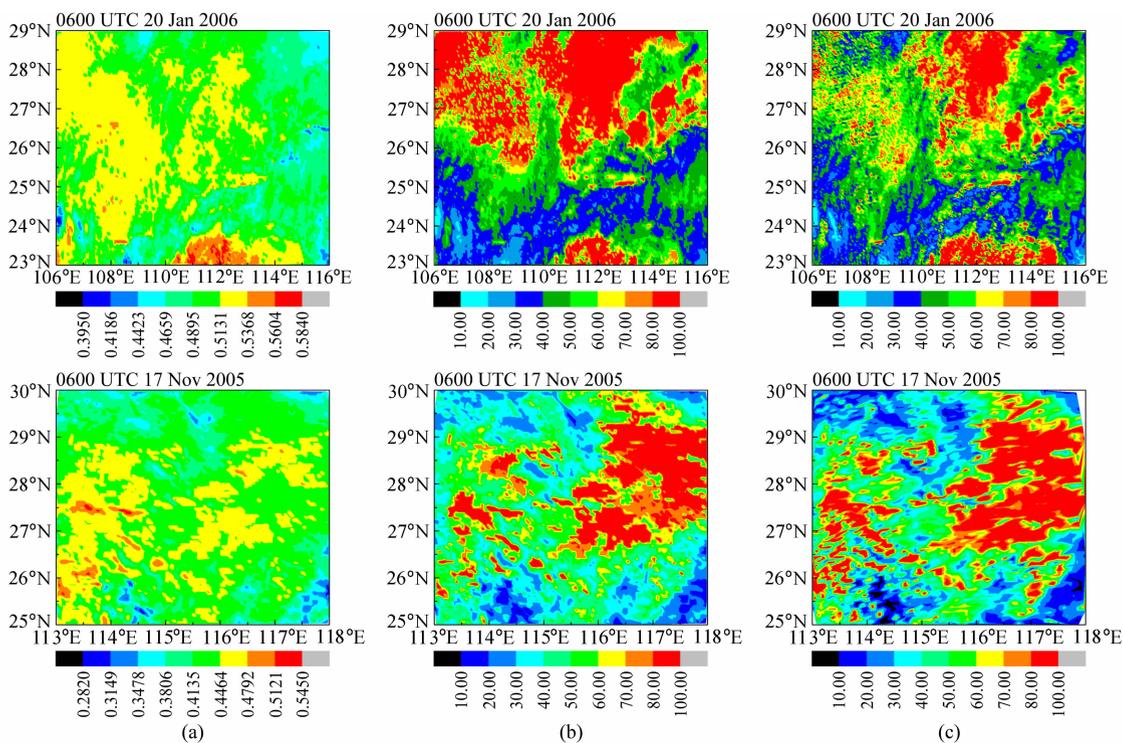


图 7 (a) FY-2C 可见光通道反射率图像；(b) FY-2C 水云光学厚度反演图像；(c) MODIS 水云光学厚度反演图像
Fig. 7 (a) Band-VIS reflectance images from FY-2C; (b) retrieval images of cloud optical thickness from FY-2C; (c) retrieval images of cloud optical thickness from MODIS

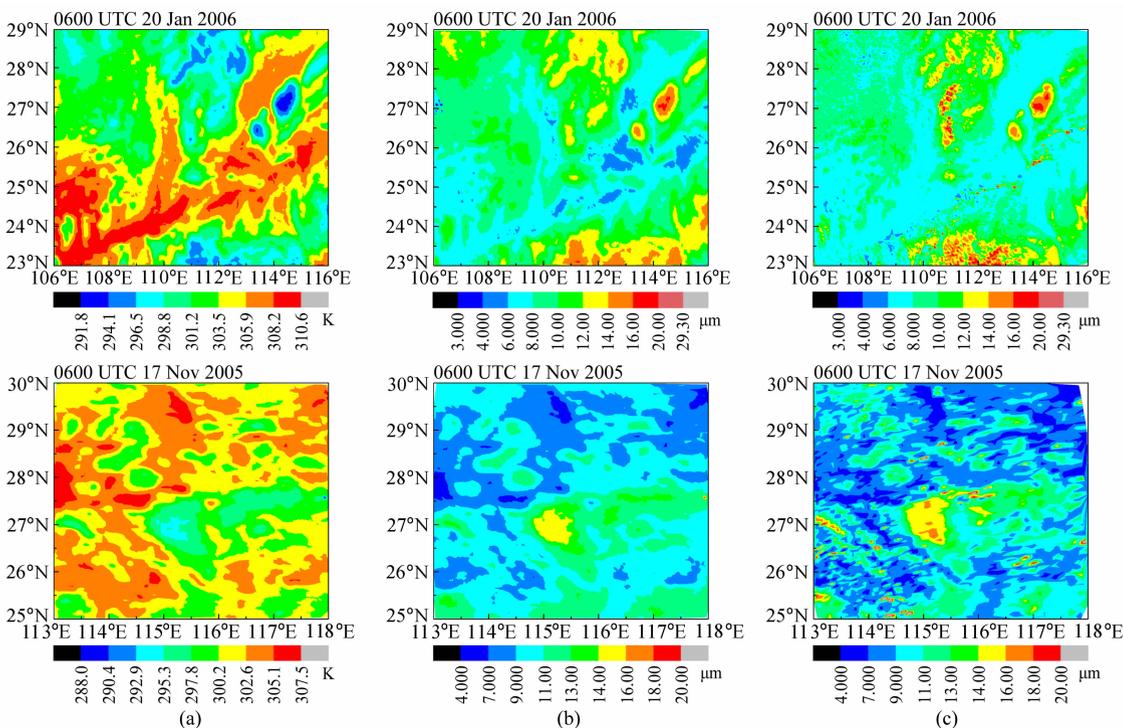


图 8 (a) FY-2C 中红外通道亮度温度图像；(b) FY-2C 粒子有效半径反演图像；(c) MODIS 粒子有效半径反演图像
Fig. 8 (a) Band-infrared 4 bright temperature (K) images from FY-2C; (b) retrieval images of cloud particle effective radius (μm) from FY-2C; (c) retrieval images of cloud particle effective radius (μm) from MODIS

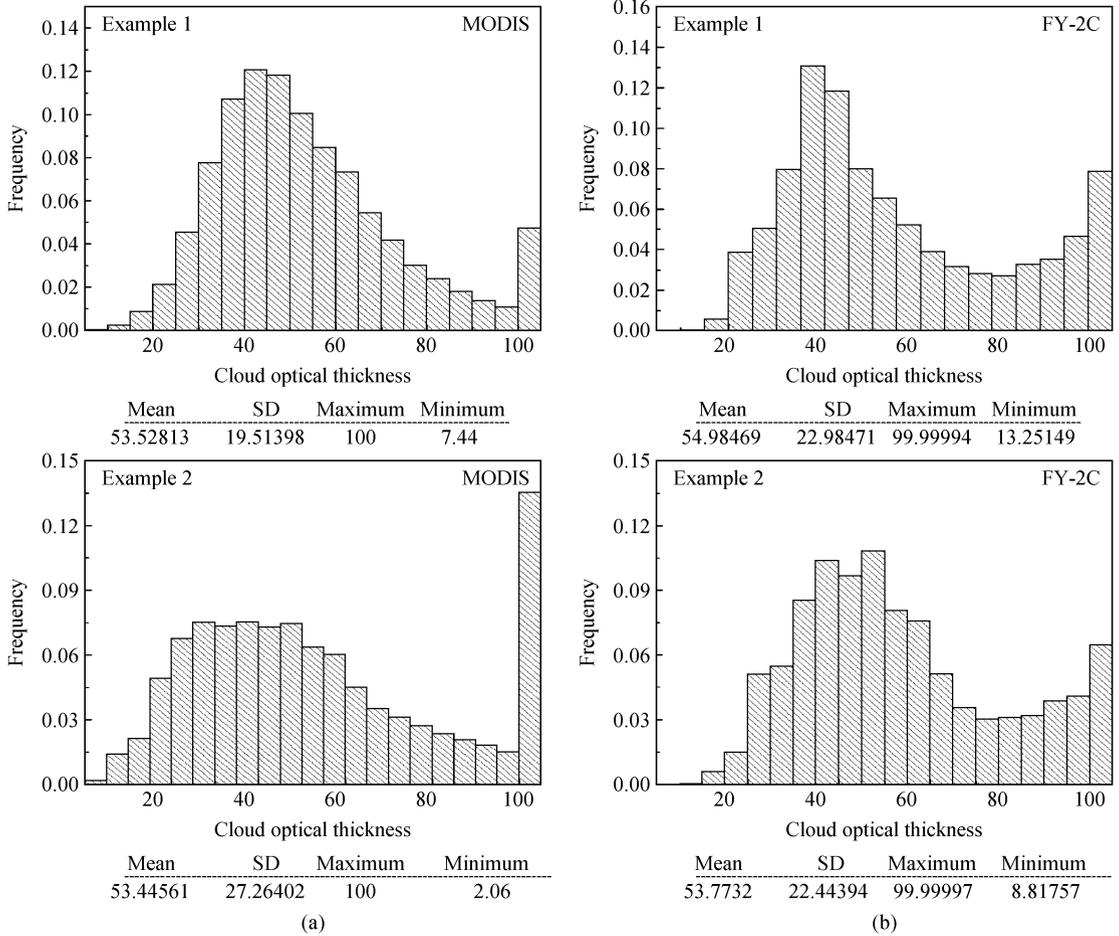


图 10 (a) MODIS 水云光学厚度反演统计直方图; (b) FY-2C 水云光学厚度反演统计直方图

Fig. 10 (a) Retrieval statistic histogram of cloud optical thickness from MODIS; (b) retrieval statistic histogram of cloud optical thickness from FY-2C

的光学厚度反演误差。当 τ_c 很大时, 如 $\tau_c > 60$, 反演误差可达 20% 以上。由图 13a 还可以看出, 有效半径 r_e 影响可见光通道反演光学厚度的精度, 尤其当 $r_e < 10 \mu\text{m}$ 时, 可见光通道辐射率随 r_e 的增大而减小, 当 $r_e = 4 \mu\text{m}$ 时, 如果采用 $r_e = 12 \mu\text{m}$ 的云滴谱反演云光学厚度, 反演误差大约在 10%~15% 之间。由于实际大气中云滴有效半径的变化范围大于 $5 \mu\text{m}$, 这一结果说明同时反演云光学厚度和云滴有效半径将有助于提高光学厚度的反演精度。

图 13b 给出了可见光通道辐射率随光学厚度、地表反照率的变化曲线 (计算参数条件同图 1), 由图可知, 当地表反照率比较小时, 可见光通道辐射率对云光学厚度的敏感性较强, 而当地表反照率逐渐增加时, 可见光通道辐射率对云光学厚度的敏感性则逐渐减弱。只有在云光学厚度非常大且云十分

密实的条件下, 才可忽略下垫面反照率的影响。

云滴有效半径的反演误差主要来自于中红外通道辐射率的测量误差以及云顶温度的不确定性。图 14a 显示的是中红外通道辐射率随云滴有效半径的变化曲线, 由图可以看出, 随着 r_e 的增大, 辐射率对 r_e 的敏感性逐渐降低。因此在同样的测量误差条件下反演误差随 r_e 的增大略有增大。由变化曲线可以估计出当 $r_e \leq 20 \mu\text{m}$ 时, 5% 的辐射率测量误差引起的有效半径反演误差小于 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。由图 14a 还可看出, 光学厚度 τ_c 影响中红外通道反演有效半径的精度, 尤其当 $\tau_c < 8$ 时, 中红外通道辐射率随 τ_c 的增大而减小。

图 14b 是中红外通道辐射率 (热辐射与散射辐射的总和) 随云顶温度的变化关系, 图中云顶温度的变化不仅造成云中水汽含量的变化, 同时也引起

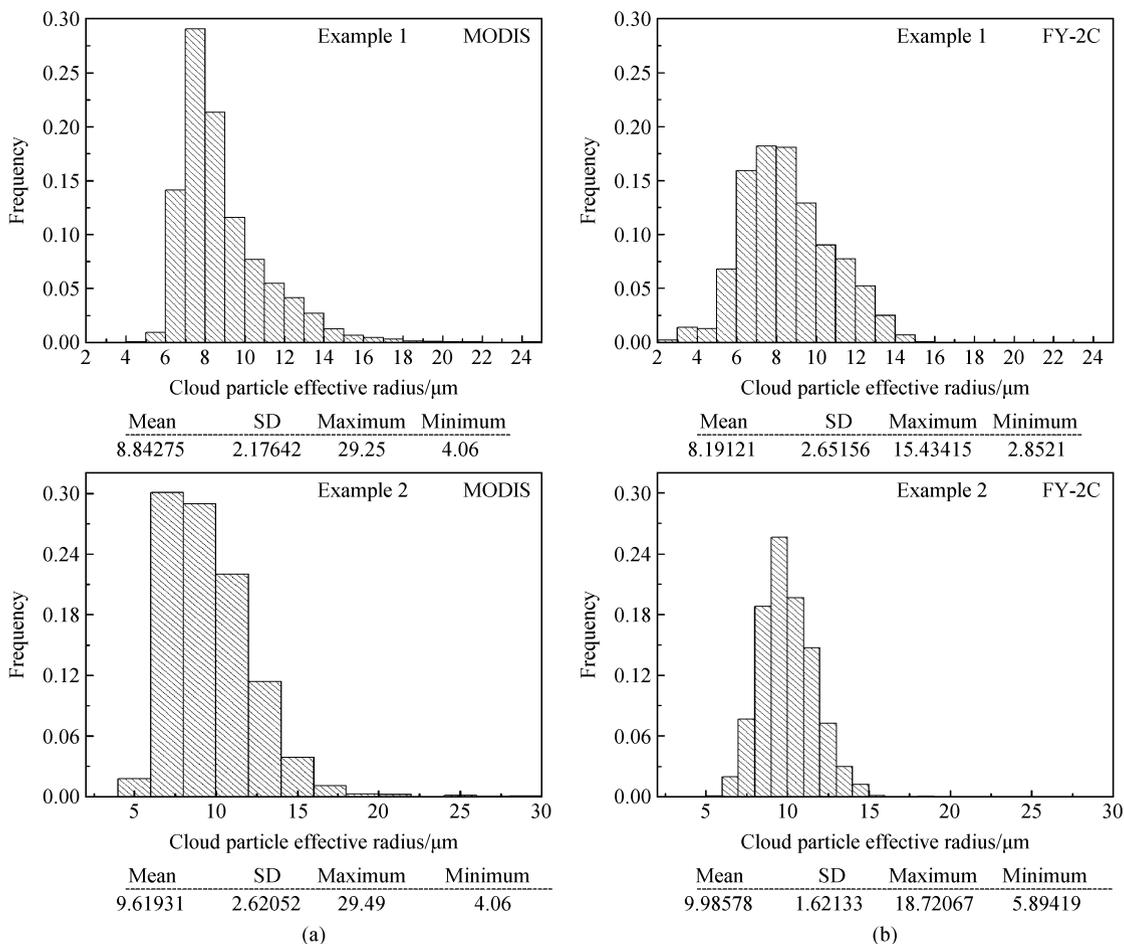


图 11 (a) MODIS 水云粒子有效半径反演统计直方图; (b) FY-2C 水云粒子有效半径反演统计直方图
Fig. 11 (a) Retrieval statistic histogram of cloud particle effective radius (μm) from MODIS; (b) retrieval statistic histogram of cloud particle effective radius (μm) from FY-2C

热辐射的改变。由于水汽含量的增加会导致散射辐射的减小，因此，云顶温度变化引起的水汽含量变化和热辐射变化部分抵消。当 r_c 较小时（如 $r_c = 4 \mu\text{m}$ ），云的散射辐射对中红外通道总辐射率的贡献大于热辐射的贡献，总辐射率随着云顶温度的增加逐渐减小。随着 r_c 的增大，散射辐射的贡献减小。当 r_c 大约为 $8 \mu\text{m}$ 时，水汽含量变化引起的云散射辐射的变化和热辐射的变化基本抵消，总辐射率对云顶温度变化不太敏感。当 r_c 继续增大时，散射辐射进一步减小，云顶温度变化引起的热辐射变化大于水汽含量变化引起的散射辐射变化，因此总辐射率随云顶温度的升高而增大。图 2 已给出了热红外通道 ($11 \mu\text{m}$) 辐射率随云顶温度的变化曲线，比较图 14b 和图 2 就可以看出， $11 \mu\text{m}$ 通道辐射率对云顶温度的敏感性远大于 $3.75 \mu\text{m}$ 通道辐

射率对云顶温度的敏感性。

另外，反演算式也有误差，主要表现为插值误差，由于该反演算法是通过辐射模拟函数数据库进行多维数组插值来建立辐射率数据查找表，然后将 9 维参数变量进行降维匹配处理，最后插值得到数据库中相应通道的辐射率计算值，因此查找表的数据间隔密度就直接关系到插值精度。文中查找表太阳天顶角取 8 个，卫星天顶角取 10 个，相对方位角取 15 个，光学厚度取 8 个，有效半径取 11 个，地表反照率取 9 个，云顶温度取 5 个，若查找表中的各项参数增加，则插值精度将会提高，最终反演精度也将提高。

6 总结与讨论

本文基于 FY-2C 各通道对辐射参数的敏感性

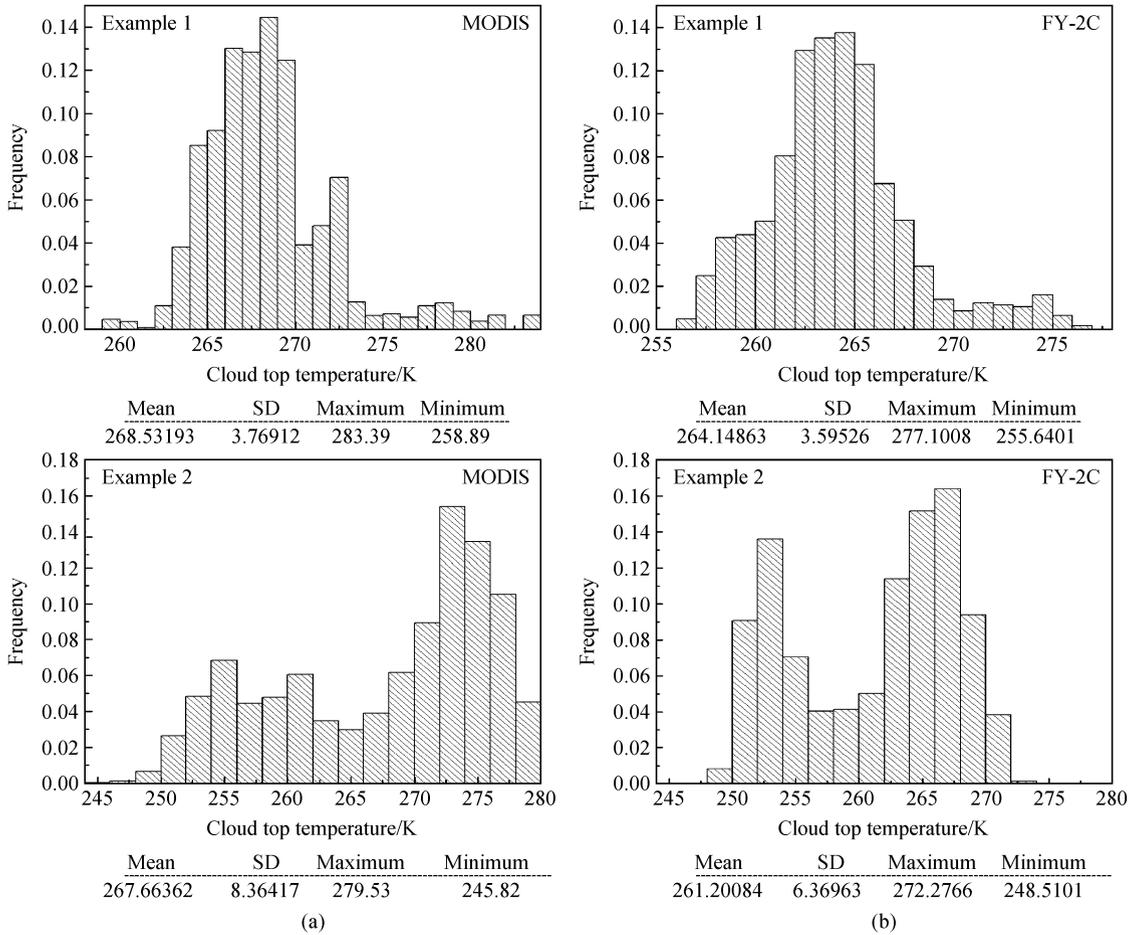


图 12 (a) MODIS 水云云顶温度反演统计直方图; (b) FY-2C 水云云顶温度反演统计直方图

Fig. 12 (a) Retrieval statistic histogram of cloud top temperature (K) from MODIS; (b) retrieval statistic histogram of cloud top temperature (K) from FY-2C

分析, 提出三通道同时反演云的光学厚度、云滴有效半径及云顶温度的迭代方案, 通过个例分析进行了利用 FY-2C 观测数据反演云辐射参数的试验研究, 并将反演结果与 MODIS 的云反演产品进行了对比, 最后对反演误差进行了分析。主要结论如下:

(1) 从个例中反演得到的云光学厚度、云顶粒子有效半径和云顶温度与各通道探测数据的比较分析中, 可知反演结果具有合理性, 迭代计算标准偏差在允许的计算精度范围内 ($<0.89\%$)。

从反演分布图和直方图来看, 利用 FY-2C 数据反演得到的云光学厚度、粒子有效半径与 MODIS 均比较一致: ① 个例 1 中 MODIS 反演光学厚度平均值为 53.528, 小于 FY-2C 的平均值 54.985, 从直方图分布来看, 两者比较相似, FY-2C 反演结

果中 $\tau_c > 80$ 的像元频率比 MODIS 高, 由图 7b 可知, 这些像元主要集中在 ($26^\circ\text{N} \sim 29^\circ\text{N}$, $106^\circ\text{E} \sim 109^\circ\text{E}$) 区域; 个例 2 中 MODIS 与 FY-2C 的反演图像基本一致。② 两个例中, MODIS 反演有效半径平均值均与 FY-2C 的反演值很相近, 但最大值均比 FY-2C 大 (个例 1: $29.25 \mu\text{m} > 15.43 \mu\text{m}$; 个例 2: $29.49 \mu\text{m} > 18.72 \mu\text{m}$), 从分布看, 个例 1 中 MODIS 反演粒子有效半径为 $7 \sim 8 \mu\text{m}$ 的粒子出现频率最高, 且比左右粒子有效半径分布频率高出很多, 而 FY-2C 则是 $8 \sim 9 \mu\text{m}$ 粒子频率最高, 且邻近直方图分布比较均衡; 从反演分布图像来看, 在个例 1 的 ($25.5^\circ\text{N} \sim 26^\circ\text{N}$, $112^\circ\text{E} \sim 116^\circ\text{E}$) 区域, FY-2C 反演的水云粒子有效半径约为 $3 \sim 4 \mu\text{m}$, 相比同区域的 MODIS 反演值 ($4 \sim 6 \mu\text{m}$) 要偏小, 其它区域分布都基本一致。③ 两个例中, MODIS 的云顶

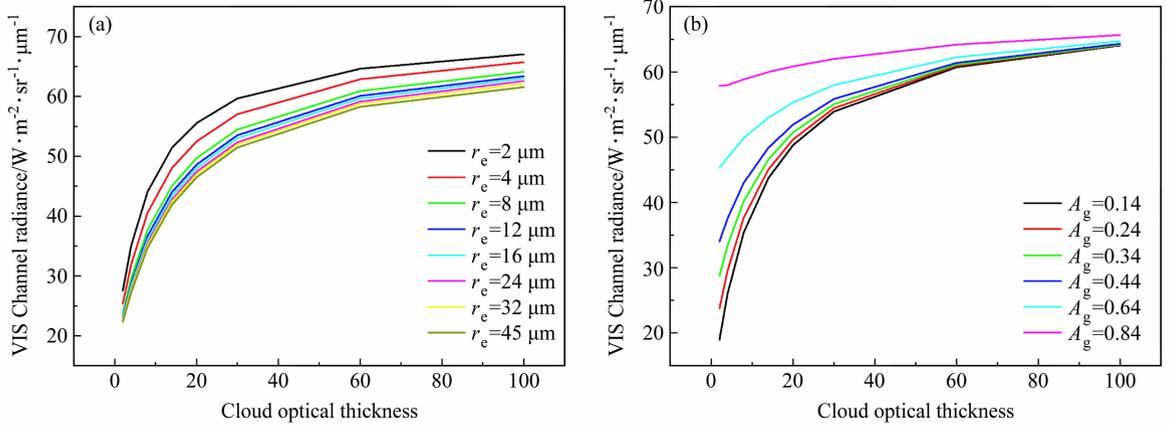


图 13 (a) 可见光通道辐射率随云光学厚度、云滴有效半径的变化曲线；(b) 可见光通道辐射率随云光学厚度、地表反照率的变化曲线
 Fig. 13 (a) The variation of visible channel radiance with cloud optical thickness and cloud particle effective radius; (b) the variation of visible channel radiance with cloud optical thickness and surface albedo

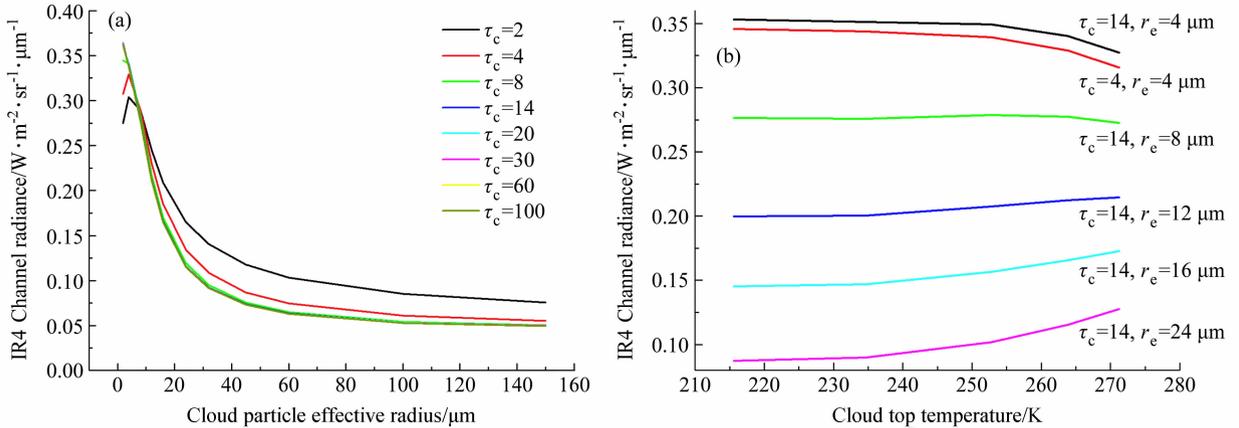


图 14 中红外通道辐射率分别随云滴有效半径 (a)、云顶温度 (b) 的变化曲线
 Fig. 14 The variation of middle-infrared channel radiance with (a) cloud effective radius and (b) cloud top temperature

温度平均值均比 FY-2C 高 (个例 1: 268.53 K > 264.15 K; 个例 2: 267.66 K > 261.20 K), 最大值也比 FY-2C 高, 主要体现在个例 1 的 (23°N~26°N, 114°E~116°E) 区域、(24°N~26°N, 108°E~110°E) 区域以及个例 2 的整幅图像上, 考虑到 FY-2C 的 11 μm 通道测量的辐射值与 MODIS 相比偏小, 因此, 我们认为我们的反演方法与 MODIS 方法的精度是相当的。

(2) 通过反演误差分析可知, 云光学厚度的反演误差主要来源于仪器测量误差和表面反照率的不确定性。仪器测量误差对光学厚度反演精度的影响取决于测量误差的大小和可见光通道辐射率对光学厚度的敏感程度, 同样测量误差条件下的反演误差随 τ_c 的增大而增大。云滴有效半径的反演误差主

要来自于中红外通道辐射率的测量误差以及云顶温度的不确定性。在同样的测量误差条件下反演误差随 r_e 的增大略有增大 (当 $r_e \leq 20 \mu\text{m}$ 时, 5% 的辐射率测量误差引起的有效半径反演误差小于 1~2 μm), 光学厚度 τ_c 也影响中红外通道反演有效半径的精度 (尤其当 $\tau_c < 8$ 时)。由于中红外通道总辐射为散射辐射与热辐射之和, 当 r_e 较小时 (如 $r_e = 4 \mu\text{m}$), 总辐射率随着云顶温度的增加逐渐减小。随着 r_e 的增大, 散射辐射的贡献减小。当 r_e 大约为 8 μm 时, 水汽含量变化引起的云散射辐射的变化和热辐射的变化基本抵消, 总辐射率对云顶温度变化不太敏感。当 r_e 继续增大时, 散射辐射进一步减小, 云顶温度变化引起的热辐射变化大于水汽含量变化引起的散射辐射变化, 因此总辐射率随云

顶温度的升高而增大。

本文下一步工作将从以下几方面做起:

(1) 本文在反演时使用了 NCEP 模拟的气温和地面温度、MODIS 的地表反射率气候产品, 由于 NCEP 和 MODIS 的资料可信度高、应用范围广, 有利于提高三通道反演云参数的精度, 但在实际应用时会有一定困难。日后的研究中我们将考虑使用同一卫星的参数, 如 MODIS 的气温、地表温度以及地表反照率, 来简化资料的处理过程, 提高该方法的应用价值。

(2) 为了进一步验证 FY-2C 反演的云参数结果, 我们需要对 FY-2C 反演结果进行真实性检验。国际上对云粒子有效半径反演真实性检验所采用的方法是利用机载探测器, 在装载同卫星遥感波段相同探测器的同时, 装载检验所需的其它仪器, 如滴谱探测器 (King et al., 1996), 这样就可以保证反演参数数据源与验证数据源具有探测时间、空间一致性。另一个验证方法是采用激光雷达探测云顶参数 (Clothiaux et al., 1995), 利用探测信息检验反演参数的准确性。借鉴国际上验证方法来对 FY-2C 定量遥感结果进行检验, 将是本文下一步研究需要考虑的工作。

参考文献 (References)

- Arking A, Childs J D. 1985. Retrieval of cloud cover parameters from multi-spectral satellite images [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23: 322-333.
- Baum B A, Kratz D P, Yang Ping, et al. 2000a. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS 1: Data and models [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 11767-11780.
- Baum B A, Soulen P F, Strabala K I, et al. 2000b. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS 2: Cloud thermodynamic phase [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 11781-11792.
- Baum B A, Spinhirne J D. 2000. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS 3: Cloud overlap [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 11793-11804.
- Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al. 1989. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models [J]. *Science*, 245: 513-516.
- Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al. 1990. Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models [J]. *J. Geophys. Res.*, 95: 16601-16615.
- 陈英英, 周毓荃, 毛节泰, 等. 2007. 利用 FY-2C 静止卫星资料反演云粒子有效半径的试验研究 [J]. *气象*, 33 (4): 29-34.
- Chen Yingying, Zhou Yuquan, Mao Jietai, et al. 2007. Experimental research of the retrieval of cloud effective particle radius by FY-2C geostationary satellite data [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33 (4): 29-34.
- Clothiaux E E, Miller M A, Albrecht B A, et al. 1995. An evaluation of a 94-GHz Radar for remote sensing of cloud properties [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 12: 201-229.
- Curran R J, Wu M L C. 1982. Skylab near-infrared observations of clouds indicating supercooled liquid water droplets [J]. *J. Atmos. Sci.*, 39: 635-647.
- Durkee P A. 1989. Observations of aerosol-cloud interactions in satellite detected visible and near-infrared radiance [C]//Proc. Symposium on the Role of Clouds in Atmospheric Chemistry and Global Climate. American Meteorological Society, Anaheim, CA, 157-160.
- Foot J S. 1988. Some observations of the optical properties of clouds. I: Stratocumulus [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114: 129-144.
- 官莉, 肖稳安, Huang Hung-Lung. 2007. 红外高光谱观测值反演云参数 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1123-1128.
- Guan li, Xiao Wen an, Huang Hung-Lung. 2007. Retrieval of cloud parameters using infrared hyperspectral observations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (6): 1123-1128.
- Han Q, Rossow W B, Lacis A A. 1994. Near-global survey of effective droplet radii in liquid water clouds using ISCCP data [J]. *J. Climate*, 7: 465-497.
- Han Q, Rossow W B, Welch R, et al. 1995. Validation of satellite retrievals of cloud microphysics and liquid water path using observations from FIRE [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52: 4183-4195.
- Hansen J E, Pollack J B. 1970. Near-infrared light scattering by terrestrial clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 27: 265-281.
- King M D. 1987. Determination of the scaled optical thickness of clouds from reflected solar radiation measurements [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44: 1734-1751.
- King M D, Menzel W P, Grant P S, et al. 1996. Airborne scanning spectrometer for remote sensing of cloud, aerosol, water vapor and surface properties [J]. *J. Atmos. Oceanic Technology*, 13: 777-794.
- King M D, Chee T S, Platnick S E, et al. 1997. Cloud retrieval algorithms for MODIS: Optical thickness, effective particle radius and thermodynamic phase [R]. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document, No. ATBD-MOD-05 MOD-06-cloud product, version 5.
- 刘健, 董超华. 2002. 卫星资料在云顶粒子尺度特征分析中的应用 [J]. *红外与毫米波学报*, 4 (2): 124-128.
- Liu Jian, Dong Chaohua. 2002. Using satellite data to analyze properties of cloud particles size on the top of cloud [J]. *J. Infrared Millim. Waves (in Chinese)*, 4 (2): 124-128.

- 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 [J]. 红外与毫米波学报, 22 (6): 436 - 440.
- Liu Jian, Dong Chaohua, Zhang Wenjian. 2003. Determination of the optical thickness and effective radius of water clouds by FY-1C data [J]. J. Infrared Millim. Waves (in Chinese), 22 (6): 436 - 440.
- Minnis P, Garber D P, Young D F, et al. 1998. Parameterizations of reflectance and effective emittance for satellite remote sensing of cloud properties [J]. J. Atmos. Sci., 55: 3313 - 3339.
- 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]. J. Atmos. Sci., 47 (15): 1878 - 1893.
- Nakajima T, Tanaka M, Spinhirne J D, et al. 1991. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part II: Marine stratocumulus observations [J]. J. Atmos. Sci., 48: 728 - 750.
- Nakajima T Y, Nakajima T. 1995. Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions [J]. J. Atmos. Sci., 52: 4043 - 4058.
- Platnick S, Twomey S. 1994. Determining the susceptibility of cloud albedo to changes in droplet concentration with the Advanced Very High Resolution Radiometer [J]. J. Appl. Meteor., 33: 334 - 347.
- Platnick S, Valero F P J. 1995. A validation of a satellite cloud retrieval during ASTEX [J]. J. Atmos. Sci., 52: 2985 - 3001.
- 邱金桓, 王普才, 夏祥鳌, 等. 2008. 近年来大气遥感研究进展. 大气科学, 32 (4): 841 - 853.
- Qiu Jinhuan, Wang Pucai, Xia Xiang'ao, et al. 2008. Recent progresses in atmospheric remote sensing researches [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 841 - 853.
- Rawlins F, Foot J S. 1990. Remotely sensed measurements of stratocumulus properties during FIRE using the C130 aircraft multi-channel radiometer [J]. J. Atmos. Sci., 47: 2488 - 2503.
- Rossov W B, Moshier F, Kinsella E, et al. 1985. ISCCP cloud algorithm intercomparison [J]. J. Climate Appl. Meteor., 24: 877 - 903.
- Rossov W B, Garder L C, Lacis A A. 1989. Global, seasonal cloud variations from satellite radiance measurements. Part I: Sensitivity of analysis [J]. J. Climate, 2: 419 - 458.
- Spinhirne J D, Hart W D. 1990. Cirrus structure and radiative parameters from airborne lidar and spectral radiometer observations: The 28 October 1986 FIRE study [J]. Mon. Wea. Rev., 118: 2329 - 2343.
- Twomey S, Cocks T. 1989. Remote sensing of cloud parameters from spectral reflectance in the near-infrared [J]. Beitr. Phys. Atmos., 62: 172 - 179.
- Zhao Fengsheng, Nakajima T. 1992. The Effects of Anthropogenic Aerosols on Optical Thickness and Particle Size of Clouds. Part I: Retrieval Algorithm [C]. Asia-Pacific ISY Conference, Tokyo, Japan, Vol. II, 111 - 116.
- 赵凤生, 丁强, 孙同明, 等. 2002. 利用 NOAA-AVHRR 观测数据反演云辐射特性的一种迭代方法 [J]. 气象学报, 60 (5): 594 - 601.
- Zhao Fengsheng, Ding Qiang, Sun Tongming, et al. 2002. An iterative algorithm for the retrieval of cloud properties from NOAA-AVHRR imagery [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (5): 594 - 601.
- 周青, 赵凤生, 高文华. 2008. NCEP/NCAR 逐时分析与中国实测地表温度和地面气温对比分析 [J]. 气象, 34 (2): 83 - 91.
- Zhou Qing, Zhao Fengsheng, Gao Wenhua. 2008. Comparison and analysis between NCEP/NCAR every-6-hours analysis land surface and air temperature and 753 Chinese stations' observation in 2005 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (2): 83 - 91.

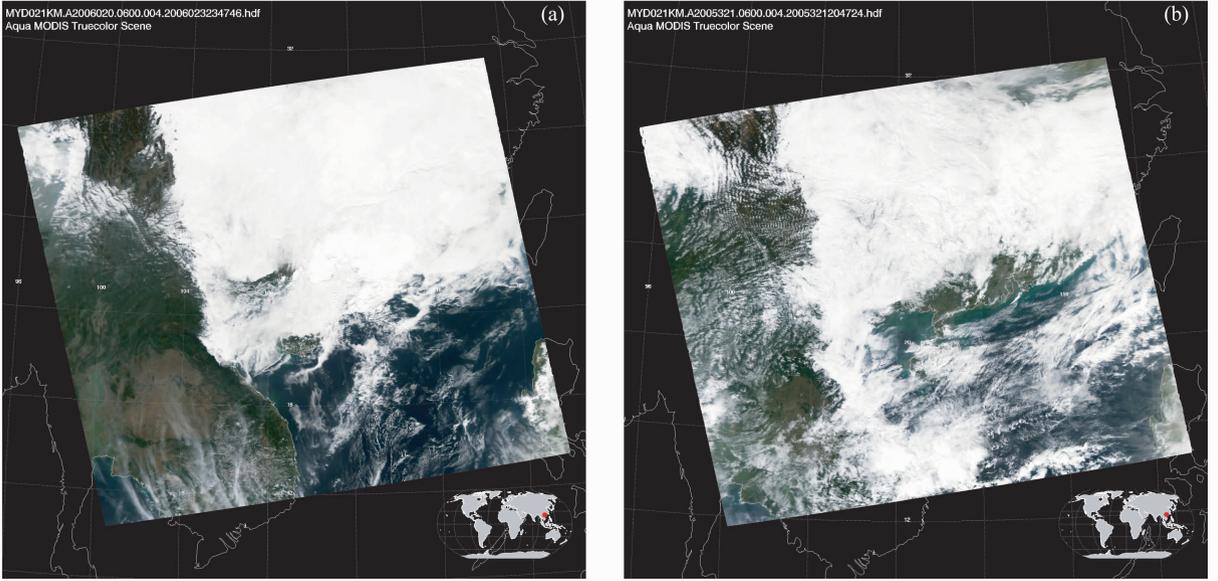


图 5 (a) 2006 年 1 月 20 日 06:00 与 (b) 2005 年 11 月 17 日 06:00 AQUA-MODIS 真彩图
Fig. 5 AQUA-MODIS real color images at (a) 0600 UTC 20 Jan 2006 and (b) 0600 UTC 17 Nov 2005

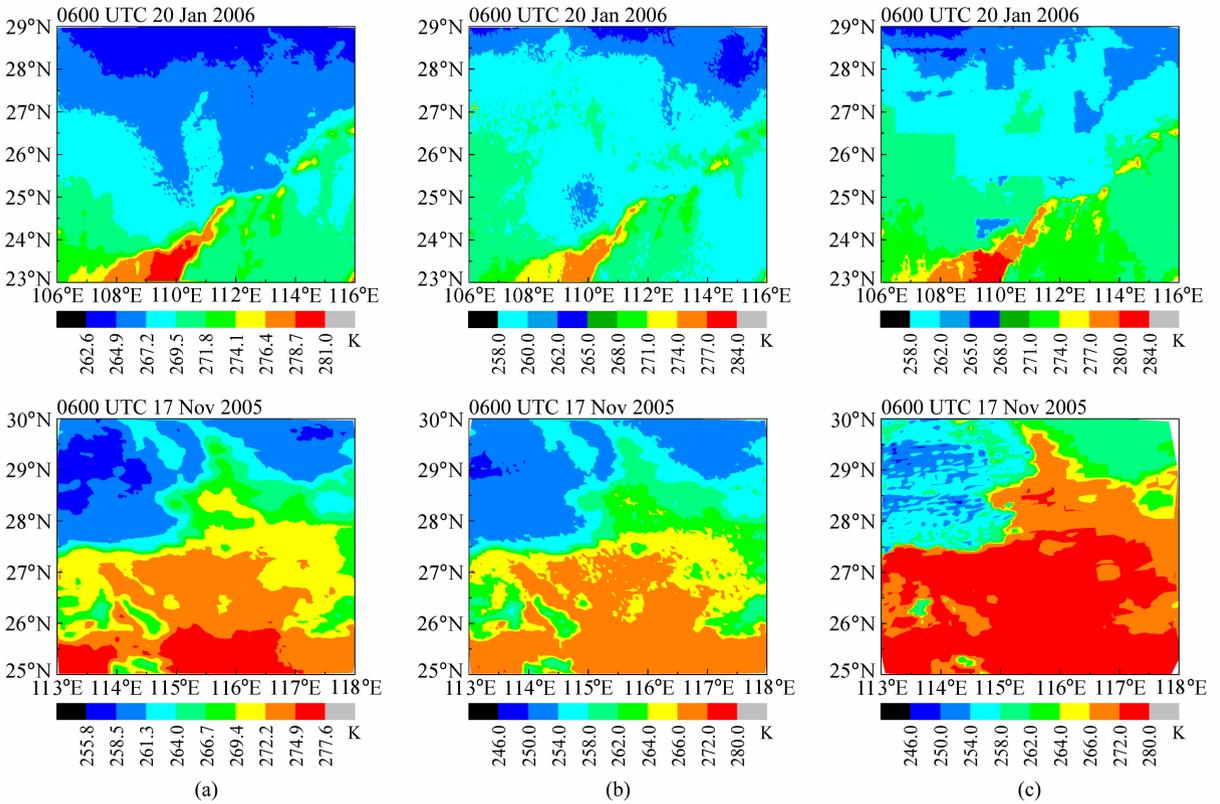


图 9 (a) FY-2C 热红外通道亮度温度图像; (b) FY-2C 云顶温度反演图像; (c) MODIS 云顶温度反演图像
Fig. 9 (a) Band-infrared 1 bright temperature (K) images from FY-2C; (b) retrieval images of cloud top temperature (K) from FY-2C; (c) retrieval images of cloud top temperature (K) from MODIS