

刘香娥,王广河. FY-2C 静止气象卫星红外通道辐射特性研究[J]. 气象, 2010, 36(2): 39-47.

FY-2C 静止气象卫星红外通道辐射特性研究^{*}

刘香娥 王广河

中国气象科学研究院, 北京 100081

提 要: FY-2C 静止气象卫星中红外通道(3.5~4.0 μm)比较特殊,在该通道,地球长波辐射和太阳短波入射辐射的强度基本相同,因此在应用时需要同时考虑大气的散射和热发射两种过程。作者对这两种过程进行了分析,用 SBDART 辐射传输模式模拟计算了 FY-2C 中红外通道接收的总辐射、热辐射及散射辐射,分析了它们的特性及对云滴粒子有效半径的敏感性,并提出从该通道接收总辐射中扣除地面及云热辐射贡献项的经验关系式。

关键词: 中红外通道, 云粒子有效半径, 辐射传输模式, 经验关系式

Analyses of the Radiation Characteristics from FY-2C Mid-Infrared Channel

LIU Xiang'e WANG Guanghe

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: The mid-infrared channel (3.5—4.0 μm) of Geostationary Meteorological Satellite FY-2C is special, at which earth outgoing long-wave radiation and solar incoming short-wave radiation are basically of the same intensity. Therefore it is necessary to take into account both the atmospheric scattering and the thermal emission, and detailed researches are conducted on the two processes. Total radiation, thermal radiation and scattering radiation received from the mid-infrared channel of FY-2C are simulated by using radiative transfer model SBDART. And the radiation characteristics and sensitivity to cloud droplet particle effective radius are analyzed. Then an empirical relationship was proposed about removing the thermal radiation emitted by the earth's surface and clouds from the total radiation received in the mid-infrared channel of FY-2C.

Key words: mid-infrared channel, particle effective radius, radiative transfer model, empirical relationship

引 言

云通过影响太阳和地球辐射对整个地气系统的能量平衡具有强烈的调节作用。云的宏微观物理特性在空间和时间上差异较大,细致了解云的微物理特征参量将有助于监测和预报天气变化,有助于对全球气候变化的研究及对人工影响天气作业条件和效果检验的判定。

云粒子有效半径是重要的微物理特征参量, Arking 和 Childs^[1] 研究表明:卫星近红外或中红外

通道反射函数对云粒子尺度分布、热力学状态及形状等具有敏感性。国内外许多学者在利用气象卫星探测资料反演云滴粒子有效半径方面做了大量工作。Nakajima^[2-3] 提出运用中红外 2.16 μm 通道反射函数反演云粒子有效半径的方法,并运用于对海洋性层积云的反演,反演结果与华盛顿大学 C-131 飞机观测结果对比具有较好的时空分布一致性; Rosenfelda 等^[4] 利用 NOAA-AVHRR 3.7 μm 通道数据反演云顶附近的粒子有效半径,通过与雷达回波的对比发现该通道的辐射确实包含降水云云顶粒

* 国家科技支撑计划项目(2006BAC12B04)

2009 年 3 月 24 日收稿; 2009 年 8 月 18 日收修定稿

第一作者:刘香娥,从事卫星遥感与人工影响天气方面的研究. Email: lxe3399@163.com

子物理状态的信息; Steven Platnick^[6] 利用搭载于 Terra 卫星上的 MODIS 中红外 3.7 μm 通道数据反演云滴粒子有效半径, 随后制作成云反演产品发布; Kazuaki Kawamoto^[6] 运用欧洲气象组织发射的 Mereosat-8 卫星 3.9 μm 通道数据探索了适合于较小粒子半径反演的分裂窗法; 赵凤生等^[7] 开发出利用 NOAA-AVHRR 资料反演云滴有效半径的迭代方案, 并应用于东海上空冬季层积云辐射特性的分析; 刘健等^[8]、陈英英等^[9]、周毓荃等^[10] 利用我国自行研发的风云系列气象卫星中红外通道资料进行反演, 反演结果也与 MODIS 提供的云反演产品进行了比较分析; 陈英英等^[11] 还把反演产品应用于对地面降水的分析。

MODIS 云反演产品说明^[12] 指出: 运用 3.7 μm 窗区通道数据反演云滴粒子有效半径的工作具有一定的复杂性, 原因在于该通道接收的辐射中, 云自身的热发射部分常可以与反射的太阳辐射相当, 有时甚至占主要部分, 云自身的发射辐射对粒子半径也具有敏感性。不同学者对中红外通道数据的处理方法各不相同, Nakajima^[2] 选择对光学厚度比较大的云层进行反演, 认为光学厚度比较大的云层云顶性质均匀, 反射率可用单一的假定值代替, 运用分裂窗区通道亮温数据通过普朗克函数转换获得该通道上的热辐射值, 进而获得云的反射函数进行反演; Thomas^[13] 假定在两次连续的观测时间间隔内, 观测视场内云与大气的红外发射状况基本不变, 引起通道辐射值变化的仅仅是太阳高度角的改变, 两次连续的观测值之差可以消掉热辐射项; 刘健等^[8]、陈英英等^[9] 则直接运用风云系列卫星中红外通道的总辐射值进行反演。

以上处理中红外通道数据的方法在具体实施或运用中并不具有代表性, 或者仅对某一地区或时间段在一定的假设前提下可行, 因此本文将对我国的 FY-2C 静止气象卫星中红外通道探测辐射数据进行分析, 结合 SBDART 辐射传输模式模拟该通道接收到的辐射, 分析其对粒子半径的敏感性并提出一定的应用方法。文中提到的所有辐射除注明用辐照度(单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)外, 其余均用模式计算的输出结果单位 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

1 工具介绍

SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) 是一个散射、分子吸收和热辐射过程同时存在的辐射传输计算程序, 它是适用于计算平面平行大气条件下的辐射传输计算软件。SBDART 包含了影响紫外、可见光和红外辐射场的各类重要过程, 集成了复杂的离散坐标辐射传输模块 DISORT、低分辨率大气透射模式 LOWTRAN 和水滴、冰晶的米散射结果。该模式包含多流的算法, 参数的选择及自行设定比较方便。代码适用于各类大气辐射能量平衡和遥感方面的研究, 可以进行敏感性实验, 最为关键的是它提供了有关角度和云微物理特征方面的辐射信息, 云参数的设定为计算卫星遥感的辐射量奠定了基础^[14]。

模式提供有六种具有代表性的大气廓线、五种基本地表类型、标准气溶胶模式、云滴散射、瑞利散射、分子吸收以及 DISORT 辐射传输软件包, 同时还提供了不同的太阳辐射光谱及卫星通道光谱响应函数, 用户可根据需要进行选择, 也可以对某些参数设置不同的初始值(如下文提到的云层光学厚度、粒子有效半径、云层高度、散射几何角度等), 对于所做的改变模式都提供有较好的输入接口, 比较容易实现。

文中运用 SBDART 模式模拟计算有云状况下 FY-2C 卫星中红外通道探测辐射值时需改动或设定的参数有: 云层的高度 H 、光学厚度 τ 、云滴粒子有效半径 r_e 、散射几何角度: 太阳天顶角 sunz 、卫星天顶角 satz 、太阳与卫星之间的相对方位角 azu 、地表反照率 α 、地面温度 T 、计算辐射类型 nothrm 、大气廓线 $\text{atms}=2$ 、卫星通道响应函数 $\text{isat}=-1$ 、输出项选择 $\text{iout}=20$ 。

当太阳天顶角设置为小于 90° 而 nothrm 设置为 -1 和 1 时, 模式分别计算的是总辐射和滤掉热辐射之后的散射辐射值, 二者之差即为热辐射值; 当太阳天顶角设为大于 90° 时, nothrm 无论如何设置, 都可认为太阳已经落山, 云或大气粒子对通道辐射值的贡献仅为热发射辐射; 理论上两种不同的参数设置计算出的热辐射值应一致, 下面用实际计算来验证。在其他参数设置相同的条件下(如图 1 标示的参数), 对太阳

天顶角和参数 *nothrm* 用上面提到的两种方法分别设置,对计算的结果进行拟合,可以看到图 1 中拟合曲线的相关系数为 1,说明两种设置方法计算出的热辐射值基本完全相同,因此本文后面的计算中,散射辐射可以直接设置 *nothrm*=1 来计算,也可以由计算的总辐射与热辐射之差值来获得。

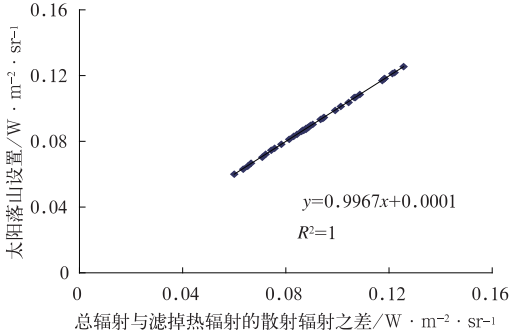


图 1 两种参数设置下计算的热辐射结果关系图

横坐标: $sunz=35^\circ, satz=35^\circ, azu=60^\circ, nothrm=-1$
(或 1)、 $H=2\text{ km}, \alpha=0.15, \tau=2, 4, 8, \dots, 64,$
 $r_e=2, 4, 8, \dots, 64$; 纵坐标: $sunz=95^\circ,$
 $nothrm=-1$, 其他参数设置与横坐标同

Fig. 1 Thermal radiation results calculated by model under two parameter settings

Horizontal axis: $sunz=35^\circ, satz=35^\circ, azu=60^\circ,$
 $nothrm=-1$ (or 1)、 $H=2\text{ km}, \alpha=0.15,$
 $\tau=2, 4, 8, \dots, 64, r_e=2, 4, 8, \dots, 64$; vertical axis:
 $sunz=95^\circ, nothrm=-1$, other parameters are the same as those of horizontal axis

2 FY-2C 中红外通道(3.5~4.0 μm)辐射值特性分析

图2展示的是大气上界太阳辐射光谱及假设地

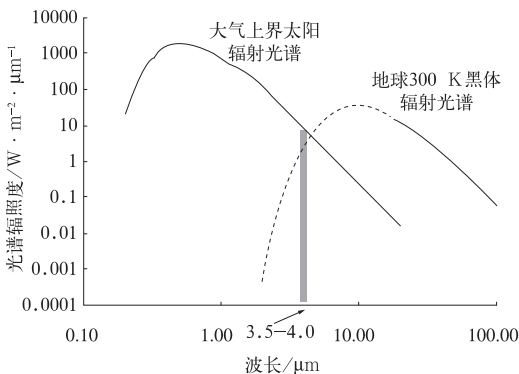


图 2 大气上界太阳入射及地球黑体辐射光谱曲线

Fig. 2 The incident solar radiation at the top of the atmosphere and the earth's blackbody radiation

球为 300 K 时的黑体辐射光谱曲线,可以看到中红外波段处于两条曲线的交点附近,对应的光谱辐照度数据量级相当,因此对卫星而言,中红外通道波段处于太阳与地球辐射强度基本相同的区域,卫星在该通道的探测一般为总辐射值, FY-2C 卫星中红外 4 通道(3.5~4.0 μm)也是如此。为充分发挥 FY-2C 卫星在遥感探测中的应用,获得高时间分辨率的云微物理参数,以下结合辐射传输模式对该卫星中红外通道辐射特性进行分析,进而探讨其对粒子有效半径的敏感性。

2.1 辐射及散射辐射分析

地球和太阳的辐射光谱中,红外波段的辐射能量因波长的不同而有所差异,表 1 为部分可见光、中红外、红外波长的大气上界太阳入射光谱辐照度及地球黑体(300 K)光谱辐照度数据^[15],可以看到在可见光波长 $\lambda=0.6\ \mu\text{m}$ 处太阳光谱辐照度远大于地球黑体光谱辐照度,两者数值上相差 29 个量级; $\lambda=100.0\ \mu\text{m}$ 时,地球黑体光谱辐照度远大于太阳光谱辐照度,二者相差 7 个量级,而中红外波长 $\lambda=3.7\ \mu\text{m}$ 处,太阳光谱与地球或云光谱辐照度仅相差一个量级,二者在数值上基本比较接近。

表 1 太阳与地球光谱辐照度数据表

Table 1 Irradiance data from the sun and the earth

光谱辐照度 $/W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$	可见光 $\lambda=0.6\ \mu m$	中波红外 $\lambda=3.7\ \mu m$	远红外 $\lambda=10.0\ \mu m$	极远红外 $\lambda=100.0\ \mu m$
太阳	1.7632×10^3	1.1670×10^1	2.4702×10^{-1}	2.6459×10^{-5}
地球或云	9.2859×10^{-26}	1.267016×10^0	3.1183×10^1	6.0815×10^2

表 2 给出了在一定参数设置下运用 SBDART 辐射传输模式计算的 FY-2C 中红外通道散射辐射值($\tau=16$),可以看到热辐射部分随粒子有效半径增大稍有增加,但变化不大,散射部分则随云粒子有效半径的增加有较大减小,但总体上这两个值在量级上是相当的。因此可以得到有云时云体的红外热发射、透过薄云层到达大气上界的地面辐射、云粒子对太阳光谱的反射及散射辐射对 FY-2C 卫星中红外通道观测到的总辐射都有贡献。Rosenfelda 等^[3]指出有降水潜力的雨云顶部包含较多的大云滴或冰晶粒子,它们对太阳光谱的反射辐射很小,卫星接收到的辐射值以云或下垫面的热发射辐射为主。本文后面的分析暂把云顶粒子对太阳的反射及粒子的散射

并称散射辐射,这样卫星接收到的总辐射可以认为仅包含散射与热发射辐射两个分量。

表 2 模式计算的中红外波长散射辐射值
Table 2 The scattering irradiance of mid-infrared wavelength calculated by model

光谱辐照度 $/W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$	$r_e=4 \mu m$	$r_e=8 \mu m$	$r_e=16 \mu m$	$r_e=32 \mu m$
总辐射	2.74112	1.808448	1.05888	0.748224
热辐射	0.451462	0.501197	0.55415	0.573005
散射辐射	2.288896	1.306304	0.503552	0.173939

2.2 敏感性分析

运用 SBDART 模式模拟计算 FY-2C 中红外通道在不同光学厚度和粒子有效半径等参数设置下获得的总辐射、热辐射及散射辐射,分析三者与粒子有效半径之间的关系。

图 3 显示的是模式计算的 FY-2C 中红外通道总辐射值与 τ 和 r_e 的关系,可以看到当 τ 约小于 8 时,该通道总辐射值因 r_e 的大小有不同的变化趋势: $r_e=2$ 或 $4 \mu m$ 时总辐射值随 τ 的增大而增大,曲线呈上扬趋势, $r_e=16,32$ 时总辐射值随 τ 的增大而减小,曲线呈下降趋势。 τ 大于 8 时,不同 r_e 对应的通道总辐射值随 τ 的增大几乎不再改变,曲线基本呈平直状态;说明该通道总辐射对光学厚度的变化不十分敏感, τ 值的增减不会引起总辐射值明显的改变。而当 τ 为定值时,不同的 r_e 对应的通道总辐射有较大差异,总辐射值随 r_e 的增大明显减小,因此可以得到,总辐射值对 r_e 的变化反映灵敏,不同的总辐射值对应着不同大小的粒子有效半径,说明该通道总辐射值可以反映 r_e 的变化信息,可以用于

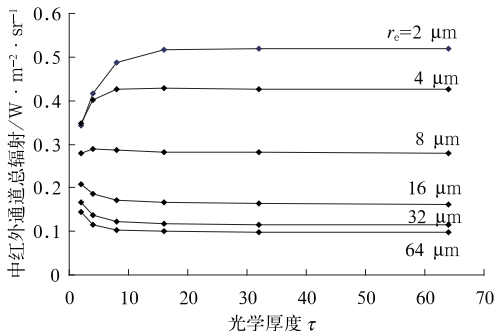


图 3 3.7 μm 通道总辐射与 τ 及 r_e 的关系图
 $sunz=35^\circ, satz=35^\circ, azu=60^\circ,$
 $nothrm=-1, H=2 \text{ km}, \alpha=0.15$

Fig. 3 The relationships of τ, r_e and the total radiation from 3.7 μm channel

遥感反演。

由于中红外通道总辐射既包含热辐射的贡献也包括反射及散射辐射的贡献,下面分别分析这两者对有效粒子半径的敏感性。

图 4、图 5 显示的是散射辐射及热辐射分别与 τ 和 r_e 的关系。图 4 中可以看到散射辐射值随 τ 和 r_e 的变化与图 3 有相似的规律:一定 r_e 条件下散射辐射随 τ 的增加变化不明显,而相同 τ 下散射辐射随 r_e 的增大显著减小。图 5 中热辐射值先随 τ 的增大而缓慢减小,至一定 τ 值后曲线趋于平缓,因此可以得到:FY-2C 中红外通道散射辐射及热辐射对 τ 的变化都不敏感。与总辐射类似,散射辐射与热辐射在一定 τ 值下都随 r_e 的增大而减小,散射辐射的变化要明显于热辐射的改变,说明散射辐射、热辐射及总辐射对云滴粒子半径的变化都具有敏感性。

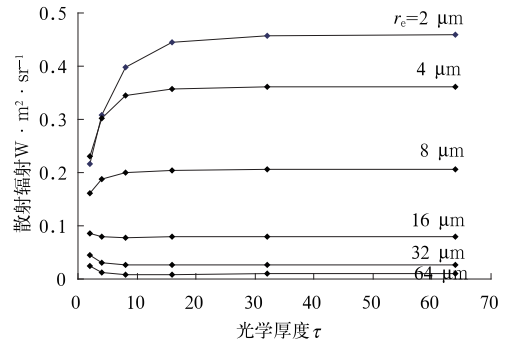


图 4 3.7 μm 通道散射辐射与 τ 及 r_e 的关系图
($sunz=35^\circ, satz=35^\circ, azu=60^\circ,$
 $nothrm=1, H=2 \text{ km}, \alpha=0.15$)

Fig. 4 The relationships of τ, r_e and the scattering radiation from 3.7 μm channel

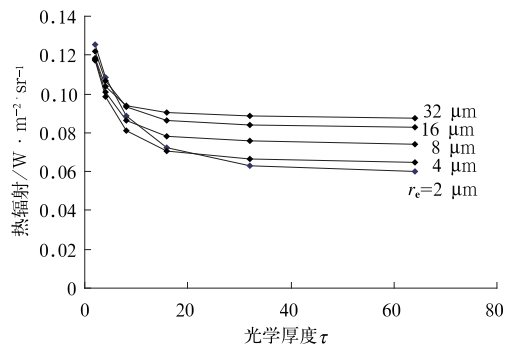


图 5 3.7 μm 通道热辐射与 τ 及 r_e 的关系图
 $sunz=95^\circ, satz=35^\circ, azu=60^\circ,$
 $nothrm=-1, H=2 \text{ km}, \alpha=0.15$

Fig. 5 The relationships of τ, r_e and the thermal radiation from 3.7 μm channel

为了选择一种通道辐射值反演粒子有效半径,下面对三种辐射数据进行定量比较,选用相同光学厚度下,相同粒子半径变化(2~64 μm)对应的辐射变化值作为对比标准,用下式来计算:

$$\Delta = R_{\max}^i - R_{\min}^i \quad (1)$$

i 代表一定的光学厚度值, R_{\max} 、 R_{\min} 分别代表此光学厚度下有效半径由 2 变到 64 μm 对应的总辐射、热辐射和散射辐射的最大和最小值,结果如表 3 所示,

表 3 不同状况下各种辐射随有效半径变化的比较

Table 3 The comparisons of radiation's changes followed by r_e under different conditions

光谱辐照度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	$\tau=2$	$\tau=4$	$\tau=8$	$\tau=16$	$\tau=32$	$\tau=64$
总辐射	1.305536	1.930752	2.450112	2.66953	2.70071	2.7075
热辐射	0.051008	0.06295	0.086336	0.125958	0.162374	0.176838
散射辐射	1.3115136	1.900896	2.48548	2.786252	2.863742	2.885046

2.3 散射占总辐射的比重分析

不同状态或种类的云存在时,散射辐射及热辐射的重要程度不同,如图 6 所示,散射辐射占总辐射的比重随 τ 的变化而变化不大,在 $\tau > 8$ 时几乎没有改变,而随有效粒子半径的变化而变化明显: r_e 约大于 10 μm 以上时,散射辐射占总辐射的 50% 以下,而 r_e 较小低于 4 μm 时,散射辐射占总辐射的比重达到了 80% 以上,这与 MODIS 云反演说明^[12] 有相似的规律,可以解释为粒子半径越大,对太阳光谱的反射越小,而粒子半径小对太阳光的反射及散射都相应增大。

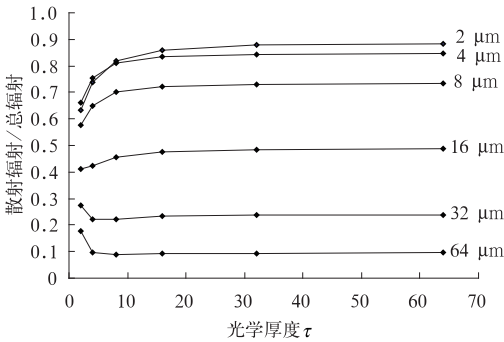


图 6 散射在总辐射中的比重与 τ 及 r_e 的关系图

$\text{sat}z=35^\circ$ 、 $\text{azu}=60^\circ$ 、 $H=2 \text{ km}$ 、 $\alpha=0.15$

Fig. 6 The relationships of τ , r_e and

the ratio of scattering and total radiance

散射辐射占总辐射的比重小时对应着热辐射作用更明显,而热辐射对粒子半径的变化敏感性不大,

可以看到总体上相同参数设置下散射辐射值随 r_e 变化而发生的改变要显著于其他两种辐射值的改变,说明在相同状况下,散射辐射对云滴粒子有效半径的敏感性更大,在其他参数设置下计算的结果也有类似的规律,在此不一一列举,因此可以得到, FY-2C 中红外通道散射辐射值对粒子有效半径的变化更为敏感,更适合用于反演。

因此有必要对各种云况下 FY-2C 中红外通道的热辐射值进行处理,以获得对粒子变化敏感性大的散射辐射进行反演。

3 移除热辐射项的方法讨论

白天时, FY-2C 分裂窗区 1 通道(10.3~11.3 μm)及中红外 4 通道(3.5~4.0 μm)同时接收来自下垫面或云体发射的热辐射,运用 SBDART 模式可对这一过程进行模拟。通过一定的参数设置可以计算各种不同云状况(薄云、厚云等)及地面温度、地表反照率等条件下两通道分别接收到的辐射及热辐射值(设置 $\text{sun}z$ 角度大于 90° 来实现),对两通道的计算结果进行拟合处理可以得到二者之间的经验关系式,这样可为实际应用提供从分裂窗区 1 通道(11 μm)数据估计 3.7 μm 通道热辐射分量的方法。

在模式介绍中有些参数可能对相应通道的计算结果没有影响,因此先用 SBDART 模拟计算分析两个通道分别对各个因子的敏感性,根据敏感性大小来选择性地设置输入参数值,这样可以减少计算量同时又不影响对计算结果的处理分析。

3.1 中红外通道(3.5~4.0 μm)热辐射值与各因子的关系

用 SBDART 模式计算不同散射几何($\text{sat}z$, azu)及云顶高度等条件下 FY-2C 中红外通道的热

辐射值,结果见图 7。从图 7(a~e)可以看到:(1)热辐射值与相对方位角及地面反照率值的设置基本无关,这两者值的变化不会引起计算热辐射值明显的改变;(2)热辐射值随相对方位角的变大而相应减小,这属于“临边变暗”现象,可以解释为受地球曲率的影响,越远离卫星的星下点,探测路径越长,大气衰减越严重,探测值就越小,被卫星接收到的热辐射值就越小;(3)地面温度升高,发射的热辐射增大,若云层较薄,地面辐射会透过薄云层到达大气上界被卫星接收;(4)总的趋势为热辐射值随云顶高度的升高而减小,可以解释为云顶高度升高,温度降低,热发射辐射值相应减小。

3.2 红外分裂窗 1 通道($10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$)辐射值与各因子的关系

用 SBDART 模式计算不同散射几何 (sat_z , azu) 及云顶高度等条件下 FY-2C 红外分裂窗 1 通道接收的辐射值,图 8a 显示的是辐射值与太阳天顶角之间的关系,可见辐射观测值基本不随太阳天顶角的变化而有所改变,可以解释为太阳为短波辐射,其对 $11 \mu\text{m}$ 长波红外通道的探测辐射贡献很小,近似可以忽略;图 8(b~e)显示的是该通道与第 3.1 节中的各因子关系,分析可见有相似的规律,在此不一列举。

3.3 计算拟合

根据上述分析选择云等参数的初始设置值如下: $r_c=2, 4, 8, \dots, 64$; $\tau=2, 4, 8, \dots, 64$; $H=2, 3, 4, \dots, 10 \text{ km}$; $\alpha=0.15$; $sun_z=35^\circ$; $azu=60^\circ$; $sat_z=5, 10, 15, \dots, 60^\circ$; $T=280 \text{ K}, 285, \dots, 305 \text{ K}$ 。在本文的实验中,地面温度暂未能获得实时的与静止卫星资料相匹配的格点数据,而云顶高度可以通过一定的方法实现(如参考文献[17]等),因此对两通道的计算结果按照不同的云顶高度分别拟合,之后再对拟合出的公式系数与云顶高度拟合,可以得到任何云顶高度情况下的经验公式:

$$Y = 1.4339e^{-0.1659H} \ln(X) - 3.4479e^{-0.2541H} \quad (2)$$

式中 H 代表实际云顶高度, X 代表 FY-2C 卫星 $11 \mu\text{m}$ 通道实测的辐射值(卫星遥感数据服务网直接提供的原始数据为亮度温度 TBB,可以通过普朗克函数转换为辐射值, $3.7 \mu\text{m}$ 通道同), Y 即为对应的

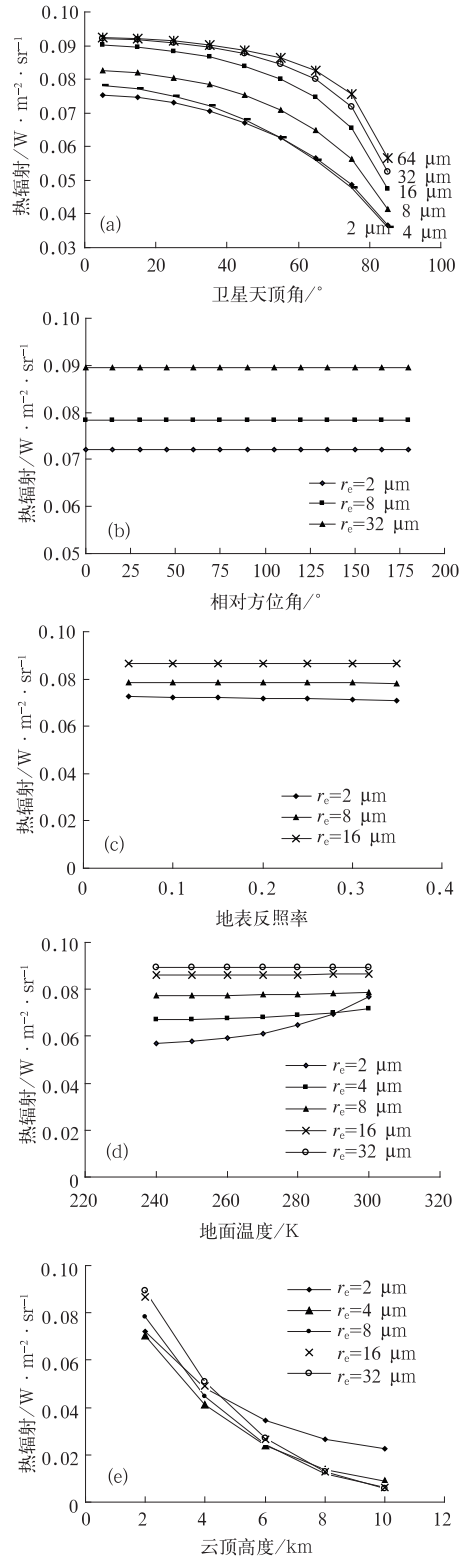


图 7 中红外通道热辐射值与各个因子关系图
卫星天顶角, (b) 相对方位角, (c) 地表反照率,
(d) 地表温度, (e) 云顶高度

Fig. 7 The relationships of thermal radiation and other factors

(a) sat_z , (b) azu , (c) α , (d) T , (e) H

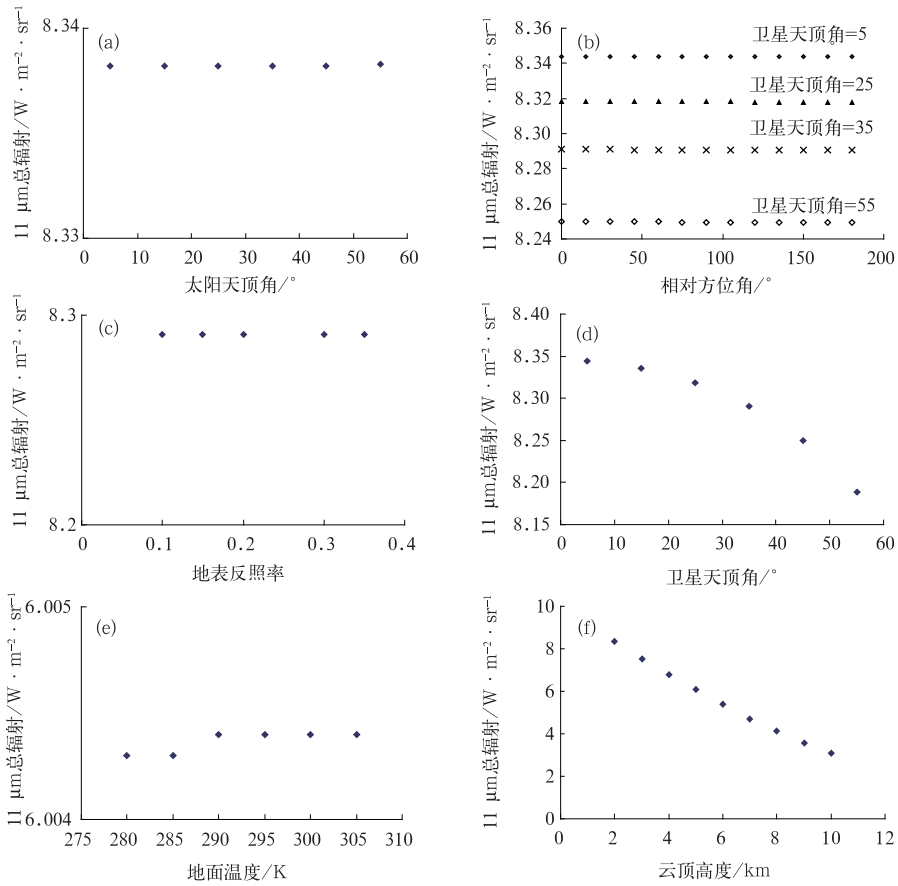


图 8 热辐射与各个因子关系图

(a) 太阳天顶角, (b) 相对方位角, (c) 地表反照率, (d) 卫星天顶角, (e) 地面温度, (f) 云顶高度

Fig. 8 The relationships of thermal radiation and other factors

(a) sunz, (b) azu, (c) α , (d) satz, (e) T, (f) H

3.7 μm 通道热辐射值。不同云高拟合公式的相关系数最小为 74.82%, 最大为 90.69%, 系数与云高拟合的相关系数也达到了 99% 以上, 拟合效果较好。图 9 给出 11 μm 通道辐射与 3.7 μm 通道热辐

射的关系。

4 拟合算式的验证

为了验证拟合算式的准确性, 采用回代法即把相应的云顶高度数据回代入式(2), 将计算结果与模式计算的原始热辐射值对比, 做成散点图(图 10), 实线为线性拟合直线 $Y=A+B \times X$, 其参数如表 4 所示。

对相关系数进行统计检验, 发现通过了 95% 的信度检验, 说明拟合算式具有一定的合理性。对于公式中云顶高度的确定, 很多学者都做过相关工作, 如李娟等^[16]利用 GMS-5 卫星结合辐射传输模式迭代或运用经验公式反演过云顶高度, 并与北京地区一次人工增雨作业的飞机卫星观测资料进行对比, 效果较好; 黄磊等^[17]曾通过双星立体观测中卫星-投影云-真云的平面和球面三角几何关系推导出真

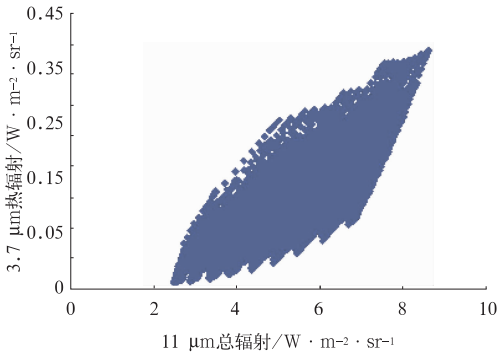


图 9 各种参数设置下的 11 μm 通道辐射与 3.7 μm 通道热辐射关系图

Fig. 9 The relationships of thermal radiation from 11 and 3.7 μm channels under different parameter settings

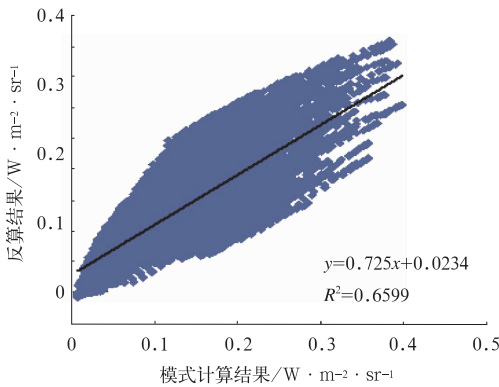


图 10 模式计算数据与回代公式计算数据关系图

Fig. 10 The relationships of the results calculated by model and formula

表 4 线性拟合直线参数

Table 4 Parameters for linear fitting

参数	值	误差
A	0.02345	4.29976E-4
B	0.72587	0.00341
R	0.81233	
SD	0.03792	
N	23328	
P	<0.0001	

云云顶高度计算公式,并通过对具有台风和冷锋形态分布的卫星红外云图模拟资料进行实验,得出平均垂直高度误差不超过 500 m 的云顶高度;林琳等^[18]也运用 CO₂ 薄片算法(截断法)结合 MODIS 原始数据对云顶高度做了计算。因此实际应用中选取方法确定云高之后即可以运用文中的经验公式来扣除中红外通道热辐射,进而用散射辐射部分对有效粒子半径进行反演。

5 结论及讨论

(1) 在中红外波长(3.7 μm 左右)处,太阳、地球的黑体光谱辐照度与 SBDART 模式计算的粒子散射辐射数值大小近似,量级相当,使得 FY-2C 卫星上该通道获得的辐射值中既有云及下垫面热发射辐射贡献同时也有反射太阳辐射及粒子散射辐射的贡献。卫星观测的是一个总辐射值。

(2) 运用 SBDART 辐射传输模式模拟计算 FY-2C 卫星中红外通道(3.5~4.0 μm)的总辐射、热辐射及散射辐射数据,分析得到散射辐射值对云

滴粒子有效半径的敏感性更大,更适合用于反演。

(3) 提出运用红外分裂窗数据来估计中红外通道热辐射值的方法:运用模式模拟计算多种参数设置下 FY-2C 卫星红外分裂窗 1 通道及中红外 4 通道的辐射及热辐射值,对二者数据按照云顶高度区分分别拟合得到经验关系式,再对关系式的系数与云顶高度拟合,得到中红外 4 通道热辐射值与红外分裂窗 1 通道辐射值之间的经验关系式;运用回代法验证拟合关系式具有一定的合理性。

(4) 今后的工作中考虑选取合适的个例并选用确定云顶高度的方法,结合实测的 FY-2C 红外分裂窗 1 通道数据,运用拟合的经验公式计算中红外通道散射辐射值来反演云滴粒子有效半径,计算结果可以跟其他的卫星遥感反演产品如 MODIS 或 CloudSat 云反演产品^[19] 比对,验证本文的方法在实际个例反演中的可行性,进而应用到业务中。

参考文献

- [1] Arking A, and Childs J D. Retrieval of cloud over parameters from multispectral satellite images[J]. J Climate Appl Meteor, 1985; 24:322-333.
- [2] Nakajima T, King M D. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1990, 47:1878-1893.
- [3] Nakajima T, Spinhome J D, Radke L F. 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, 1991, 48:728-750.
- [4] Rosenfeld D and Gutman G. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data[J]. Atmospheric Research, 1994,34:259-283.
- [5] Steven Platnick, Michael D King. The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra. IEEE transactions on geoscience and remote sensing[J]. Aqua Spacial Issue, 2003; (41), 459-473.
- [6] Kazuaki Kawamoto. Retrieval of optical thickness and effective particle radius of thin low-level water clouds using the split window of Meteosat-8[J]. SOLA, 2006,2:144-147.
- [7] 赵凤生,丁强,孙同明. 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, 2002, 60(5): 594-601.

- [8] 刘健,董超华,张文建. 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, 2003, 22: 436-440.
- [9] 陈英英,周毓荃,杨军. 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, 2007, 33(): 29-34.
- [10] 周毓荃,陈英英,李娟,等. 用 FY-2C/ D 卫星等综合观测资料反演云物理特性产品及检验[J]. 气象, 2008, 34(12): 27-35.
- [11] 陈英英,唐仁茂,周毓荃,等. FY-2C/ D 卫星微物理特性参数产品在地面降水分析中的应用[J]. 气象, 2009, 35(2): 16-18.
- [12] Michael D King. Cloud Retrieval Algorithms for MODIS: Optical Thickness, Effective Particle Radius, and Thermodynamic Phase [OL]. <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd.mod05.pdf>
- [13] Thomas J Kleespies. The retrieval of marine stratiform cloud properties from multiple observations in the 3.9 μm window under conditions of varying solar illumination[J]. J Appl Meteor, 34, 1512-1524.
- [14] Paul Ricchiazzi, Shiren Yang. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79: 2101-2114.
- [15] LIU K N. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 57.
- [16] 李娟,毛节泰. GMS-5 卫星资料反演云的物理特性及其在人工影响天气中的应用[J]. 气象学报, 2005, 63(增刊): 47-55.
- [17] 黄磊,吕胜辉,张森,等. 双星立体观测云顶高度几何反演方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 129-134.
- [18] 林琳,黄思训,杜华栋. MODIS 数据的云顶高度反演[J]. 地球信息科学, 2006, 8(2): 106-109.
- [19] 马占山,刘奇俊,秦琰琰,等. 云探测卫星 CloudSat[J]. 气象, 2008, 34(8): 104-111.

征稿简则

- 《气象》主要刊登气象科学研究领域的综合评述及研究论文;天气、气候诊断分析与预报技术;气象业务技术及业务现代化建设经验;气象灾害的规律及防灾减灾决策;公共气象服务和专业气象服务技术方法;气象科技信息动态等。
- 来稿注意事项
 - 来稿务必论点明确,数据可靠,文字精炼。文章的书写顺序为:中文题目(不超过 20 个汉字)、作者姓名、单位名称、邮政编码、中文提要(200~300 字)、关键词(3~8 个);英文题目、作者姓名、单位名称、邮政编码、英文提要及英文关键词;引言;正文;结论和讨论;致谢;参考文献。文章首页页脚处附作者信息,即姓名、从事专业工作和研究方向。Email 等。
 - 正文标题用阿拉伯数字连续编号,不同层次数字间用圆点间隔,如“1”,“1.2”,“2.1.3”等。标题左顶格,在数字编号后空一格再写标题,末尾不加标点符号。
 - 基金资助的研究项目,请注明省部级以上基金名称和项目编号。
 - 文稿的单位制采用《中华人民共和国法定计量单位》。图、表中量和单位间用“/”隔开,表示物理量的符号用斜体表示,并注意文种、大小写、正斜体、上下角码等。
 - 科技术语和名词应使用全国自然科学名词审定委员会公布的名词。
 - 文稿只附必要的图表。图、表要求准确,清晰,美观。在文中相应的位置插入图、表。图、表附相应的中英文图题、表题。附表请使用三线表。
 - 参考文献按在文内出现顺序连续编码。在期刊上发表的文献书写格式为:[序号] 作者姓名(列出前 3 位). 题名[J]. 期刊名,年,卷(期):页码. 在专著、教科书上发表的文献书写次序为:[序号] 作者姓名. 译者姓名. 文题名. 书名[M]. 出版地:出版社,出版年:页码。
- 请勿一稿两投。本刊一般不退稿,若 6 个月内未见刊用通知,可自行处理。
- 本刊收取发表费,并付稿酬,所付稿酬包含纸质版、数字版稿酬和刊物内容网络服务报酬等。凡不同意将其稿件纳入此两种版本进行交流者,请书面说明。
- 通讯地址:北京市中关村南大街 46 号《气象》编辑部 邮政编码:100081
网上投稿地址: <http://219.234.83.5>
电话:(010)68407936 58993789 68407336 Email:qixiang@cams.cma.gov.cn