

刘浩,周毓荃. 2013. 云的垂直非均一性对卫星 3.7 μm 通道反射率的影响. 气象, 39(1): 80-87.

云的垂直非均一性对卫星 3.7 μm 通道反射率的影响^{* 1}

刘 浩¹ 周毓荃²

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

提 要: 卫星 3.7 μm 通道被广泛用于反演云粒子有效半径。为了解云的垂直非均一性对该通道反射率的影响, 作者基于 SBDART 辐射传输模式, 分别计算了有效粒子半径垂直连续变化分布下和垂直分层均一分布下的 3.7 μm 反射率。结果表明对于有效粒子半径垂直连续变化分布的云, 当云比较薄(光学厚度小于 10)时, 如果把有效粒子半径垂直非均一的云当作垂直均一的云进行反演, 会出现一定的误差, 该误差随着光学厚度的增大而减小。当云足够厚(光学厚度大于 10)时, 该误差小于 10%, 可以认为此处云粒子垂直结构的变化对 3.7 μm 通道反射率没有影响。对于有效粒子半径垂直分层均一分布的云, 当光学厚度比较大时, 只有靠近云顶的“浅层”(即有效辐射层, 其光学厚度约为 3~10)的云参数变化才能对 3.7 μm 反射率产生影响。有效辐射层的光学厚度与云上层有效粒子半径、太阳天顶角和卫星天顶角等因素呈反相关, 与相对方位角无明显的联系。

关键词: 3.7 μm 通道反射率, 粒子有效半径, 辐射传输模式, 有效辐射层, 非均一性

中图分类号: P414

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.01.010

The Effects of Cloud's Vertical Inhomogeneity on the Reflectance of 3.7 μm Channel

LIU Hao¹ ZHOU Yuquan²

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: The satellite's 3.7 μm channel is widely used in the retrieval of cloud droplet effective radius. In order to know the effects of cloud droplets' vertical inhomogeneity on the reflectance of this channel, based on the SBDART radiative transfer scheme, the 3.7 μm reflectance is calculated separately for two particle profiles, the droplet effective radius in the vertical stratified homogeneous distribution and the droplet effective radius in the vertical continuous changing distribution. For the first type, if it is the thin cloud (optical thickness less than 10), there will exist obvious errors when the effective radius of vertical inhomogeneous cloud is retrieved as the vertical homogeneous cloud, and the error decreases with the increase of the optical thickness. If the cloud is thick enough (optical thickness greater than 10), the error will be less than 10%. In this case, we can regard that the changes of cloud droplets' vertical structure do not influence the reflectance of 3.7 μm channel. For the second type, the results show that when the optical thickness is large, the 3.7 μm reflectance only can be affected by the cloud parameters near the cloud top's "shallow" part (effective radiation layer, whose optical thickness is about 3-10). There exists

* 国家高新技术 863 课题(2012AA120902)资助

2012 年 3 月 27 日收稿; 2012 年 9 月 5 日收修定稿

第一作者: 刘浩, 主要从事大气物理与大气遥感方面的研究. Email: lqlhao612@126.com

通信作者: 周敏荃, 主要从事云降水物理、人工影响天气和遥感反演分析的研究. Email: zhouyq05@163.com

negative correlation between the optical thickness of effective radiation layer and the droplet effective radius near cloud top, the solar zenith angle and satellite zenith angle, but there has no obvious relation between the optical thickness and the relative azimuth angle.

Key words: reflectance of 3.7 μm channel, droplet effective radius, radiative transfer mode, effective radiation layer, inhomogeneity

引言

云强烈地影响地气系统中的热力平衡和水循环过程,在全球气候及其变化中扮演重要角色。在对云辐射的研究中,云光学厚度 τ 和云粒子有效半径 r_e 是两个重要参数,鉴于它们对太阳反射和吸收性质的敏感性(Chandrasekhar, 1960),可以通过可见光波段和近/中红外波段的反射率来分别反演。

传统的云粒子有效半径反演方案中假定存在垂直均一的平面平行云,即有效粒子半径不随高度变化。最有代表性的是由 Nakajima 等(1990)提出的利用 0.75 和 2.16 μm 通道同时反演云的光学厚度和云粒子有效半径的算法。NOAA-AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)发射后,3.7 μm 通道被广泛用于反演云粒子的有效半径(Kaufman et al, 1993; Han et al, 1994; Platnick, 2000; 许健民等, 2010; 李俊等, 2012),赵凤生等(2002)建立了一种利用 AVHRR 的 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 双通道资料同时反演水云的光学厚度和有效粒子半径。李娟等(2005)利用 GMS-5 静止卫星资料,通过模拟分析,提出了初步反演云顶部物理特性的方法,陈英英等(2007)基于 SBDART(Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer)辐射传输模式,利用 FY-2C 第 3.7 μm 通道资料反演了水云粒子的有效半径,并与 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)的相应产品作了比较,发现两者具有较好的时空分布一致性。刘香娥等(2010)用 SBDART 辐射传输模式模拟计算了 FY-2C 中 3.7 μm 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粒子有效半径的敏感性,提出了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。

但理论和观测结果显示,云滴分布存在一定的

垂直结构,如 Slingo 等(1982)等研究了海上积层云的飞机观测数据,发现云粒子半径和液水含量有垂直结构,黄梦宇等(2005)研究了大量飞机观测云滴谱资料,发现在层状云中,云滴有效半径从云底向上有增大的趋势。Chang 等(2002)假定有效粒子半径在垂直方向上呈线性变化,并提出了用多个近红外通道选取最佳线性廓线的方法,还进一步提出,当云非常厚且云粒子有效半径廓线非线性时,对云底处有效粒子半径的计算会有很大的不确定性,因为卫星接收到的云底信号很弱。Chen 等(2007)提出了一个用 3.7、2.1 和 1.6 μm 通道联合反演云粒子有效半径垂直廓线的方法并用此法提升了 LWP 的计算精度。

虽然 3.7 μm 波段被广泛用于云粒子有效半径的反演,但由于云粒子对该波段有很强的吸收,因此 3.7 μm 反射率只对靠近云顶的云粒子有效半径的变化敏感(Platnick et al, 2000)。基于此,3.7 μm 的反演方法对有效粒子半径垂直均一分布的云具有一定的合理性,对有效粒子半径垂直非均一的云,反演结果可能只代表云顶附近的一个浅层,而不能反演整层云的性质。

本文首先利用 SBDART 辐射传输模式,计算了不同有效粒子半径和光学厚度分布下的 3.7 μm 通道的反射率。具体设计了以下情形:(1)有效粒子半径垂直连续变化分布;(2)有效粒子半径垂直分层均一分布。此外,还通过有效粒子半径垂直非均一的云与有效粒子半径垂直均一的云进行反演结果的对比,计算了把后者当作前者反演时的误差,分析了影响该误差的因素。

1 工具介绍

SBDART(Ricchiazzi, 1998)是一个用于计算平面平行大气条件下的辐射传输计算软件。在该计算程序中,散射、分子吸收和热辐射过程同时存在。SBDART 包含了影响紫外、可见光和红外辐射场的各种重要过程,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,也可以用于进行敏感性实验,最关键的是它提供了有关角度(如太阳天顶角、卫星天顶角和相对方位角等)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。

文中运用 SBDART 模式模拟计算有云状况下卫星中红外通道散射辐射值,需改动或设定的参数有:云层的高度 h 、光学厚度 τ 、云粒子有效半径 r_e 、太阳天顶角 sza 、卫星天顶角 $uzen$ 、太阳与卫星之间的相对方位角 ϕ 、地表反照率 $albcon$ 、计算辐射类型 $nothrm$ 、大气廓线 $idatm$ 、卫星通道响应函数 $isat$ 、输出项选择 $iout$ 等。

SBDART 中, r_e 垂直廓线函数如下:

$$r_e(h) = r_{e0} \times \left(\frac{r_{e1}}{r_{e0}}\right)^{(h-h_0)/(h_1-h_0)} \quad (1)$$

其中 h 是高度, h_0 是云底高度, h_1 是云顶高度,单位为 km 。 r_{e0} 是云底处的有效粒子半径, r_{e1} 是云顶处的有效粒子半径,单位为 μm 。

此外,模式中还可以设置每层均匀但多层叠加的情形。

2 有效粒子半径垂直分布对 $3.7 \mu\text{m}$ 反射率的影响

为了研究有效粒子半径的垂直分布对 $3.7 \mu\text{m}$ 反射率的影响,本节利用 SBDART 辐射传输模式模拟云顶有效粒子半径为 $16 \mu\text{m}$,云底有效粒子半径为不同值时的 $3.7 \mu\text{m}$ 反射率。

2.1 不同有效粒子半径廓线下的 $3.7 \mu\text{m}$ 反射率

对于非降水的层状云,由于其垂直运动很弱,所以云粒子的增长主要依靠凝结而非碰并。在云底部,温度高,云滴凝结相对较少,而在云顶部,温度低,云滴凝结相对较多。因此对于非降水的层状云,云粒子尺度随高度增大。如 Hallett 等(1974)所述,对于明显的降水来说,云滴的有效半径至少要达到 $12 \mu\text{m}$ 。基于上述理论,本节模拟非降水的层状云,云顶有效粒子半径为 $16 \mu\text{m}$,设定云粒子有效半径随高度增加。由于卫星 $3.7 \mu\text{m}$ 通道白天所测的辐射来自对太阳辐射的反射和自身的热辐射两个部

分,后者在反演云粒子有效半径时实际上是一种干扰,要设法先去除掉,再用单纯的散射辐射的信息来反演。因此本文在计算时将计算辐射类型 $nothrm$ 设置成 1,即没有热辐射的情形。具体参数如表 1 所示。

表 1 不同 r_e 分布下,计算 $3.7 \mu\text{m}$ 反射率时的参数设置

Table 1 Parameter settings in the computation of the $3.7 \mu\text{m}$ reflectance (for different r_e profile)

参数	数值	
云底高度/km	1	
云顶高度/km	3	
地表反照率 albcon	0.15	
大气廓线 idatm	2	
太阳天顶角 $sza/^\circ$	30	
卫星天顶角 $uzen/^\circ$	35	
相对方位角 $\phi/^\circ$	30	
计算辐射类型 nothrm	1	
输出项选择 iout	20	
云的光学厚度 tcloud	0~64	
云粒子有效半径 nre/ μm	云顶	16
	云底	2、4、8、16

由式(1)可知,当云顶、云底高度和云顶有效粒子半径恒定,云底有效粒子半径的不同对应不同的有效半径垂直廓线,这三种情况下,粒子有效半径随高度的变化曲线如图 1 所示。

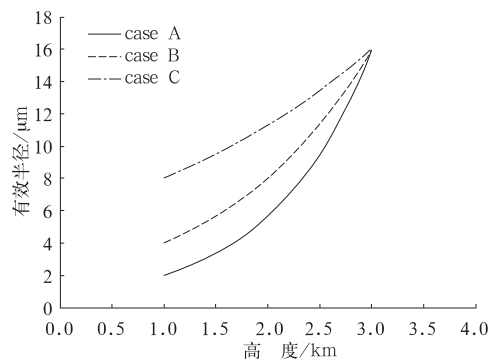


图 1 A、B、C 三种情况下有效粒子半径随高度变化示意图

(A 廓线:云底 r_e 为 $2 \mu\text{m}$,云顶 r_e 为 $16 \mu\text{m}$,
B 廓线:云底 r_e 为 $4 \mu\text{m}$,云顶 r_e 为 $16 \mu\text{m}$,
C 廓线:云底 r_e 为 $8 \mu\text{m}$,云顶 r_e 为 $16 \mu\text{m}$)

Fig. 1 Changes of effective radius with height in three cases A, B and C

另外,取有效粒子半径随高度均一分布,且为 $16 \mu\text{m}$ 的情况作为对比,记为廓线 D。为了研究这四种 r_e 分布下云的辐射性质,将表 1 中的参数输入 SBDART 辐射传输式计算不同光学厚度 τ 和这四

种有效粒子半径垂直分布条件下的 3.7 μm 波段反射率,结果如图 2 所示。

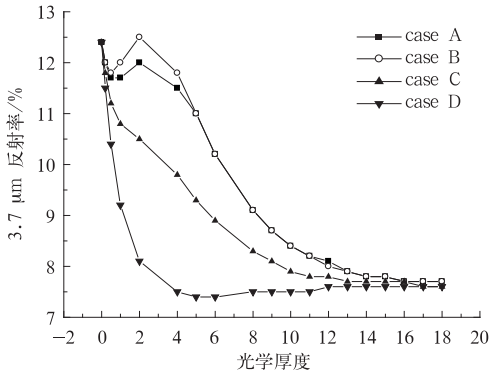


图 2 不同云粒子有效半径垂直分布条件下,云光学厚度与 3.7 μm 通道反射率的关系图

Fig. 2 Under the conditions of effective radius' different vertical distribution, the relationship between optical thickness and the 3.7 μm reflectance

分析图 2 可知,3.7 μm 通道反射率受 r_e 垂直分布和云光学厚度的影响十分显著。case A 和 case B 在光学厚度为 0~1 时,反射率下降,这是因为光学厚度为 0 时体现的是地表的反射率,随着云光学厚度的增加,对地表产生了遮挡(此时云的反射率小于地表反射率),因此此时反射率随着云光学厚度的增加而降低。case A 和 case B 在光学厚度为 1~3 时,随着云光学厚度的增大,云的反射率也随之增加,这是因为随着云越来越密实,云体反射率增大。当光学厚度大于 3 时,随着云光学厚度的增大,云的反射率随之减小,这是因为随着云光学厚度的增加,卫星接收到的辐射是靠近顶层的大粒子的辐射,而大粒子的辐射偏小,导致反射率随光学厚度的增加而减小。对于 case C 和 case D,由于这两种情况下云底有效粒子半径比前两种情况小很多,因此反射率也会比地表反射率小很多,综合看来,3.7 μm 反射率随光学厚度的增加呈不断减小的趋势。综上所述,当光学厚度为 0 时,3.7 μm 反射率体现的是地表的反射率,随着光学厚度的增大,3.7 μm 反射率体现的是地表反射率和云反射率的综合结果,当光学厚度大到一定程度时,云体对地表完全遮挡,此时 3.7 μm 反射率体现的是云的反射率。

由不同颜色曲线的分离度可以看出,随着光学厚度 τ 的增加,有效粒子半径垂直廓线的变化对

3.7 μm 通道反射率的影响先增大后减小。经初步计算,当 $\tau = 10$ 时,四个反射率值的均方差为 0.0028,因此可以认为当 $\tau \geq 10$ 时,有效粒子半径垂直廓线的变化对 3.7 μm 通道反射率无影响。这说明对于 3.7 μm 通道,当 τ 很大时,只有云顶部粒子的辐射才能被卫星接收,故此时该通道反射率只能反映云顶附近的有效粒子半径情况,与有效粒子半径垂直分布关系不大。当 $0 < \tau < 10$ 时,云顶与云底粒子有效粒子半径相差越大,对反射率的影响也越大,这说明此时 3.7 μm 通道反射率可以反映有效粒子半径的垂直分布。

2.2 与 r_e 垂直均一分布云的对比

为了进一步研究云粒子有效半径垂直廓线的分布对 3.7 μm 反射率的影响,本节把图 1 中 A、B、C 三条廓线情况下云的反射率跟 r_e 垂直均一云的反射率作了对比,如表 2 所示,并分别反演出把具有 A、B、C 三种 r_e 垂直廓线的云当做 r_e 垂直均一分布时反演所得到的 r_e 值,如表 3 所示,进一步分析把具有 r_e 垂直非均匀的云当做 r_e 垂直均一分布时所带来的反演误差。

当光学厚度太小时,在 3.7 μm 通道反射率易受到地面辐射的干扰,而光学厚度很大时,三种情况的反射率值已经很接近,无法揭示其垂直分布特征,因此只讨论光学厚度在 4~10 的情况。

由表 2 和 3 可以看出,对于廓线 A、B、C,随着光学厚度的增加,反射率值将越来越接近廓线 D,将之当作 r_e 垂直均一反演时所得到的 r_e 值也更加接近 16 μm ,即云顶部的有效粒子半径值,表 3 中的相对误差随着光学厚度从 23.8% 下降到 7.5% 进一步说明了这一点。当光学厚度一定, r_e 垂直分布不同时,云顶与云底 r_e 相差越小,则反演误差越小。

表 2 不同光学厚度和 r_e 垂直分布时的 3.7 μm 反射率值(单位:%)

Table 2 The 3.7 μm reflectance for different optical thickness and r_e vertical distribution (unit: %)

光学厚度	2~16 μm (case A)	4~16 μm (case B)	8~16 μm (case C)	16~16 μm (case D)
4	11.5	11.8	9.8	7.5
5	10.8	11.0	9.3	7.4
6	10.2	10.2	8.9	7.4
7	9.6	9.6	8.5	7.5
8	9.1	9.1	8.5	7.5
9	8.7	8.7	8.1	7.5
10	8.4	8.4	7.9	7.5

表 3 不同光学厚度和 r_e 垂直分布时对应的 r_e 垂直均一云的 r_e 及误差(括号中为误差,单位:%)

Table 3 The results and errors (in brackets,unit:%) for different optical thickness when taking the r_e in vertical inhomogeneous cloud as the r_e in homogeneous cloud

光学厚度	2~16 μm (case A)	4~16 μm (case B)	8~16 μm (case C)	16~16 μm (case D)
4	11.4(28.8)	11.2(30.0)	13.0(18.8)	16.0
5	12.2(23.8)	12.0(25.0)	13.9(13.1)	16.0
6	12.8(20.0)	12.8(20.0)	14.1(11.9)	16.0
7	13.4(16.3)	13.4(16.3)	14.6(8.8)	16.0
8	13.6(15.0)	13.6(15.0)	14.9(6.9)	16.0
9	14.5(9.4)	14.5(9.4)	15.2(5.0)	16.0
10	14.8(7.5)	14.8(7.5)	15.5(3.1)	16.0

表 4 计算有效辐射层光学厚度时的参数设置

Table 4 Parameter settings in the computation of the effective radiation layer

参数	数值
云底高度/km	1
云顶高度/km	3
界限位置/km	2
地表反照率 albeon	0.15
大气廓线 idatm	2
太阳天顶角 $sza/^\circ$	30
卫星天顶角 $uzen/^\circ$	35
相对方位角 $phi/^\circ$	30
计算辐射类型 nothrm	1
输出项选择 iout	20
云的光学厚度 tcloud	上部分(τ_U) 0,0.2,0.5,1,2,4,8,16,32 下部分(τ_F) 16
云粒子有效半径 nre/ μm	上部分(r_{e_U}) 2,4,8,16,32,64,128 下部分(r_{e_F}) 2,4,8,16,32,64,128

3 3.7 μm 反射率对有效粒子半径垂直深度上的反映能力

3.1 “有效辐射层”的提出及其光学厚度的计算

为解决利用 3.7 μm 波段反演有效粒子半径垂直非均一的云时遇到的问题,即仅能反演云顶附近一个浅层的情况,结合光子在层状云中的传输理论(Platnick,2000),定义当云的光学厚度比较大时,云顶附近能被反演到的云层为有效辐射层。通过有效辐射层的大小,可以定量地描述利用 3.7 μm 波段反演有效粒子半径垂直非均一的云有效粒子半径时究竟反演了多厚的一层云。

由于有效辐射层以下的云辐射并不能被遥感仪器(如卫星)接收,因此这些云粒子的粒子尺度信息不能被反演。为了定量区分有效辐射层和非有效辐射层,把有效辐射层的光学厚度记为 τ_s 。如果云层总的光学厚度为 τ ,则非有效辐射层的光学厚度为 $\tau - \tau_s$ 。为了计算有效辐射层的光学厚度 τ_s ,用 SBDART 辐射传输模式做了数值模拟,下面介绍具体方法。

3.2 实验设计

如图 3 所示,设定一层云,其云底高度为 1 km,云顶高度为 3 km,在 2 km 处把云分为上下两部分。需要输入 SBDART 的参数如表 4 所示。

如此输入,则输出值为不同上部有效粒子半径、上部光学厚度和下部有效粒子半径下的 3.7 μm 反射率。

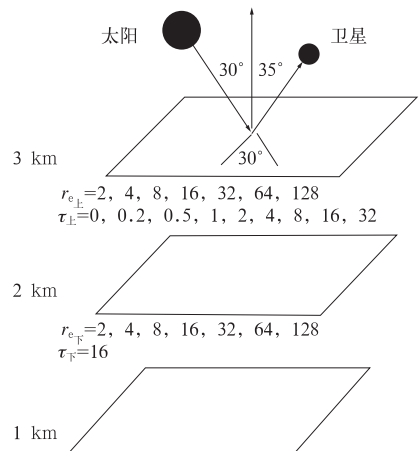


图 3 实验设计示意图

Fig. 3 The schematic diagram of experimental design

3.3 计算方法

在计算时,先把上部云的有效粒子半径固定,再计算上部云的光学厚度不同时,下部云的有效粒子半径 $r_{e_下}[k]$ (k 取 1~7) 的变化对 3.7 μm 反射率 $R_{3.7}[i,j,k]$ 的影响。图 4 是上部云的有效粒子半径为 2 μm,下部云的有效粒子半径分别取 2、4、8、16、32、64 和 128 μm 时,反射率值随上部云光学厚度的变化图。

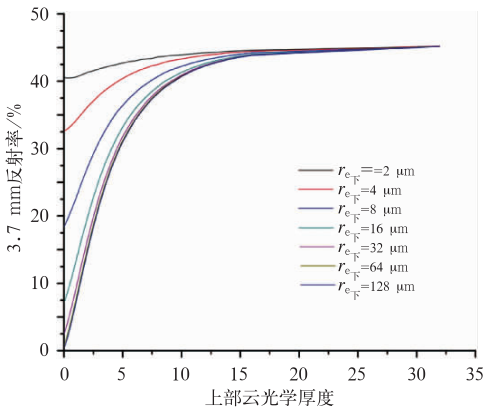


图 4 下部云有效粒子半径变化时,反射率与上部云光学厚度关系图

Fig. 4 The relationship between the upper layer's optical thickness and the 3.7 μm reflectance when the effective radius in the lower layer of cloud changes

由图 4 可以看出:

(1) 当上部云光学厚度较小时,大气上界观测到 3.7 μm 的反射率对下部云有效粒子半径变化是很敏感的。但随着上部云光学厚度逐渐增大,这种敏感性就越来越弱。到上层云的光学厚度达到一定值

时,无论下层云的有效半径有什么变化,云顶的反射率已经对它完全没有响应,也就是说,大气上界观测到的 3.7 μm 反射率仅仅取决于上层云了,这一层即为有效辐射层。

(2) 计算表明,当上层云的有效半径不同时,有效辐射层对应的光学厚度不同。

上部云光学厚度一定时所对应的 7 个反射率值的标准差定义为:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (R_i - \bar{R})^2}{7}} \quad (2)$$

式中, R_i 代表 3.7 μm 波段反射率, \bar{R} 是 7 个反射率的平均值。

为了定量地判定有效散射层的光学厚度,参考图 4,用式(2)计算当上层云取不同光学厚度(即图 4 的 x 轴)时,下层云有效半径的变化引起云顶反射率变化的均方差,而且规定当均方差小到 0.003 时,上层云的厚度即为有效辐射层的厚度。下面讨论影响 τ_s 的因素。

3.4 云顶有效粒子半径对有效辐射层光学厚度的影响

按照 3.3 中的方法,分别计算了上部云有效粒子半径为 2、4、8、16、32 和 64 μm, $\epsilon=0.003$ 时的上部云光学厚度值,结果如表 5 所示。

分析表 5 可知,随着云顶有效粒子半径的增大, τ_s 减小。这说明有效粒子半径很小时,需要一层光学厚度较大的云才能达到完全不透明,以抵挡下面一层云的辐射对其云顶处辐射的干扰;而当有效粒子半径较大时,只要光学厚度较小的一层云就能达到完全不透明。粗略看来,该结果似乎与传统理论

表 5 云顶有效粒子半径不同时的有效层光学厚度值

Table 5 The effective radiation layer's optical thickness versus the upper layer's effective radius

上部云的有效粒子半径($r_{e_上}$, 单位: μm)	2	4	8	16	32	64	128
上部云的光学厚度($\tau_{上}$)	22.0	12.3	9.5	8.1	6.9	5.8	5.3

有悖。根据粒子散射相关理论,云滴有效半径越小,云的反射能力越强,云滴有效半径越大,云的反射能力越弱。按照此理论,有效粒子半径小的云应该在光学厚度比较小的时候就达到完全不透明,而有效粒子半径大的云应该在光学厚度比较大的时候才能达到完全不透明。其实传统理论所说的“粒子有效

半径减小,将导致云滴数密度增加,这时云的辐射率会增加”是基于垂直液态云水含量恒定这一前提,但本实验并没有对垂直液态云水含量作定量限制。根据大气辐射有关知识,当云粒子尺度参数 x 增大到一定值时,消光效率 Q_{ext} 的值趋向于 2,另外,此节中 r_e 不随高度变化,在此条件下垂直液态云水含量的

表达式为

$$LWP = \frac{2}{3} \rho_w r_e \tau \quad (3)$$

由式(3)可知,液水路径 LWP 与有效半径和光学厚度的乘积成正比,本节中 r_e 与 τ 乘积并非为一定值。通过表 5 也可发现与有效层光学厚度相关的液水路径 LWP 并非定值。随着有效粒子半径的增加,有效层光学厚度亦增加,因此这两者乘积迅速增大,液水路径 LWP 的值也随之增大。

综上所述,当有效粒子半径小时,有效辐射层需要的云水量较小,有效辐射层光学厚度较大;当有效粒子半径大时,有效辐射层需要的云水量较大,有效辐射层光学厚度较小。

3.5 散射几何角度对有效辐射层光学厚度的影响

3.5.1 太阳天顶角对有效辐射层光学厚度的影响

3.4 节中讨论的是太阳天顶角为 30° , 卫星天顶角为 35° , 相对方位角为 30° 时的结果。为了研究 3.4 中的结论是否具有普遍性,本节计算不同散射几何角度时的有效辐射层光学厚度。

设定卫星天顶角为 5° , 相对方位角为 0° , 太阳天顶角分别为 0° 、 30° 和 60° , 其他参数与表 1 中设置相同,有效辐射层光学厚度计算的具体结果如表 6 所示。

可以发现,对于任意的太阳天顶角,随着上部云有效半径的加大,有效辐射层的光学厚度都变小,与 3.4 中结论一致。当上部有效粒子半径相同时,随着太阳天顶角增大,有效辐射层的光学厚度减小。这是因为对于同样光学厚度的云,太阳天顶角越大,光线在云中经过的路径越长,所需要的有效辐射层的光学厚度越小的缘故。

表 6 不同太阳天顶角时的有效层光学厚度值

Table 6 The variations of effective radiation layer's optical thickness with the solar zenith angles

	太阳天顶角 = 0°	太阳天顶角 = 30°	太阳天顶角 = 60°
上部云 $r_e = 2 \mu\text{m}$	23.8	22.7	18.0
上部云 $r_e = 4 \mu\text{m}$	13.5	12.9	10.5
上部云 $r_e = 8 \mu\text{m}$	10.3	9.8	7.9
上部云 $r_e = 16 \mu\text{m}$	9.4	8.4	6.8
上部云 $r_e = 32 \mu\text{m}$	7.9	7.5	5.5
上部云 $r_e = 64 \mu\text{m}$	6.7	5.9	4.0
上部云 $r_e = 128 \mu\text{m}$	5.9	5.6	3.8

3.5.2 卫星天顶角和相对方位角对有效辐射层光学厚度的影响

设定太阳天顶角为 30° , 上部云有效粒子半径为 $2 \mu\text{m}$, 卫星天顶角分别取 0° 、 5° 、 15° 、 25° 、 35° 、 45° 、 55° 和 65° , 相对方位角从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 每隔 15° 取一个值。所计算的有效辐射层光学厚度结果如图 5 所示。

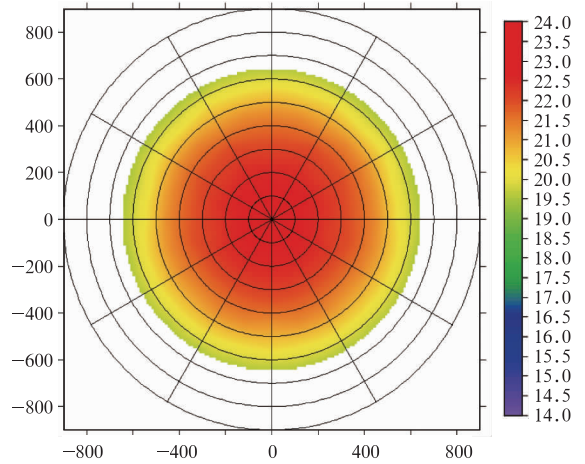


图 5 卫星天顶角和相对方位角不同时有效辐射层的光学厚度值

Fig. 5 The effective radiation layer's optical thickness as the function of satellite zenith angle and the relative azimuth angle

图 5 中极坐标的径向为卫星天顶角, 每一个圈为 10° ; 切向角度为观测方向和太阳入射方向的相对方位角; 颜色代表有效散射层的光学厚度值。从图中可以看到, 随着卫星观测天顶角的加大, 有效辐射层的光学厚度值有减小的趋势, 这是因为天顶角加大, 倾斜路径的散射会更强, 而本文所定义的有效散射层光学厚度是指一层云的垂直光学厚度。当卫星天顶角一定时, 相对方位角的变化对有效辐射层的光学厚度影响不明显。

4 结论及讨论

为进一步了解 $3.7 \mu\text{m}$ 波段在反演云粒子有效半径中的作用, 基于 SBDART 辐射传输模式, 计算了不同有效粒子半径垂直分布时的 $3.7 \mu\text{m}$ 反射率。

当有效粒子半径垂直非均一分布时, 计算了不同云粒子有效半径垂直廓线时 $3.7 \mu\text{m}$ 通道的反射率, 通过反射率与光学厚度的变化趋势, 进一步证明

了有效辐射层的存在。通过与有效粒子半径垂直均一云的反射率的对比,发现当光学厚度小于 10 时,把有效粒子半径垂直非均一的云当作垂直均一的云进行反演时,云顶有效粒子半径的结果会出现一定的误差,该误差随着光学厚度的增大而减小,当云足够厚(光学厚度大于 10)时,该误差小于 10%,由于反演时只能反演到云顶部粒子的信息,云底部粒子的信息不能被遥感仪器接受,所以此时云粒子有效半径的垂直分布的改变对 3.7 μm 反射率不再产生影响。

当有效粒子半径分为上下两层时,发现随着上层光学厚度的增大,下部有效粒子变化对 3.7 μm 反射率的影响逐渐减小。提出了有效辐射层光学厚度的概念并进一步分析了影响其大小的因素,结果表明,云顶部有效粒子半径越大,有效辐射层的光学厚度越小;随着太阳天顶角增大,有效辐射层的光学厚度减小;随着卫星天顶角的增大,有效辐射层的光学厚度减小;相对方位角的变化对有效辐射层的光学厚度影响不明显。通过对有效辐射层的定量计算结果得出,对于有效粒子半径大于 4 μm 的云,有效辐射层的光学厚度大致在 3~10 之间。

参考文献

陈英英,周毓荃,杨军. 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. *气象*, 33(4):29-34.

黄梦宇,赵春生. 2005. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响. *南京气象学院学报*, 28(3):360-368.

李娟,毛节泰. 2005. GMS 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. *气象学报*, 63(增刊):47-55.

李俊,方宗义. 2012. 卫星气象的发展——机遇与挑战. *气象*, 38(2):129-146.

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.

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

许健民,杨军,张志清,等. 2010. 我国气象卫星的发展与应用. *气象*, 36(7):94-100.

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. *气象学报*, 60(5):594-601.

Chandrasekhar S. 1960. *Radiative Transfer*. N. Y: Dover.

Chang F L, Li Z. 2002. Estimating the vertical variation of cloud droplet effective radius using multispectral nearinfrared satellite measurements. *J Geophys Res*, 107: 4257, doi: 10. 1029/2001JD000766.

Chen R, Chang F L Z, Li R F et al. 2007. Impact of the vertical variation of cloud droplet size on the estimation of cloud liquid water path and rain detection. *J Atmos Sci*, 64(11):3843-3853.

Hallett J, Mossop S C. 1974. Production of secondary ice particles during the riming process. *Nature*, 249:26-28.

Han Q, Rossow W B, Lacis A A. 1994. Near-global survey of effective droplet radii in liquid water clouds using ISCCP data. *J Climate*, 7(4):465-497.

Kaufman Y J, Nakajima T. 1993. Effect of Amazon smoke on cloud microphysics and albedo-analysis from satellite imagery. *J Appl Meteor*, 32(4):729-744.

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(15):1878-1893.

Platnick S. 2000. Vertical photon transport in cloud remote sensing problems. *J Geophys Res*, 105(22):919-935.

Ricchiazzi P. 1998. SBDART: A research and teaching software tool for plane parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bull Amer Meteor Soc*, 79(10):2101-2114.

Slingo A, Nicholls S, Schmetz J. 1982. Aircraft observations of marine stratocumulus during JASIN. *Q J R Meteorol Soc*, 108(458):833-856.