

陈英英,熊守权,周毓荃,等. 2013. FY-3A 三个通道资料反演水云有效粒子半径的研究. 气象,39(4):478-485.

FY-3A 三个通道资料反演水云有效粒子半径的研究^{*1}

陈英英¹ 熊守权¹ 周毓荃² 朱 冰³ 毛节泰⁴

1 湖北省气象服务中心,武汉 430074
2 中国气象科学研究院,北京 100081
3 南京信息工程大学,南京 210044
4 北京大学物理学院大气与海洋科学系,北京 100871

提 要: 基于水汽吸收波段云的反射率主要依赖于云粒子大小的原理,利用 SBDART 辐射传输模式和 FY-3A 极轨气象卫星可见光红外扫描辐射计(VIRR)的通道 3(3.7 μm)、中分辨率光谱成像仪(MERSI)的通道 6(1.64 μm)和通道 7(2.13 μm)所提供的探测数据进行了水云有效粒子半径的反演和比较。发现,1.64、2.13 和 3.7 μm 三个通道均能定量反演有效粒子半径的大小,其中 1.64 和 2.13 μm 通道对大粒子的敏感性较高,3.7 μm 通道在光学厚度较小时敏感性较好。三个通道的有效粒子半径反演产品与 MODIS 有效粒子半径产品具有较好的相关性。

关键词: 风云三号 A 星, 反射率, 有效粒子半径, 污染, MODIS

中图分类号: P412 **文献标识码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.010

Research on Effective Particle Radius of Water Clouds Retrieved from the Data of FY-3A Three Channels

CHEN Yingying¹ XIONG Shouquan¹ ZHOU Yuquan² ZHU Bing³ MAO Jietai⁴

1 Meteorological Service Centre of Hubei Province, Wuhan 430074
2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
3 Nanjing University of Information and Science Technology, Nanjing 210044
4 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract: Based on the principle that the reflectivity at a water (or ice) absorbing band primarily depends on cloud particle size, the comparison of effective particle radius of water cloud is made, retrieved from the data of channel 3 (3.7 μm) of FY-3A Visible and Infrared Radiometer (VIRR) and the data of channel 6 (1.64 μm) and channel 7 (2.13 μm) of FY-3A Medium Resolution Spectral Imager (MERSI) using SBDART radiation transfer mode. The results show that the effective particle radius can be quantitatively retrieved by any of the three channels of 1.64, 2.13 and 3.7 μm . The reflectivity of channel 1.64 and 2.13 μm is more sensitive to the larger particles while channel 3.7 μm shows better sensitivity when optical thickness is smaller. The retrieve product of effective particle radius of the three channels have better correlations with the effective particle radius products of MODIS.

Key words: FY-3A, reflectivity, effective particle radius, pollution, MODIS

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206025)、国家高技术研究发展计划(2012AA120902)和中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放科研课题(2009Z0039)共同资助
2012 年 3 月 8 日收稿; 2012 年 12 月 1 日收修定稿
第一作者:陈英英,主要从事大气物理与大气遥感方面研究. Email:brisk007@163.com

引 言

云有效粒子半径是描述云滴尺度的重要特征参量,其分布对云和降水的形成有着十分重要的影响,了解云粒子的大小及分布状况,有助于对天气现象的精细化监测预报(Pruppacher et al,1987),有助于对人工影响天气可播区和播云效果的判定(于丽娟等,2009;李铁林等,2010;赵增亮等,2010;辛乐等,2011;Rosenfeld et al,2005),同时对认识人类活动对环境造成的影响也十分重要(Rosenfeld,2000)。

国外利用机载或卫星的可见光和近红外/中红外通道探测资料反演云光学厚度和有效粒子半径的研究工作已有许多(Twomey et al,1982;1989;King,1987;Nakajima et al,1990;1991;Arking et al,1985;Nakajima et al,1995;Rosenfeld et al,1994),其理论基础是云在非水汽吸收波段,反射函数主要是云光学厚度的函数,在水汽吸收波段,反射函数主要是云粒子大小的函数。在此基础上 MODIS(King et al,1997)形成了一整套关于云光学厚度和有效粒子半径等参数的反演方法。随着我国卫星事业的蓬勃发展,这一领域也逐渐成为国内学者研究的方向。刘健等(2003)利用 FY-1C 极轨气象卫星扫描辐射计资料反演了水云的有效粒子半径,周毓荃等(2008)、陈英英等(2007)则利用 FY-2C/D/E 系列静止卫星联合反演了有效粒子半径、云光学厚度和云顶高度等一系列云参数产品。

虽然静止卫星覆盖范围广,并且有着高时间分辨率的优势、可连续监测云的生消聚散,但太阳天顶角的大幅变化会给反演产品的稳定性和准确性带来较大的干扰,并且,静止卫星 5 km 左右的空间分辨率给有效粒子半径的精细化分析带来一定的困难。因此,利用极轨卫星反演云参数的工作一直是优先考虑的问题。

我国 FY-3A 极轨卫星于 2008 年 5 月 27 日发射成功,星上携带 11 种观测仪器,其高空间分辨率及多光谱的优势使精细准确地反演有效粒子半径成为可能。为检验 FY-3A 资料在反演有效粒子半径方面的应用潜力,本文首先利用 SBDART(Ricchiazzi et al,1998)辐射传输模式分析我国 FY-3A 卫星上搭载的中分辨率光谱成像仪(Medium Resolution Spectral Imager,MERSI)中的 1.64 和 2.13 μm 通道及可见光红外扫描辐射计(Visible and Infrared Radiometer,VIRR)中的 3.7 μm 通道对云有

效粒子半径的敏感性,分别进行有效粒子半径的反演试验,并在此基础上分析人为污染对海洋层积云微物理结构的影响,最后与 MODIS 近同一时次的有效粒子半径产品进行对比检验。

1 敏感性试验

为定量获取 1.64、2.13 和 3.7 μm 通道反射率与云粒子有效半径的关系,首先利用 SBDART 辐射传输模式建立了不同散射几何条件、不同地表类型、不同大气层结及不同水云参数条件下反射率的查算表,以备多种情况反演所需。计算时采用了 FY-3A 中分辨率光谱成像仪 MERSI 中 0.65、1.64 和 2.13 μm 通道及可见光红外扫描辐射计 VIRR 中 3.7 μm 通道的光谱响应函数。

1.1 1.64 μm 通道反射率对有效粒子半径的敏感性分析

为分析 1.64 μm 通道反射率对云有效粒子半径的敏感性,首先利用 SBDART 辐射传输模式计算了 FY-3A/MERSI 的可见光通道 0.65 μm 和近红外通道 1.64 μm 的反射率分别随云光学厚度和有效粒子半径的变化曲线,如图 1 所示,为适应第二节中个例分析需要,其初始设置参数为:假定反演对象为水云,地表反射率取为 0.04(即洋面),选取的大气模式为中纬度夏季大气,太阳天顶角 40°,卫星天顶角 5°,相对方位角 40°,云层分布于 1~4 km。

图 1 中横轴为 0.65 μm 可见光通道反射率,纵轴为 1.64 μm 近红外通道反射率,取值范围均为

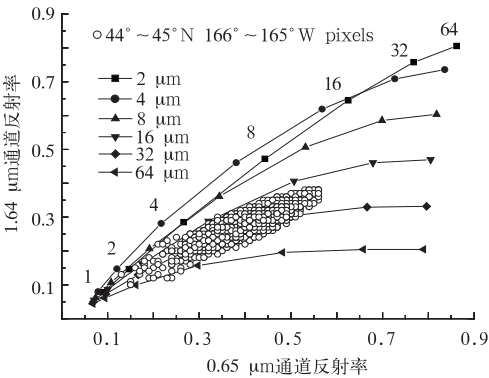


图 1 MERSI 中 0.65 和 1.64 μm 通道反射率与云光学厚度及有效粒子半径的理论关系
Fig.1 Theoretical relationship between the reflectivities of channel 0.65 μm and 1.64 μm in MERSI for various values of cloud optical thickness and effective particle radius

0.0~0.9。其中不同形状的曲线表示不同有效粒子半径的计算结果,分别取 2、4、8、16、32 和 64 μm 等 6 个代表值,主要影响近红外通道反射率探测结果,即与纵轴对应;而云光学厚度沿横轴递增,7 个代表值分别为 1、2、4、8、16、32 和 64,如图中黑色数字标识,主要影响可见光通道反射率探测结果。曲线上的每一个点都表示一定光学厚度和有效粒子半径条件下对应的 0.65 和 1.64 μm 通道反射率。图 1 中的圆圈所示的散点为将在第二节中进行分析的 2011 年 9 月 4 日 21:45 UTC(世界时,下同)FY-3A/MERSI 观测的 $44^\circ\sim 45^\circ\text{N}$ 、 $-166^\circ\sim -165^\circ\text{E}$ 范围内 11483 个海洋性层积云像元的双通道反射率分布。

从图 1 中可以看出,由于设置地表类型为洋面,上述两个通道的反射率均来自于云而几乎不受地表干扰,6 条表示不同有效粒子半径的曲线起始处即云光学厚度很小、近晴空条件下 0.65 μm 可见光和 1.64 μm 近红外通道的反射率都很小,如云光学厚度为 1,有效粒子半径为 2 μm 时其 0.65 和 1.64 μm 通道反射率分别仅为 0.09 和 0.078,并且当云光学厚度小于 4 时,不同有效粒子半径的曲线区分不明显,说明对于薄云层,1.64 μm 通道对有效粒子半径的反演误差较大。当云层逐渐变厚,0.65 和 1.64 μm 通道反射率随云光学厚度和有效粒子半径的变化规律逐渐清晰,即 0.65 μm 通道反射率随云光学厚度的增大而增大,有效粒子半径对其影响很小;而 1.64 μm 通道反射率则随有效粒子半径的增大而减小,对光学厚度也有一定的依赖,但在光学厚度较大的区间,依赖性减弱,主要受有效粒子半径的影响,说明对于光学厚度较大的云层,可利用 1.64 μm 通道的反射率单独反演有效粒子半径。

从图 1 中散点的落区还可以看出,散点落区对应的有效粒子半径多集中在 16 μm 的曲线下方,即云粒子大多超过 16 μm ,分布较为紧凑,而横轴方向上对应的云光学厚度在 2~20 不等,跨度较大,可以初步推断,这是一片水平方向上粒子大小较为均一、光学厚度不尽相同的云区。

1.2 2.13 μm 通道反射率对有效粒子半径的敏感性分析

与图 1 类似,图 2 为 FY-3A/MERSI 的 0.65 和 2.13 μm 波段反射率随云光学厚度和有效粒子半径的变化曲线,除了将 1.64 μm 替换为 2.13 μm 通道外,其他参数设置与图 1 相同。与图 1 对比可以发现,2.13 μm 通道反射率随有效粒子半径的变化规律与 1.64 μm 基本一致,但曲线位置整体下移,即在

同样的参数条件下,利用 SBDART 辐射传输模式计算的 2.13 μm 通道反射率要小于 1.64 μm 通道,这与两个近红外通道的中心波长不同有关。另外,图 2 中表示不同有效粒子半径的不同曲线都变得平直,说明云光学厚度对 2.13 μm 通道有效粒子半径反演的影响变小。但在光学厚度较小时,曲线之间仍存在一定的交叠,会给反演结果带来一定的误差。

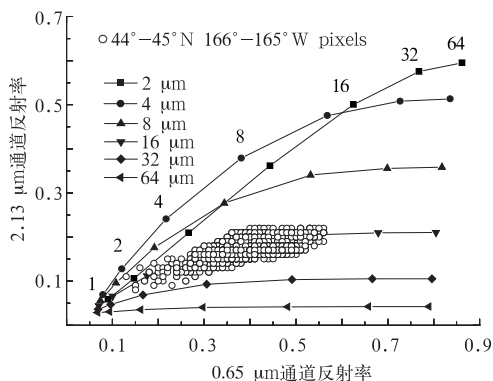


图 2 MERSI 中 0.65 和 2.13 μm 通道反射率与云光学厚度及有效粒子半径的理论关系

Fig. 2 Theoretical relationships between the reflectivities of channel 0.65 μm and 2.13 μm in MERSI for various values of cloud optical thickness and effective particle radius

针对同一区域的海洋性层积云像元个例,较之 1.64 μm 通道, FY-3A/MERSI 中 2.13 μm 通道反射率对应的有效粒子半径集中在 16 μm 曲线附近,小于 1.64 μm 通道的反演结果,这种差异一方面来源于 FY-3A 卫星近红外通道的定标精度,另一方面则与实际云中垂直方向上有效粒子半径的垂直非均一性有关,这将在 1.3 节的分析中进一步阐述。图 2 与图 1 的散点分布趋势基本一致,由于横轴采用与图 1 同样的 MERSI 的 0.65 μm 可见光通道反射率,因此对应的云光学厚度也在 2~20 的范围。

1.3 3.7 μm 通道反射率对有效粒子半径的敏感性分析

较之图 1 和图 2 的 1.64 和 2.13 μm 两个近红外通道,3.7 μm 通道在反演有效粒子半径时较为复杂,这是由于白天 3.7 μm 波段接收到的辐射由两部分组成,即热辐射和反射辐射,如图 3a 和 3b 分别为 SBDART 辐射传输模式计算的 FY-3A/VIRR 中 3.7 μm 通道热辐射和反射率分别随云光学厚度和有效粒子半径变化的关系图,横轴为 VIRR 中 0.63 μm 通道的反射率,其他参数设置与图 1 相同。由图 3a 可以看出,热辐射部分对有效粒子半径几乎

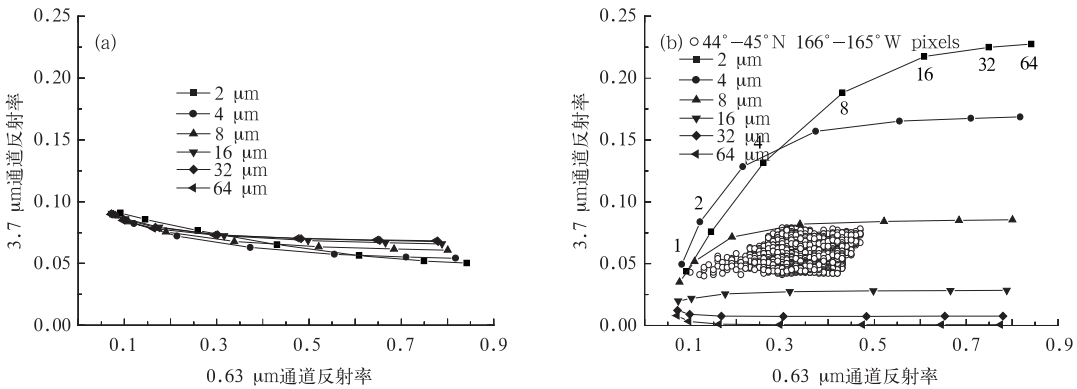


图 3 (a) VIRR 中 0.63 μm 通道反射率、3.7 μm 通道热辐射(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)与云光学厚度及有效粒子半径的理论关系,(b) VIRR 中 0.63 和 3.7 μm 通道反射率与云光学厚度及有效粒子半径的理论关系

Fig. 3 Theoretical relationship between the reflectivity of channel 0.63 μm and thermal radiation of channel 3.7 μm (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) (a) and the reflectivity of channel 0.63 μm and 3.7 μm (b) in VIRR and the cloud optical thickness and effective particle radius

没有任何敏感性,不同曲线叠加在一起,无法进行区分,而图 3b 则体现出与图 1 和图 2 类似的特征,较之图 2,曲线的位置进一步整体下移,说明在 1.64、2.13 和 3.7 μm 三个对有效粒子半径敏感的通道中,对于同样的云,3.7 μm 通道探测到的反射率最小。除此之外,表征不同有效粒子半径大小的不同曲线都更为平直,在云光学厚度较小的区间,这一特征体现得更加明显,曲线之间仅有少量交叠,说明在云层较薄时,利用 3.7 μm 通道反演有效粒子半径的误差较小。但从图 3b 中也可以看出,对于有效粒子半径大于 32 μm 的粒子,3.7 μm 通道反射率的敏感性要明显不及 1.64 和 2.13 μm ,说明 3.7 μm 通道对较大粒子的反演能力较弱。

另外,与图 1 和图 2 对比可以发现,图 3b 中的散点分布对应 8~14 μm 的有效粒子半径范围。并且,从图 3b 散点在横轴方向上的分布可以看出,其云光学厚度对应于 2~12 的区间,小于图 1 和图 2 中 2~20 的结果,这是由 VIRR 中的 0.63 μm 与 MERSI 中的 0.65 μm 两个仪器上可见光通道的观测差异所造成。

由以上分析可以得出 FY-3A/MERSI 中的 1.64 和 2.13 μm 和 VIRR 中的 3.7 μm 通道反射率在反演有效粒子半径上的异同:

- (1)在取值上,对于同样的云参数设置,1.64、2.13 和 3.7 μm 三个通道反射率依次减小。
- (2)当云光学厚度较大时,在对大粒子的敏感性上,1.64 μm 通道最高,2.13 μm 通道略次之,3.7 μm 通道要明显减弱。
- (3)当云光学厚度较小时,3.7 μm 通道反射率较之其他两个通道能在一定程度上更好地体现粒子

大小的差异。

这与 Nakajima 等(1990)曾经指出的“对于光学厚度大于 4、有效粒子半径大于 6 μm 的层状水云来说,可以用 0.75 和 2.16 μm 通道的反射函数反演它的光学厚度和有效粒子半径。而对于光学薄云层来说,反演结果是不确定的,解是不唯一的,加入 1.65 μm 通道并不能明显改善反演结果,而加入 3.7 μm 通道则可以降低解的不确定性”一致。MODIS 也是利用 0.645、2.13 和 3.75 μm 通道的联合来反演云光学厚度和有效粒子半径(King et al,1992)。

本文上述讨论均假定有效粒子半径在垂直方向上呈均一分布,Nakajima 等(2010)利用 MODIS 资料研究有效粒子半径的垂直非均一分布对 1.6、2.1 和 3.7 μm 三个通道反射率的影响后指出:

- (1)3.7 μm 通道反射率在云顶有小云滴存在时有效粒子半径的反演最易产生误差,而 1.6 μm 通道反射率最易受云中毛毛雨滴存在的影响;
- (2)在反映有效粒子半径垂直方向光学深度的方面,1.6、2.1 和 3.7 μm 通道分别可以反映光学厚度为 0~28、0~15 及 0~8 的云层深度。

由于云中存在复杂的动力及微物理过程,云粒子有效半径并非呈现垂直方向均一分布,而 1.6、2.1 和 3.7 μm 通道对此不同的敏感性,在一定程度上解释了三个通道反射率对应的不同有效粒子半径反演结果的原因。

2 个例分析

通常,广袤洁净的海洋上空的污染要小于陆地上空,充当云凝结核的物质较少,在同样的云水条件

下会形成较大的云滴,但卫星观测显示出人为污染对海洋层积云的作用,如图 4 所示,为 2011 年 9 月 4 日 21:45 UTC FY-3A 卫星与同日 21:15 UTC MODIS 相近通道的观测结果。截取的范围是 $41^{\circ}\sim 47^{\circ}\text{N}$ 、 $168^{\circ}\sim 162^{\circ}\text{W}$,为使两者具有较好的可比性,将 MODIS 资料中 406×270 的地理信息数组插值为 2030×1354 ,即 1 km 左右的空间分辨率,与 FY-3A 资料保持一致。其中图 $4a_1$ 和 $4b_1$ 分别为 MODIS 的 $1.64\text{ }\mu\text{m}$ 通道与 FY-3A/MERSI 的 $1.64\text{ }\mu\text{m}$ 通道反射率,图 $4a_2$ 和 $4b_2$ 分别为 MODIS 的 $2.13\text{ }\mu\text{m}$ 通道与 FY-3A/MERSI 的 $2.13\text{ }\mu\text{m}$ 通道反射率,图 $4a_3$ 和 $4b_3$ 分别为 MODIS 的 $11.03\text{ }\mu\text{m}$ 通道与 FY-3A/VIRR 的 $10.8\text{ }\mu\text{m}$ 通道的黑体亮温,图 $4a_4$ 和 $4b_4$ 分别为 MODIS 的 $3.75\text{ }\mu\text{m}$ 通道与 FY-3A/VIRR 的 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 通道的黑体亮温。

从图 $4b_1$ 、 $4b_2$ 和 $4b_4$ 中可以看出,在均匀的海洋性层积云背景下,FY-3A 的 1.64 、 2.13 和 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 三个通道的观测图像都出现几条明显的带状痕迹,而图 $4b_3$ $10.8\text{ }\mu\text{m}$ 通道的红外亮温却没有类似的现象,只能看出大片的暖云背景。说明较之红外通道, 1.64 和 $2.13\text{ }\mu\text{m}$ 近红外通道和 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 中红外通道对于云滴尺度的确有较高的敏感性。

在对卫星观测资料进行定性分析的基础上,利用 FY-3A/MERSI 的 1.64 、 $2.13\text{ }\mu\text{m}$ 及 VIRR 的 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 通道分别对有效粒子半径进行反演,进一步监测这些污染对海洋层积云微物理结构造成的影响,曾有学者在 NOAA-AVHRR 多光谱卫星图像出现时,尝试过这方面的研究(Coakley et al,1987)。

在第一节中讨论过,对于云光学厚度不是很薄的云层,可以利用近红外或中红外通道的反射率单独反演云粒子有效半径而不考虑云光学厚度的影响,由 FY-3A/MERSI 的可见光通道反射率判别,选取的这一个例符合上述条件要求(图略)。因此,首先利用已有查算表对分别 1.64 、 2.13 和 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 通道反射率与有效粒子半径的关系进行非线性拟合,经过相关性检验后,建立三个针对本个例的由 1.64 、 2.13 和 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 通道反射率计算有效粒子半径的表达式,进而分别获取三个通道反演的有效粒子半径产品,如图 $5b_1$ 、 $5b_2$ 和 $5b_3$ 所示。可以看出,图 4 中反射率的带状痕迹在图 5 的有效粒子半径图中体现为小粒子的区域,低于背景云层的云滴尺度。造成这一现象的原因是轮船燃烧产生的烟尘沿轮船的航行轨迹扩散至云中所致,在稳定的大气层结条件下,烟尘的影响区域与轮船轨迹基本一致。吸湿

性的燃烧颗粒使有效的云凝结核数目增加,在有限的水云条件下使得云滴变小,谱宽变窄,这一变化会对暖雨碰并过程的启动造成抑制。

从图 $5b_1$ 、 $5b_2$ 和 $5b_3$ 三个通道的有效粒子半径反演结果可以看出,整个云系的纹理结构清晰,特征明显,在较均匀的海洋层积云背景下,小粒子痕迹位置一致,三幅图有较高的吻合度,由于缺乏 MODIS 大量的反演前期准备工作,在云层边缘的云像元识别上有些差异。对比图 5a 的 MODIS 产品和三个通道的反演结果发现, $2.13\text{ }\mu\text{m}$ 通道反演的有效粒子半径在色调上与 MODIS 最为接近, $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 通道的反演结果略微偏小,而 $1.64\text{ }\mu\text{m}$ 的反演结果则偏大。这一方面受原始数据及反演算法本身的差异影响,另一方面还与 MODIS 反演云光学厚度和有效粒子半径时选取的通道有关。

鉴于图 $5b_1$ 与 5a 有效粒子半径反演结果的明显差异,首先考虑 FY-3A/MERSI 的 $1.64\text{ }\mu\text{m}$ 通道原始探测数据的准确性问题。对比图 $4a_1$ MODIS 和图 $4b_1$ FY-3A 同为 $1.64\text{ }\mu\text{m}$ 通道的观测结果,发现在色标一致的情况下,图 $4a_1$ 与 $4b_1$ 存在着一定的差异,图 $4b_1$ 偏暗,也就是说这一个例 FY-3A/MERSI 的 $1.64\text{ }\mu\text{m}$ 通道的反射率整体上小于 MODIS 同一通道的观测结果,从而造成 FY-3A 反演的有效粒子半径明显偏大。这一方面源于 MERSI 与 MODIS 的 $1.64\text{ }\mu\text{m}$ 通道的光谱响应函数不完全相同,另一方面可能与 FY-3A/MERSI $1.64\text{ }\mu\text{m}$ 近红外通道制造方面的杂散光及后期的定标有关,在以后的工作中将采集一批样本进行试验分析,以期得到更具普遍意义的结果。

而对于图 $5b_3$ 与 5a 反演结果的差异,除了考虑定标精度问题外,另外一个重要因素就是 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 通道反演时受云顶小粒子存在的垂直非均一性影响最大,利用这一通道单独进行反演时,精度要低于 MODIS 利用 0.645 、 2.13 和 $3.75\text{ }\mu\text{m}$ 三个通道的联合反演结果。

为进一步证明反演结果的可靠性,利用 MODIS 的有效粒子半径反演产品进行点对点的对比检验,由于两颗卫星在观测时间上有 30 分钟的差异,为尽可能消除小粒子痕迹移位所带来的分析误差,观察图像的纹理特征后,将 MODIS 数据整体东移 0.15° 后进行同经纬度像元的比较,取 $44^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $166^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{W}$ 范围内可见光反射率大于 0.1 的像元制成散点图,得到图 6 的结果。横轴分别为 FY-3A/MERSI 中 1.64 和 $2.13\text{ }\mu\text{m}$ 及 VIRR 中 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 通道的反演

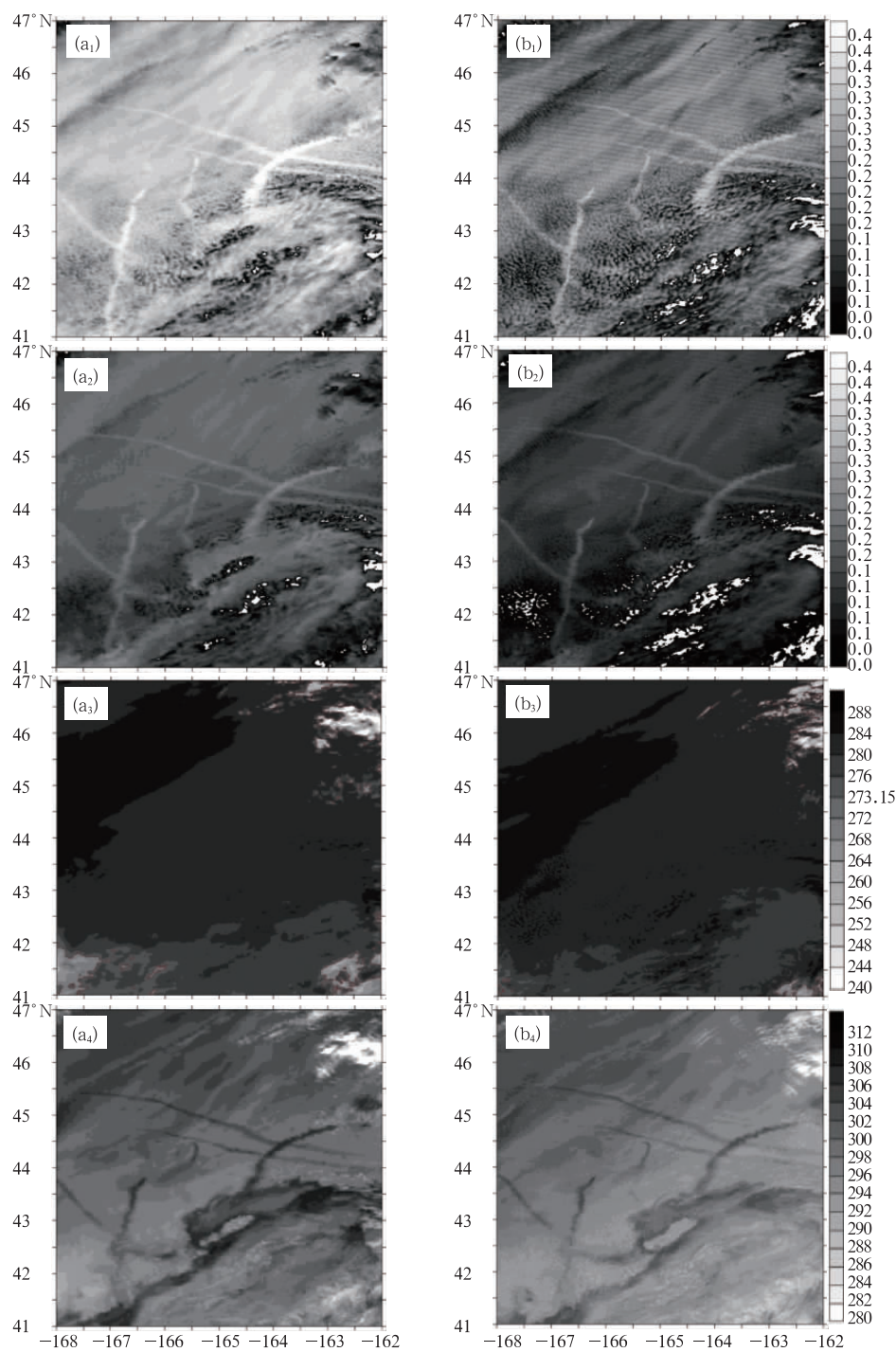


图 4 2011 年 9 月 4 日(a)21:15 UTC MODIS 的观测值和(b) 24:45 UTC FY-3A 卫星的观测值
(a₁)1.64 μm 通道反射率,(a₂)2.13 μm 通道反射率,(a₃)11.03 μm 通道黑体亮温,
(a₄)3.75 μm 通道黑体亮温,(b₁)MERSI 中的 1.64 μm 通道反射率,
(b₂)MERSI 中的 2.13 μm 通道反射率,(b₃)VIRR 中的 10.8 μm 通道黑体亮温,
(b₄)VIRR 中的 3.7 μm 通道黑体亮温

Fig. 4 Observations of (a) MODIS at 21:15 UTC and (b) FY-3A at 24:45 UTC, 4 September 2011
(a₁) reflectivity of channel 1.64 μm, (a₂) reflectivity of channel 2.13 μm, (a₃) TBB of channel
11.03 μm, (a₄) TBB of channel 3.75 μm, (b₁) reflectivity of channel 1.64 μm and
(b₂) reflectivity of channel 2.13 μm of MERSI, (b₃) TBB of channel 10.8 μm
and (b₄) TBB of channel 3.7 μm of VIRR

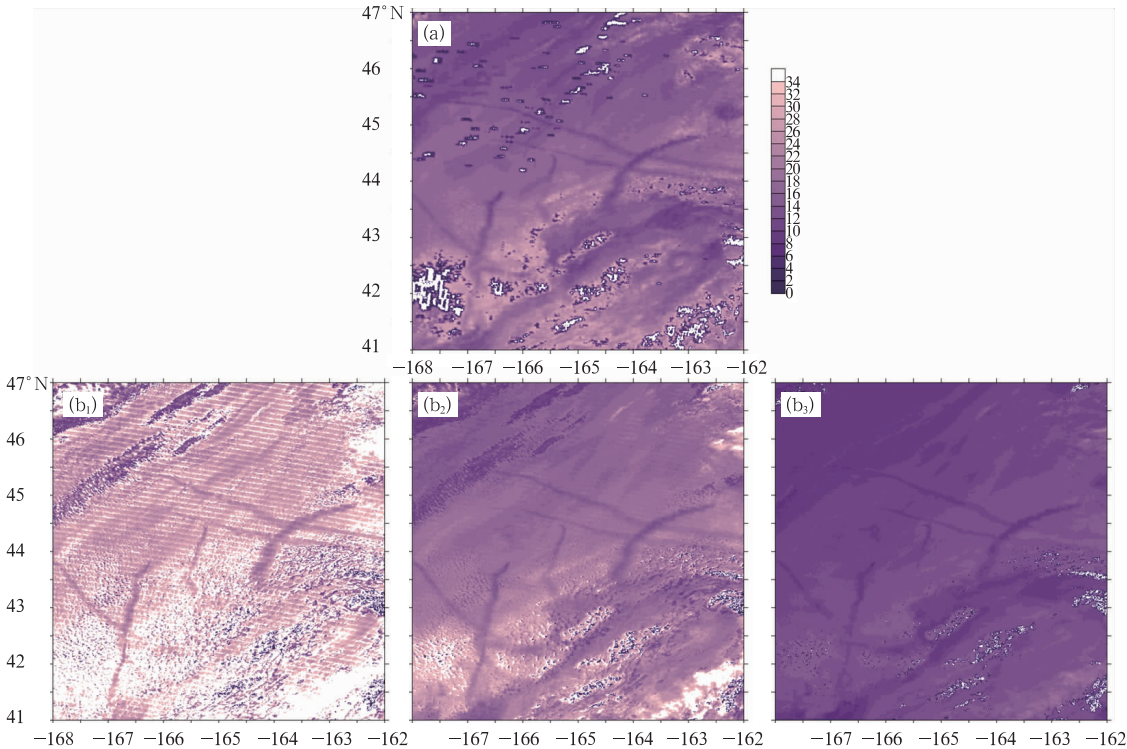


图 5 2011 年 9 月 4 日 21:15 UTC MODIS 有效粒子半径产品(a)和 21:45 UTC FY-3A 反演的有效粒子半径(b,单位:μm)
(b₁)MERSI 的 1.64 μm 通道,(b₂)MERSI 的 2.13 μm 通道,(b₃)VIRR 的 3.7 μm 通道
Fig. 5 Effective particle radius product of MODIS at 21:15 UTC, 4 September 2011 (a) and
effective particle radius retrieved from FY-3A at 24:45 UTC (unit:μm)
(b₁) channel 1.64 μm in MERSI, (b₂) channel 2.13 μm in MERSI, (b₃) channel 3.7 μm in VIRR

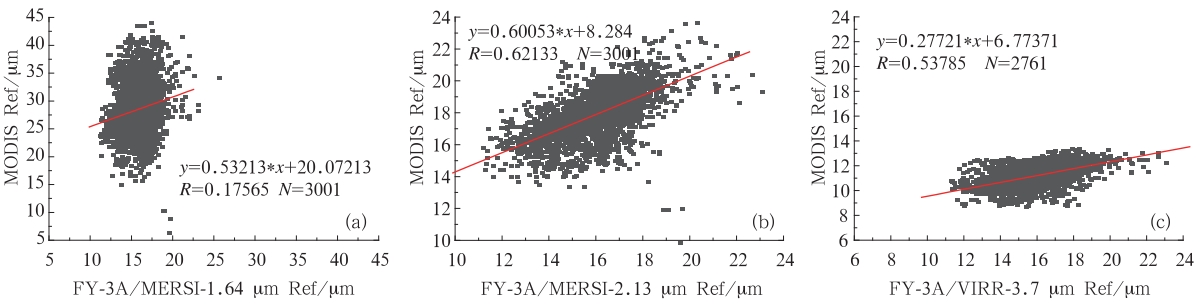


图 6 MODIS 与 FY-3A/MERSI 的(a)1.64 μm 通道、(b)2.13 μm 通道和
(c)FY-3A/VIRR 的 3.7 μm 通道反演有效粒子半径的散点分布

Fig. 6 The scatter diagram of effective particle radius retrieved from

(a) channel 1.64 μm and (b) channel 2.13 μm of MODIS and FY-3A/MERSI and (c) channel 3.7 μm of FY-3A/VIRR

结果,纵轴为 MODIS 的有效粒子半径产品,共 3001 个样本,可以看出,2.13 μm 通道的反演结果与 MODIS 的相关性最好,相似性参数达到 0.62,线性拟合程度较高,而 1.64 μm 通道的反演结果偏大,3.7 μm 通道的反演结果略偏小,与图 5 的分析结果一致。

若以 MODIS 有效粒子半径产品为真值,本个例的反演误差除了来源于反射率本身的观测及反演

算法的差异外,另一个原因是 MODIS 的有效粒子半径反演产品是选取 2.13 和 3.75 μm 通道的最优结果生成。

3 结论与讨论

本文利用 SBDART 辐射传输模式建立了在不同的散射几何参数、不同地表类型、不同大气层结、

不同水云参数条件下 FY-3A/MERSI 上 1.64 及 2.13 μm 和 VIRR 上 3.7 μm 通道反射率与有效粒子半径关系的查算表,定量分析了上述三个通道对有效粒子半径的敏感性,初步得到以下结论:

(1)在取值上,对于同样的云参数设置,1.64、2.13 和 3.7 μm 三个通道反射率依次减小。

(2)当云光学厚度较大时,在对大粒子的敏感性上,1.64 μm 通道最高,2.13 μm 通道略次之,3.7 μm 通道要明显减弱。

(3)当云光学厚度较小时,3.7 μm 通道反射率较之其他两个通道能在一定程度上更好地体现粒子大小的差异。

然后,利用三个通道反射率反演得到的有效粒子半径,成功观测到轮船污染对海洋层积云微物理特性造成的影响,其反演特征印证了辐射传输模式的分析结论。最后将三个通道的反演结果与 MODIS 有效粒子半径反演产品进行比较,发现:虽然两颗卫星采用不同的观测仪器及数据预处理方法,并且观测时间上也存在差异,但有效粒子半径的大小分布特征仍存在较高的一致性,其中 2.13 μm 通道的反演结果与 MODIS 线性拟合较好,相关系数达到 0.62。

在以后的反演工作中,如果以 2.13 μm 通道为主,并结合 1.64 和 3.7 μm 两个通道的优势,取长补短,将对不同光学厚度和有效粒子半径的云型都达到最佳的反演效果。

本文主要是针对垂直方向均一分布的水云进行有效粒子半径的反演研究,鉴于云相态对辐射值的重要影响,研究结果不适用于混合相或冰相云的分析,关于冰云的有效粒子半径反演以及垂直非均一性的研究将在下一步的工作中进行探索。

参考文献

陈英英,周毓荃,毛节奏,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. *气象*, 33(4): 29-34.

李铁林,雷恒池,李艳华,等. 2010. 河南春季一次层状冷云的微物理结构特征分析. *气象*, 36(9): 74-80.

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.

辛乐,姚展予. 2011. 一次积层混合云飞机播云对云微物理过程影响效应的分析. *气象*, 37(2): 194-202.

于丽娟,姚展予. 2009. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析. *气象*, 35(10): 8-24.

赵增亮,毛节奏,魏强,等. 2010. 西北地区春季云系的垂直结构特征飞机观测统计分析. *气象*, 36(5): 71-77.

周毓荃,陈英英,李娟,等. 2008. 利用 FY-2C/D 静止卫星等综合观测资料联合反演云宏观物理特性参数产品及初步检验. *气象*, 34

(12): 27-35.

Arking A, Childs J D. 1985. Retrieval of cloud cover parameters from multi-spectral satellite images. *J Climate Appl Meteor*, 24: 322-333.

Coakley J A, Bernstein R L, Durkee P R. 1987. Effects of ship-stack effluents on cloud reflectivity. *Science*, 237: 1020-1022.

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

King M D, Kaufman Y J, Menzel W P, et al. 1992. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 30: 1-27.

King M D, Tsay S C, Platnick S E, et al. 1997. Cloud retrieval algorithms for MODIS: Optical thickness, effective particle radius, and thermodynamic phase. *NASA Goddard Space Flight Center*, 8.

Nakajima T Y, 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.

Nakajima T Y, Nakajima T. 1995. Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions. *J Atmos Sci*, 52: 4043-4059.

Nakajima T Y, Spinhirne J D, Radke L F. 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*, 48: 728-750.

Nakajima T Y, Suzuki K, Stephens G L. 2010. Droplet growth in warm water clouds observed by the A-Train. Part I: Sensitivity analysis of the MODIS-Derived cloud droplet sizes. *J Atmos Sci*, 67: 1884-1896.

Pruppacher H R, Klett J D. 1978. *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Reidel Publishing Co, 448-463.

Ricchiazzi P, Shiren Yang, Cautier C, et al. 1998. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79: 2101-2144.

Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 287(5459): 1793-1796.

Rosenfeld D, Gutman G. 1994. Retrieval microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data. *J Atmos Res*, 34: 259-283.

Rosenfeld D, Yu Xing, Dai Jin. 2005. Satellite-Retrieved microstructure of AgI seeding tracks in supercooled layer clouds. *J App Meteor*, 44: 760-767.

Twomey S, Cocks T. 1982. Spectral reflectance of clouds in the near-infrared: Comparison of measurements and calculations. *J Meteor Soc*, 60: 583-592.

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