

罗双,刘健,卢乃锰. 2013. FY-3A/VIRR 云相态业务产品检验与分析. 气象, 39(5):623-632.

# FY-3A/VIRR 云相态业务产品检验与分析<sup>\*</sup>

罗 双<sup>1</sup> 刘 健<sup>2</sup> 卢乃锰<sup>2</sup>

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 国家卫星气象中心,北京 100081

**提 要:** 选取简单云状和复杂云状作为分析对象,利用 Terra/MODIS 云相态产品对 FY-3A/VIRR 云相态产品的识别结果进行检验。对比分析采用一致性比较、差异图显示以及两种产品识别结果叠加显示等方法。结果表明:(1)简单云状条件下, FY-3A/VIRR 云相态产品与 Terra/MODIS 云相态识别结果具有较好的一致性,一致性接近 85%;复杂云状条件下,由于 Terra/MODIS 云相态识别结果中存在较多的不确定类别使两种数据识别结果的一致性下降。(2)FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 产品的不一致点主要分布在云边缘或不同云相态交界处。(3)FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 的云相态产品产生差异的原因主要来自反演算法以及产品相态分类的不同。

**关键词:** FY-3A/VIRR, MODIS, 云相态, 检验

**中图分类号:** P405

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.05.011

## Evaluation and Analysis of the Cloud Phase Product Derived from FY-3A/VIRR

LUO Shuang<sup>1</sup> LIU Jian<sup>2</sup> LU Naimeng<sup>2</sup>

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** FY-3A/VIRR cloud phase retrievals were evaluated by Terra/MODIS cloud phase products, with the single and complex cloud conditions discussed. In this study, consistency comparison, discrepancy image display as well as overlay display method for the two kinds of products were all employed. The analysis results show that the two kinds of cloud phase products have good consistency under the simple cloud condition, and the consistency rate is close to 85%, but under the complex cloud condition, the consistency between the two kinds of cloud phase products decreases because the Terra/MODIS cloud phase products have a lot of undefined phase cloud pixels. The different pixels of the FY-3A/VIRR and Terra/MODIS cloud phase products mainly distribute in the edges of clouds or the boundary parts of different cloud phases. The different cloud phase algorithm and cloud categorizing methods are the main cause for the different cloud phases between FY-3A/VIRR and Terra/MODIS.

**Key words:** FY-3A/VIRR, MODIS, cloud phase, evaluation

## 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(陈英英等,2007; 2009;章建成等,2006)。根据云滴的热力学状态可以将云分为冰云、水云和冰水混合相态云三种。云相态不仅是卫星云参数反演的关键要素,也是气象

\* 国家自然科学基金(41175022)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906002)共同资助

2012年8月3日收稿; 2012年12月31日收修定稿

第一作者:罗双,主要从事卫星遥感云参数方法研究. Email:luoshuang\_2010@163.com

学和气候学研究的重要参量,其识别准确性直接关系到云光学厚度、有效粒子半径等光学和微物理参数的反演精度(任建奇等,2010)。随着卫星有效载荷的发展,云相态的识别算法日趋成熟,科研、业务产品众多,如 NASA/Terra (Aqua) 的云产品 MOD06\_L2 (MYD06\_L2)、国际云气候计划 ISCCP 的产品数据集 DX, D1, D2、Cloudsat/CPR 的云分类产品 2B-CLD-CLASS、EUMETSAT 的云参数产品等。

我国第二代极轨系列的首发卫星—风云三号 A 星(简称 FY-3A)于 2008 年 5 月 27 日成功发射,星上携带的 11 台遥感仪器中有多个可获得云信息,例如,可见光红外扫描辐射计(VIRR)可获得云图,探测卷云及云相态,中分辨率光谱成像仪(MERSI)可探测云特性,微波成像仪(MWRD)可探测云含水量,红外分光计(IRAS)等大气探测仪器组可探测云参数(宏观等,2008;董超华等,2010;李俊等,2012)。丰富的遥感观测仪器大幅度提高了全球云资料的获取能力,为云参数反演奠定了基础。

产品精度是产品应用的基础和保障。为了更好地推动 FY-3A/VIRR 云相态数据在科研、业务工作中的使用,本文利用 Terra/MODIS 云相态产品对 FY-3A/VIRR 云相态产品进行检验,用以分析 FY-3A/VIRR 云相态产品的精度。

## 1 云相态识别的物理基础

云的辐射性质可用它们的几何特征和单次散射性质加以描述。单次散射性质又与折射指数( $m = m_r - m_i$ )、粒子大小分布和粒子形状等参数有关。

其中折射指数实部  $m_r$  表示粒子散射辐射能力,实部数值越大,散射辐射越强;虚部  $m_i$  代表粒子吸收辐射能力,虚部绝对值越大,对辐射的吸收越强(Strabala et al, 1994)。8~12  $\mu\text{m}$  的大气窗区是热红外波段的一个重要区域,云内冰、水粒子在这一波段的吸收有着很大的差异,图 1a 给出了冰、水粒子折射指数虚部在该波段的变化(Warren, 1984),图中垂直点线分别对应 8.5  $\mu\text{m}$ (MODIS 通道 29)、11  $\mu\text{m}$ (MODIS 通道 31)和 12  $\mu\text{m}$ (MODIS 通道 32)。在 8~10  $\mu\text{m}$  区间冰、水粒子折射指数虚部的值最小且相差不大,这意味着该区间内粒子的吸收较弱。在此区间外,冰、水粒子复折射指数虚部迅速增长,并且冰粒子的吸收在 10~11  $\mu\text{m}$  区间比 11~12  $\mu\text{m}$  区间增长得多,而水粒子相反(Strabala et al, 1994)。因此可联合热红外 8.5、11 和 12  $\mu\text{m}$  进行云相态反演,其反演效果已在海外多次试验中(如 SUCCESS)被 MAS(机载 MODIS 仪器)实测数据所检验(周著华等,2005)。后来, Baum 等(2000)通过辐射传输模拟发现,利用像元的 11  $\mu\text{m}$  亮温以及 8.5 与 11  $\mu\text{m}$  亮温差也可区分云相态,因此将三光谱法简化为双光谱法。最新发布的 MODIS 云相态产品采用的识别算法是双光谱法(Paul, 2010)。但到目前为止,仅 EOS/MODIS 有 8.5、11 和 12  $\mu\text{m}$  三个红外探测通道。

在可见光到中波红外波段内冰、水粒子反射太阳辐射也具有不同特性,图 1b 为水和冰在 0.0~4.5  $\mu\text{m}$  波段折射指数虚部随波长的变化,图中垂直点线分别对应 0.65  $\mu\text{m}$ (FY-3A/VIRR 通道 1)、1.64  $\mu\text{m}$ (FY-3A/VIRR 通道 6)和 3.75  $\mu\text{m}$ (FY-3A/

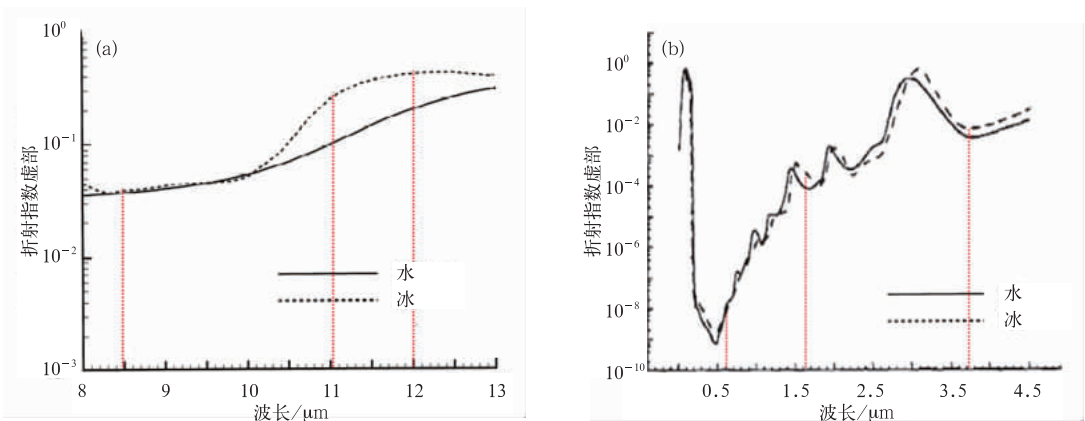


图 1 水和冰在 8~13  $\mu\text{m}$ (a)和 0.0~4.5  $\mu\text{m}$ (b)折射指数虚部  $m_i$  随波长的变化

Fig. 1 Imaginary indices of refraction for water (solid line) and ice (dashed line) over wavelengths ranging from 8–13  $\mu\text{m}$  (a) and 0.0–4.5  $\mu\text{m}$  (b)

VIRR 通道 3)。从图 1b 可见,当波长介于  $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}$  时,无论水还是冰折射指数虚部均小于  $10^{-6}$ ,对辐射的吸收非常小;当波长大于  $1.0 \mu\text{m}$  后,水和冰折射指数虚部随波长增大而增大,在  $1.64$  和  $3.75 \mu\text{m}$  附近,水和冰吸收辐射能力明显加强,但两者出现较大差异,水折射指数虚部小于冰,水吸收辐射能力小于冰。这说明,当水云和冰云粒子具有相同粒子大小及分布时,在  $0.65 \mu\text{m}$  波长,云反射辐射对云相态依赖性很小,而在  $1.64$  和  $3.75 \mu\text{m}$  波长,云粒子相态对云反射辐射大小有明显影响,冰云反射辐射比水云小,因此也可利用可见光、近红外波段或中波红外波段反射率识别云顶粒子相态 (Arking et al, 1985; Pilewskie et al, 1987; 刘健等, 2003; 1999)。由于 FY-3A/VIRR 没有  $8.5 \mu\text{m}$  通道,因此 FY-3A/VIRR 云相态产品主要采用了可见光-近红外通道技术,通过薄卷云识别、破碎云识别、近红外通道冰水相态识别、破碎云滤除等方法实现云相态识别 (杨军等, 2011)。

## 2 数据与分析方法

利用卫星的遥感观测资料进行云参数的反演,可获得较大空间尺度、连续的云光学特性和微物理特性,但对反演产品精度验证比较困难。针对反演

结果的真实性检验常用的方法主要有:利用机载数据或激光雷达探测信息检验反演参数的准确性;与其他卫星观测平台仪器进行比较验证等 (王越等, 2006)。相对于其他云相态产品而言, EOS/MODIS 云相态产品是目前国内外较为公认的云相态产品,同时,数据的获取也十分方便,可在线免费下载。因此,本文主要利用 Terra/MODIS 所提供的 MOD06 中的云相态产品数据对 FY-3A/VIRR 的云相态业务产品结果进行一致性分析。

### 2.1 FY-3A/VIRR 云产品资料

FY-3A 的全球云量与云产品分类 (简称 CAT) 是利用可见光红外扫描辐射计 (简称 VIRR) 探测得到的数据生成,该产品包括:总云量、云相态、云分类和高云量。FY-3A/VIRR 云相态日产品是基于辐射定标和地理定位的 VIRR L1 数据和云检测产品,结合使用地表类型数据,利用可见光、近红外、红外通道的光谱和纹理特性,采用阈值方法对有云像元进行相态识别,得到冰云 (ice)、水云 (water)、薄卷云 (thin cirrus) 和混合 (mix) 相态四类云相态识别结果。云相态数据为全球等经纬度网格日产品,空间分辨率  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  (杨军等, 2011)。图 2a 为 2011 年 9 月 28 日 FY-3A/VIRR 覆盖  $10^\circ \sim 60^\circ\text{N}$ 、 $65^\circ \sim 145^\circ\text{E}$  区域的云相态产品示意图。

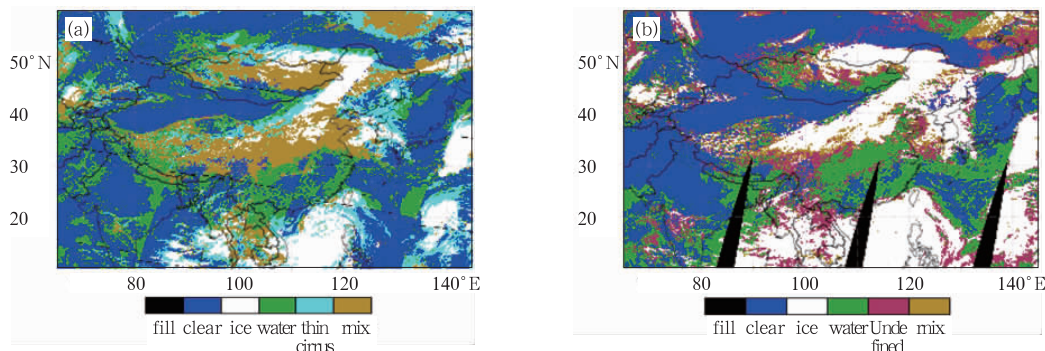


图 2 2011 年 9 月 28 日 FY-3A/VIRR(a) 和 Terra/MODIS(b) 云相态产品示意图  
(覆盖  $10^\circ \sim 60^\circ\text{N}$ 、 $65^\circ \sim 145^\circ\text{E}$  区域)

Fig. 2 Diagram of FY-3A/VIRR (a) and Terra/MODIS (b) cloud phase products on 28 september 2011  
(covering the region of  $10^\circ \sim 60^\circ\text{N}$ ,  $65^\circ \sim 145^\circ\text{E}$ )

### 2.2 Terra/MODIS 云产品资料

搭载在 EOS Terra 和 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS 具有从可见光到红外共 36 个通道,分布在  $0.4 \sim 14 \mu\text{m}$  的电磁波谱范围内,其中

直接用于遥感探测云性质的就有 10 个通道 ( $0.645$ 、 $0.858$ 、 $1.24$ 、 $1.38$ 、 $1.64$ 、 $2.13$ 、 $3.75$ 、 $8.55$ 、 $11.03$  和  $12.0 \mu\text{m}$  通道),这些探测通道为研究云的微物理性质提供了宝贵的资料 (刘健等, 2007)。本文采用的数据来自 Terra 卫星的 MODIS 云参数产品 MOD06\_

L2,数据可在线获得(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>)。Terra/MODIS 云产品包含了云顶特征、云光学特性等参数,其中云相态产品将云分为冰云、水云、混合相

态云和不确定(undefined)相态云四类(Paul et al, 2010)。2011年9月28日 Terra/MODIS 覆盖  $10^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $65^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$  区域的云相态数据如图 2b 所示。

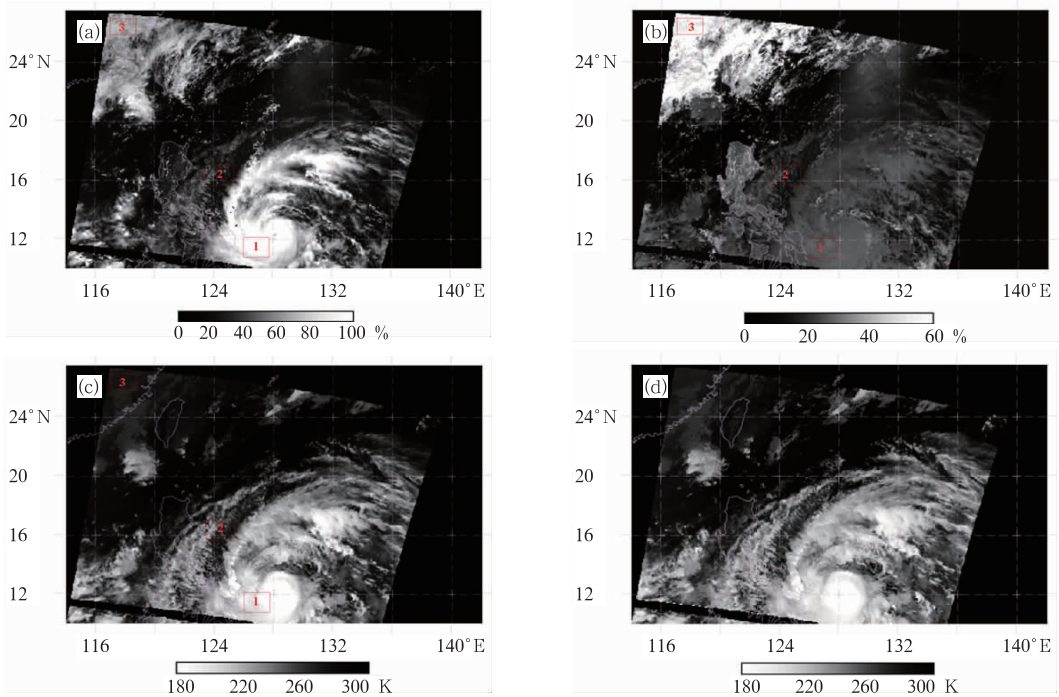


图 3 2011 年 5 月 25 日 10:00(北京时间) 反射率和亮度温度图像

(a) FY-3A/VIRR  $0.65\ \mu\text{m}$  反射率图像, (b) FY-3A/VIRR  $1.64\ \mu\text{m}$  反射率图像, (c) FY-3A/VIRR  $11\ \mu\text{m}$  亮度温度图像, (d) Terra/MODIS  $11\ \mu\text{m}$  亮度温度图像

Fig. 3 Reflectivity and brightness temperature image at 10:00 BT 25 May 2011

(a) reflectivity image at  $0.65\ \mu\text{m}$  of FY-3A/VIRR, (b) reflectivity image at  $1.64\ \mu\text{m}$  of FY-3A/VIRR, (c) brightness temperature image at  $11\ \mu\text{m}$  of FY-3A/VIRR, (d) brightness temperature image at  $11\ \mu\text{m}$  of Terra/MODIS

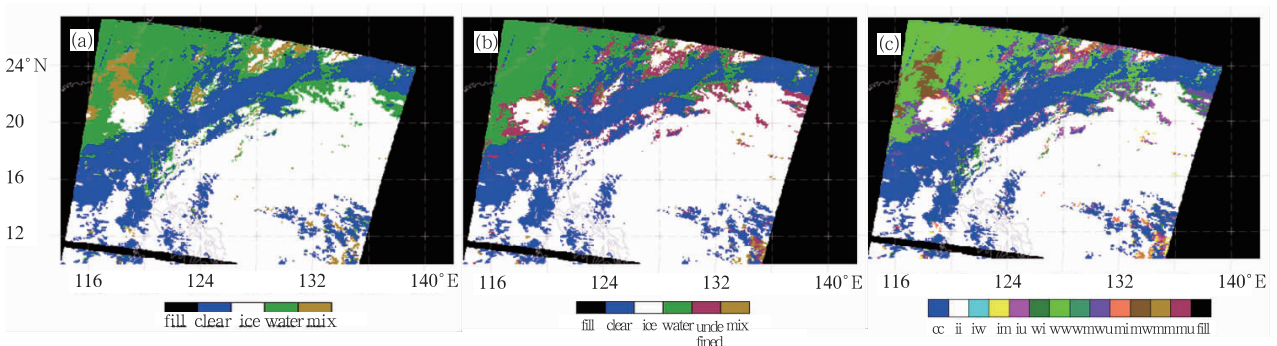


图 4 2011 年 5 月 25 日 10:00(北京时间) 云相态产品及对比检验

(a) 针对相同云检测像元的 FY-3A/VIRR 云相态产品, (b) 针对相同云检测像元的 Terra/MODIS 云相态产品, (c) FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 产品识别结果差异图

Fig. 4 Cloud phase products and comparison at 10:00 BT 25 May 2011

(a) FY-3A/VIRR cloud phase product for the same cloud detection pixels, (b) Terra/MODIS cloud phase product for the same cloud detection pixels, (c) differences between FY-3A/VIRR and Terra/MODIS cloud phase retrievals

## 2.3 数据选取与处理

为了保证对比的有效性,对 FY-3A 和 Terra 卫星数据进行时空匹配,匹配采用观测时间间隔最小、空间覆盖范围相同和空间分辨率一致的原则。本文选取间隔 15 min 内的覆盖范围相同的 Terra/MODIS 和 FY-3A/VIRR 云相态产品作为分析数据,两种数据均做等经纬度投影处理,空间分辨率为  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 。

为了排除云检测带来的分析误差,本文只针对 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 云相态产品中均为云像元的像元点进行统计分析。另外,由于 FY-3A/VIRR 云相态产品与 Terra/MODIS 云相态识别结果的类别有所差异,为便于分析,将 FY-3A/VIRR 中薄卷云归入冰云类,而对 Terra/MODIS 中不确定相态云不做处理。

## 3 个例分析

分析中引入两种数据一致率参数,一致率的定义为: FY-3A/VIRR 识别为某一相态云的像元数为  $B$ , Terra/MODIS 识别为同一相态云的像元数为  $C$ , 数据  $B$  与  $C$  的交集,即两种数据均识别为同一相态云的像元数为  $A$ , 则两种数据对该相态云识别的一致率为  $A/(B+C-A)$ 。

本文选择简单云状和复杂云状作为分析对象,分别做如下讨论。

### 3.1 个例 1

图 3 是 2011 年 5 月 25 日 10:00 (北京时) 的 FY-3A/VIRR 可见光通道(a)、近红外通道(b)、红外通道(c)及相邻观测时间的 Terra/MODIS 红外通道(d)图像,数据覆盖范围  $10.05^\circ \sim 27.45^\circ \text{N}$ 、 $114.1^\circ \sim 142^\circ \text{E}$ 。此时 2 号台风桑达中心位于 ( $12^\circ \text{N}$ 、 $128^\circ \text{E}$ ) 附近,位于台风中心部分的区域 1 (图中红框表示) 在可见光图像和红外图像上均表现为白亮密实,平均亮温 199.2 K,反映此处云层发展深厚,云顶为冰相云;位于台风云系外围的区域 2 在可见光和近红外云图上呈深灰色,近红外通道平均反射率 9.5%,平均亮温 261 K,此区域可能有薄卷云覆盖;位于中国大陆上空的区域 3 在可见光和近红外

云图上呈白色,在红外云图上呈暗灰色,近红外通道平均反射率 46.7%,平均亮温 278.7 K,说明云中含有水粒子。目视对比 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 的热红外通道图像(图 3c 和 3d),虽然两颗卫星相距 15 min 才经过同一区域,但该时间间隔内云场变化并不明显, FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 云相态产品具有可比性。

图 4a 和 4b 分别是针对相同云检测像元的 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 云相态产品识别结果,图中黑色为无效数据,蓝色为晴空或两种数据中有一种数据为云像元,白色为冰云,绿色为水云,棕黄色为混合相态云,褐红色为不确定相态云(下同)。从图 4a 和 4b 中可以看出,相邻时次、相同反演区域的 FY-3A/VIRR 产品和 Terra/MODIS 产品云分布形势和相态分布模态相同,台风桑达的主体部分在两种产品中均被识别为冰云。

表 1 为分析数据范围内,对 FY-3A/VIRR 与 Terra/MODIS 同是云像元的像元相态识别结果的对比统计。行是 FY-3A/VIRR 云相态分类,列是 Terra/MODIS 云相态分类,其中的数值是同时落在两种产品分类区间内的像元个数,最后一行和最后一列分别是 Terra/MODIS 和 FY-3A/VIRR 各类云相态总的像元个数。从表 1 可知,在所有参加分析的 103863 个云像元中, FY-3A/VIRR 判识为冰云的有 72837 个像元,占总分析云像元的 70.13%; Terra/MODIS 云相态识别结果判定为冰云的像元数有 73471 个,占总分析云像元的 70.74%; 两者间有 69435 个像元被 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 共同判识为冰云,两种数据判识结果一致性为 90.32%。 FY-3A/VIRR 水云像元有 26264 个,占总分析云像元的 25.29%; Terra/MODIS 水云像元有 20949 个,占总分析云像元的 20.17%; 两种数据判识结果一致性为 64.24%, 统计数据反映出 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 两者对水云的判识存在较大的偏差。在 FY-3A/VIRR 云相态识别结果中,混合相态云的比例较少,只有 4762 个像元,占总云像元的 4.58%; Terra/MODIS 云相态识别结果中,混合相态云仅占总云像元的 1%, 此外还有 8.1% 的云像元相态不确定。根据一致率的定义可知,两种产品混合相态云、不确定相态云的不一致同时也会影响其他相态识别的一致性。由于 FY-3A/

VIRR 的混合相态云像元中有 2134 个在 Terra/MODIS 中被判识为水云,同时 Terra/MODIS 不确定相态云像元中有 4824 个被 FY-3A/VIRR 判定为水云,因此水云一致性受到较大影响。另外, FY-

3A/VIRR 中的水云像元有 2932 个在 Terra/MODIS 中被判定为冰云像元,这部分云像元很可能是薄卷云,由于两种产品算法的不同而引起识别结果的差异。

表 1 2011 年 5 月 25 日 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 云相态产品识别结果对比统计

Table 1 Coherence verification of cloud phase products of FY-3A/VIRR and Terra/MODIS on 25 May 2011

		Terra/MODIS 云相态产品分类				FY-3A/VIRR 各相态像元数总计
		冰云像元数	水云像元数	混合相态云像元数	不确定相态云像元数	
FY-3A/VIRR 云相态产品分类	冰云(薄卷云)像元数	69435	348	643	2411	72837
	水云像元数	2932	18467	41	4824	26264
	混合相态云像元数	1104	2134	355	1169	4762
Terra/MODIS 各相态像元数总计		73471	20949	1039	8404	103863

为了更好地分析两种云相态数据的差异,制作两种数据云相态识别差异图(图 4c)。色标中第一个字母和第二个字母分别代表 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 云相态产品识别结果,冰云记为 i,水云记为 w,混合相态云记为 m,不确定相态云记为 u。检验结果用不同颜色表示,具体的定义如表 2 所示。由于本文只讨论两种产品相同云检测像元云相态的一致性,因此对于某一像元而言,只要两种产品有其中之一被检测为晴空,则该像元不参加云相态识别结果对比分析,用 cc 表示。从图 4c 中可以看出, FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 均识别为冰云

(ii)和均识别为水云(ww)的像元占了大部分区域,说明两种产品的一致性较高。两种相态数据不一致主要分布在云系外围,如台风云系外围的卷云羽,云像元的 FY-3A/VIRR 红外通道亮温较高,能达到 273 K,云层很薄,可见光反射率小于 40%。还有一部分相态不一致点是由于 Terra/MODIS 中的不确定相态云点引起,这些点分布在云边缘或不同云相态交界处。此外,出现偏差还主要表现在两种数据对水云和混合相态云的判识和区分(20°~25°N、116°~120°E)。

表 2 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 产品识别结果对比图色标定义

Table 2 Color definition of identified result comparison of FY-3A/VIRR and Terra/MODIS products

		Terra/MODIS 云相态产品分类			
		冰云	水云	混合相态云	不确定相态云
FY-3A/VIRR 云相态产品分类	冰云(含薄卷云)	ii	iw	im	iu
	水云	wi	ww	wm	wu
	混合相态云	mi	mw	mm	mu

统计各相态在总云像元中所占比例可知,云场中无论是 FY-3A/VIRR 云相态识别结果还是 Terra/MODIS 云相态识别结果,冰云像元占总云像元个数的 70%以上,水云像元占 20%以上,混合相态云、不确定相态云较少,云场较为简单。总的来说,两种云相态产品识别一致的冰云、水云和混合相态云像元总数占总分析云像元的 84.97%,识别一致性较高。

### 3.2 个例 2

图 5 是 2011 年 6 月 5 日 11:30(北京时)的 FY-

3A/VIRR 可见光通道(a)、近红外通道(b)、红外通道(c)及相同观测时间的 Terra/MODIS 红外通道(d)图像,数据覆盖范围 19.8°~38.55°N、95.85°~123.7°E。区域 1 在可见光和近红外通道图像上均较亮,可见光通道平均反射率 61.2%,近红外通道平均反射率 51.4%,这里云层光学厚度较大且云顶粒子尺度较小;区域 2 在可见光云图、红外云图上较亮,而在近红外通道云图上表现较为灰暗,区域中云像元可见光通道反射率平均为 61.8%,近红外通道平均反射率 28%,红外窗区通道平均亮温 243.7 K,反映区域 2 以光学厚度较大、温度较低的冰云为主。

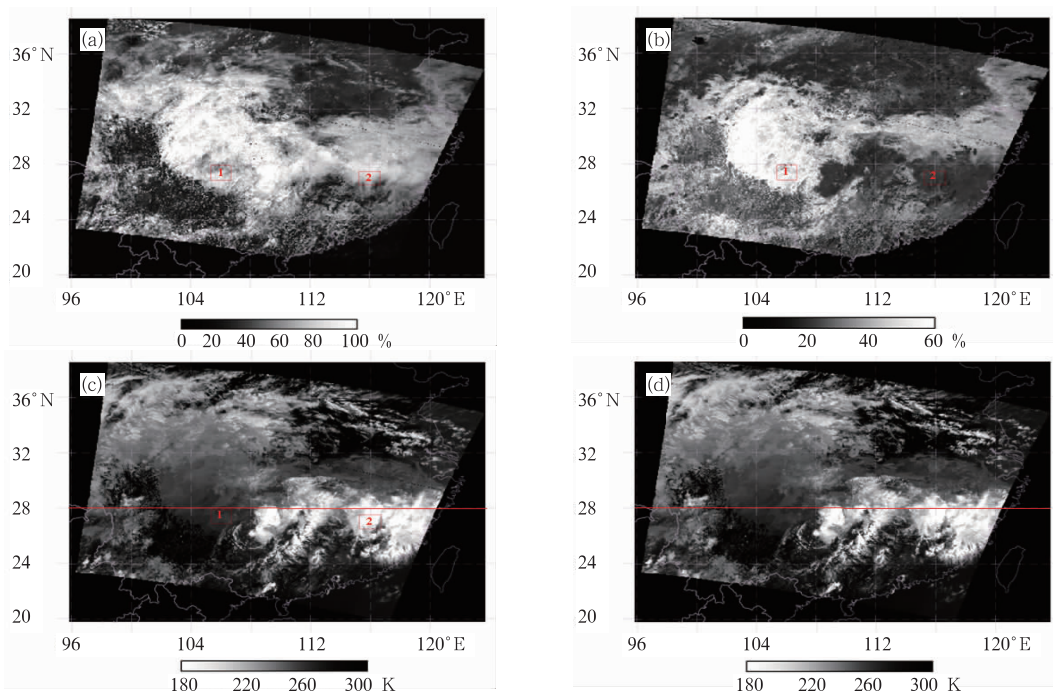


图 5 2011 年 6 月 5 日 11:30(北京时间) 反射率和亮度温度图像

(a) FY-3A/VIRR 0.65 μm 反射率图像, (b) FY-3A/VIRR 1.64 μm 反射率图像, (c) FY-3A/VIRR 11 μm 亮度温度图像, (d) Terra/MODIS 11 μm 亮度温度图像

Fig. 5 Reflectivity and brightness temperature images at 11:30 BT 5 June 2011

(a) reflectivity image at 0.65 μm of FY-3A/VIRR, (b) reflectivity image at 1.64 μm of FY-3A/VIRR, (c) brightness temperature image at 11 μm of FY-3A/VIRR, (d) brightness temperature image at 11 μm of Terra/MODIS

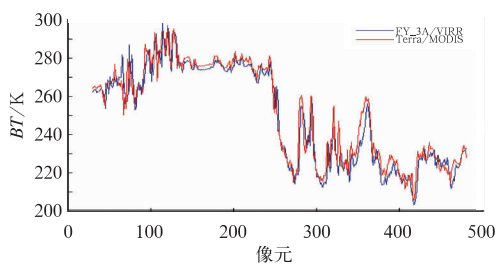


图 6 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 仪器扫描线沿 28°N 上各像元的 11 μm 亮度温度值

Fig. 6 Brightness temperature at 11 μm of pixels along 28°N for FY-3A/VIRR and Terra/MODIS

目视对比 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 的热红外通道图像(图 5c 和 5d),发现相同时次的两种数据的红外窗口通道亮温分布具有较好的一致性。图 6 是沿 28°N 剖面(图 5c 和 5d 中红色实线)上像元 FY-3A/VIRR、Terra/MODIS 的 11 μm 亮度温度分布。从图 6 可知,尽管两颗卫星的仪器参数不同,但两条曲线的亮温值变化趋势一致。

图 7a 和 7b 分别是相同时次、相同区域、针对相

同云检测像元的 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 云相态产品识别结果,可以看出云场中除了含有冰云和水云,还含有一定比例的混合相态云和不确定相态云,云场较为复杂。Terra/MODIS 中不确定相态云主要分布在云边缘或不同相态交界处。

表 3 为分析数据范围内,对 FY-3A/VIRR 与 Terra/MODIS 同是云像元的像元相态识别结果的对比统计。从表 3 可知,在所有参加分析的 119640 个云像元中,FY-3A/VIRR 判识为冰云的有 56834 个像元,占总分析云像元的 47.5%;Terra/MODIS 云相态识别为冰云的像元数有 53526 个,占总分析云像元的 44.74%;两者间有 46209 个像元被 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 共同判识为冰云,两种数据判识结果一致性为 72.03%。FY-3A/VIRR 水云像元有 29299 个,占总分析云像元的 24.49%;Terra/MODIS 水云像元有 34912 个,占总分析云像元的 29.18%;两种产品对水云判识的一致性为 36.53%。在 FY-3A/VIRR 云相态识别结果中,混合相态云像元有 33507 个,占总分析云像元的 28.01%;

表 3 2011 年 6 月 5 日 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 云相态产品识别结果对比统计  
Table 3 Coherence verification of FY-3A/VIRR and Terra/MODIS cloud phase product on 5 June, 2011

		Terra/MODIS 云相态产品分类				FY-3A/VIRR 各相态像元数总计
		冰云像元数	水云像元数	混合相态云像元数	不确定相态云像元数	
FY-3A/VIRR 云相态产品分类	冰云(薄卷云)像元数	46209	1922	3661	5042	56834
	水云像元数	3720	17181	129	8569	29299
	混合相态云像元数	3597	15809	2466	11635	33507
Terra/MODIS 各相态像元数总计		53526	34912	6256	24946	119640

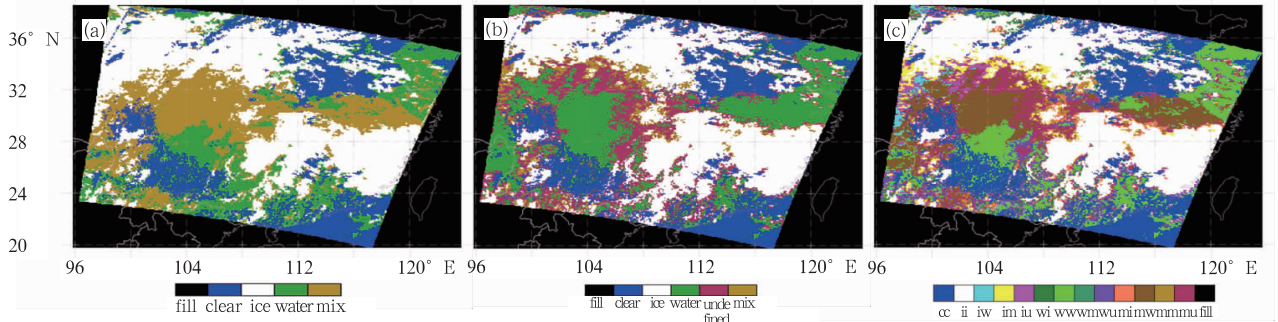


图 7 2011 年 6 月 5 日 11:30(北京时间) 云相态产品及对比检验

(a) 针对相同云检测像元的 FY-3A/VIRR 云相态产品, (b) 针对相同云检测像元的 Terra/MODIS 云相态产品, (c) FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 产品识别结果差异图

Fig. 7 Identified cloud phase products and comparison at 11:30 BT on 5 June 2011

(a) FY-3A/VIRR cloud phase product for the same cloud detection pixels, (b) Terra/MODIS cloud phase product for the same cloud detection pixels, (c) differences between FY-3A/VIRR and Terra/MODIS cloud phase retrievals

Terra/MODIS 混合相态云像元有 6256 个, 占总分析像元的 5.23%, 此外还有 20.85% 的云像元相态不确定。统计数据反映云场中含有一定比例的混合相态云和不确定相态云, 云场较为复杂。总的来说, 两种产品一致的冰云、水云和混合相态云像元总数占总分析云像元的 55.05%。

图 7c 是两种云相态产品差异图像。可以看到, 成片的白色区域是 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 均识别为冰云的像元, 草绿色是两者均识别为水云的像元, 深褐色是 FY-3A/VIRR 识别为混合相态云而 Terra/MODIS 识别为水云的像元, 这三种相态识别结果在图像中占的比重最大。云相态偏差大部分出现在(28°~32°N)纬度带中, 主要为 FY-3A/VIRR 识别为混合相态云, Terra/MODIS 识别为水云或不确定相态云(104°E、116°E 左右); FY-3A/VIRR 识别为冰云或水云, Terra/MODIS 识别为不确定相态云, 分布在云边缘或不同相态交界处。

为了进一步分析 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 云相态识别结果的异同及其不同相态类别云像

元不同探测通道探测值的分布, 将 FY-3A/VIRR 产品中冰云(a)、水云(b)和混合相态云(c)像元对应的 Terra/MODIS 云相态判识结果, 以及各相态所有像元点的 FY-3A/VIRR 近红外通道反射率和红外通道亮温的直方图统计分布进行叠加(图 8)。从图 8a 可知, FY-3A/VIRR 中 90% 以上的冰云像元近红外反射率分布在 14%~30%, 红外亮温分布在 216~273 K, FY-3A/VIRR 中的所有冰云像元在 Terra/MODIS 中除了大部分被识别为冰云外, 还有小部分被识别为水云、混合相态云和不确定相态云, 这些不一致云像元点的亮温峰值在 250 K 附近, 与冰云的亮温分布的峰值接近。图 8b 是 FY-3A/VIRR 中水云的情况, 其近红外反射率峰值分布在 30%~40%, 红外亮温主要分布在 270~295 K, FY-3A/VIRR 中的水云像元在 Terra/MODIS 中识别为水云、冰云和混合相态云, 所有相态类型云像元的近红外通道反射率和红外通道亮温统计直方图峰值接近。图 8c 中 FY-3A/VIRR 的混合相态云像元近红外反射率峰值分布在 40%~45%, 红外亮温峰



值分布在 265K 附近, 这些像元点在 Terra/MODIS 中被识别为冰云、水云、混合相态云和不确定相态云, 不同相态类型云像元的通道探测值直方图峰值分布出现明显不同, 反映 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 云相态识别结果在混合相态云识别中的偏

差较大。由于 FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 红外通道亮温分布相似(图 6), 产生云相态识别偏差, 尤其是混合相态云识别偏差的主要原因可能来自两种云相态识别算法的差异。

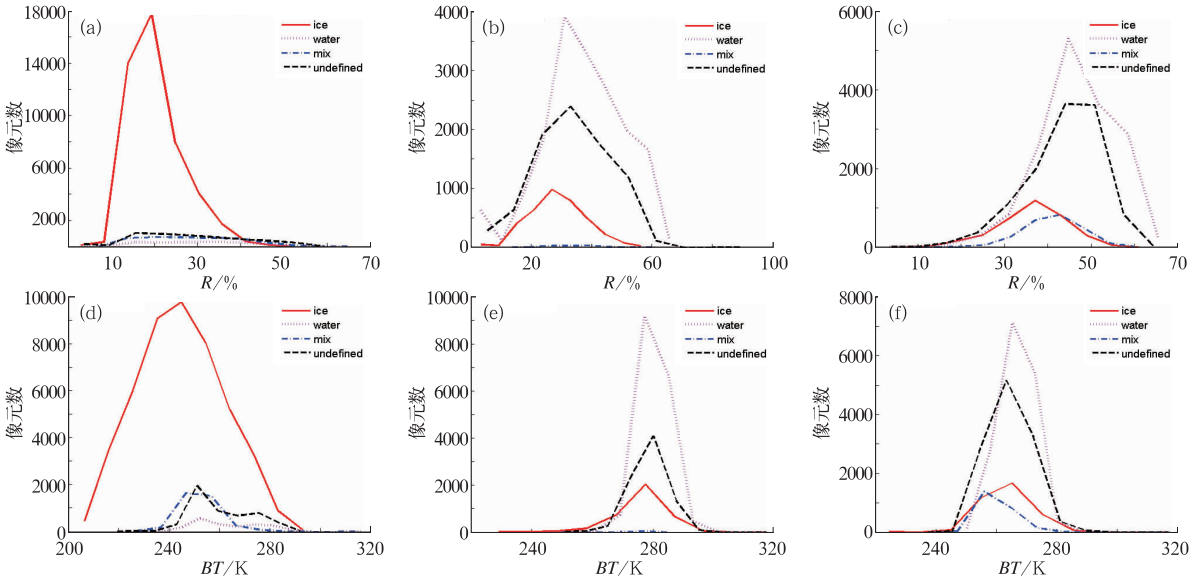


图 8 2011/06/05 FY-3A/VIRR 各相态云像元对应的 Terra/MODIS 云相态判别结果及其辐射值的分布 (曲线为辐射值频数分布直方图中各小长方形上端中点连线)

(a, d) 冰云, (b, e) 水云, (c, f) 混合相态云; (a, b, c) FY-3A/VIRR 1.64 μm 反射率, (d, e, f) FY-3A/VIRR 11 μm 亮度温度

Fig. 8 Distributions of Terra/MODIS cloud phase shown with respect to FY-3A/VIRR retrieved cloud radiation value for clouds classified by FY-3A/VIRR as (a, d) ice, (b, e) water, (c, f) mixed phases; (a, b, c) reflectance at 1.64 μm of FY-3A/VIRR, (d, e, f) brightness temperature at 11 μm of FY-3A/VIRR (Curves are the ligature by the rectangle midpoint of radiation value frequency distribution histogram)

此外, 由于 Terra/MODIS 云相态产品独立分出了不确定相态云, 而 FY-3A/VIRR 云相态产品中并没有此类, 不同相态类型的定义也会引起两种云相态产品间出现差异。

#### 4 小 结

本文选取简单云状和复杂云状作为分析对象, 利用 Terra/MODIS 云相态产品对 FY-3A/VIRR 云相态产品的识别结果进行检验。Terra/MODIS 云产品 MOD06\_L2 提供 5 km 分辨率的云相态科学数据集, 其云相态识别采用热红外双光谱法, 将云分为冰云、水云、混合相态云和不确定相态云。在选取相近观测时间、相同观测区域、相同空间分辨率数据基础上, 本文利用 Terra/MODIS 云相态产品对

FY-3A/VIRR 云相态产品识别精度进行对比分析。由于两种产品的云相态产品分类标准不同, 为便于对比, 将 FY-3A/VIRR 云相态识别结果中的薄卷云归入冰云, 而对 Terra/MODIS 云相态识别中的不确定相态类别不作处理。对比分析采用一致性比较、差异图显示以及两种产品识别结果叠加显示等方法。结果表明:

(1) 简单云状下, 对于同为云像元的相态识别, FY-3A/VIRR 产品总的云像元中有 84.97% 的云像元与 Terra/MODIS 产品识别结果一致。在复杂云状条件下, 由于 Terra/MODIS 云相态识别结果中设定了不确定相态类型, 而 FY-3A/VIRR 云相态识别类型中无对应类型, 使得两种云相态数据的一致性较简单云状条件下降低。除不确定相态类型带来的两种云相态数据偏差外, 出现偏差还主要表现在

两种数据对水云和混合相态云的判识和区分。

(2) FY-3A/VIRR 和 Terra/MODIS 云相态产品的不一致点主要分布在云边缘或不同云相态交界处,其产生差异的原因主要来自反演算法以及产品相态分类的不同。

(3) 改进 FY-3A/VIRR 混合相态云识别算法,将有利于进一步提高云相态识别精度。

## 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.

陈英英,唐仁茂,周毓荃,等. 2009. 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. 气象, 35(2): 15-18.

董超华,杨军,卢乃锰,等. 2010. 风云三号 A 星(FY-3A)的主要性能与应用. 地球信息科学学报, 12(4): 459-465.

宏观,张文建. 2008. 我国气象卫星及应用发展与展望. 气象, 34(9): 3-9.

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,朱元竞,等. 2003. FY-1C 资料在云顶粒子热力学相态分析中的应用研究. 大气科学, 27(5): 901-908.

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,张文建,朱元竞,等. 2007. 中尺度强暴雨云团云特征的多种卫星资料综合分析. 应用气象学报, 18(2): 158-164.

任建奇,严卫,叶晶,等. 2010. 云相态的卫星遥感研究进展. 地球科学进展, 25(10): 1051-1060.

王越,吕达仁,霍娟. 2006. 利用透射太阳辐射反演云光学厚度及有效粒子半径:方法研究. 自然科学进展, 16(7): 850-858.

杨军,董超华,等. 2011. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用. 北京:科学出版社, 181-183.

章建成,刘奇俊. 2006. GRAPES 模式不同云物理方案对短期气候模拟的影响. 气象, 32(7): 3-12.

周著华,白洁,刘健文,等. 2005. MODIS 多光谱云相态识别技术的应用研究. 应用气象学报, 16(5): 678-684.

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

Baum B A, Soulen P F, Strabala K I, et al. 2000. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS 2. Cloud thermodynamic phase. Journal of Geophysical Research, 105(D9): 11780-11792.

Paul W Menzel, Richard A F, Bryan A B. 2010. Cloud Top Properties and Cloud Phase Algorithm Theretical Basis Document. version 8.

Pilewskie P, Twomey S. 1987. Cloud phase discrimination by reflectance measurements near 1.6 and 2.2  $\mu\text{m}$ . Atmos Sci, 44: 3419-3420.

Strabala K I, Ackerman S A. 1994. Cloud properties inferred from 8  $\sim$  12  $\mu\text{m}$  data. Journal of Applied Meteorology, 33(2): 212-229.

Warren S G. 1984. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave, Appl Opt, 23: 1206-1224.