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

周毓荃[1] 陈英英[2,3] 李 娟[1] 黄毅梅[2,4] 何小东[2]
周非非[1] 吴门新[1] 胡 波[5] 毛节泰[6]

(1. 国家气象中心,北京,100081; 2. 南京信息工程大学; 3. 湖北省人工影响天气办公室;
4. 河南省人工影响天气办公室; 5. 浙江省气象台; 6. 北京大学)

提 要: 云的宏微观物理特性参数无论对天气、气候还是人工影响天气的研究和业务都有十分重要的应用价值。基于FY-2C/D静止卫星遥感观测,融合高空和地面等其它观测资料,研发了近10种云宏微观物理特性参数的反演技术方法,并实现业务化运行。简单介绍反演得到的云顶高度、云顶温度、云过冷层厚度、云暖层厚度、云底高度、云体厚度、云光学厚度、云粒子有效半径和云液水路径等近10种云宏微观物理参数产品的物理意义、反演技术方法和业务流程等;对主要云参数产品,利用最新获得的Cloudsat云卫星实测结果进行了对比检验和可用性分析;将反演产品同MODIS反演的同类产品进行对比分析,发现两者具有较好的一致性。

关键词: FY-2C/D 联合反演 云参数产品 检验

Retrieval and Preliminary Test of Cloud Physical Parameters from Combination of FY-2C/D Geostationary Satellite Data and Other Observation Data

Zhou Yuquan[1] Chen Yingying[2,3] Li Juan[1] Huang Yimei[2,4]
He Xiaodong[2] Zhou Feifei[1] Wu Menxin[1] Hu Bo[5] Mao Jietai[6]

(1. National Meteorological Centre, Beijing 100081; 2. Nanjing University of Information Science & Technology;
3. Weather Modification Office of Hubei Province; 4. Weather Modification Office of Henan Province;
5. Zhejiang Meteorological Observatory; 6. Beijing University)

Abstract: Cloud macro and micro physical characteristic parameters play an important role not on-

资助项目: 国家"十一五"科技支撑课题"人工增雨信息处理技术研究"(2006BAC12B07)。
收稿日期: 2008年8月30日; 修定稿日期: 2008年10月21日

ly in the field of the analysis and forecast of the weather and climate, but also in the field of weather modification to identify the seeding condition. Based on the data from FY－2C/D stationary satellite and SBDART radiation transfer model, associated with the sounding data and surface information, a method retrieving cloud macro and micro physical parameters is established in this research. These parameters include cloud top height, cloud top temperature, depth of super－cooled layer, depth of warm layer, cloud bottom height, depth of cloud, cloud optical thickness, cloud effective particle radius and cloud liquid water content. It has been run operationally. In this paper, the correlated information such as physical meaning, retrieving method and technology, retrieving process and data format are simply introduced. Furthermore, comparing with the observation of Cloudsat up to the minute, the retrieving results of main cloud parameters are proved to be reasonable and usable. By contrast with same kind products of MODIS, it also shows good corresponding relationship.

Key Words: FY－2C/D joint retrieval cloud parameter products test

引 言

云在天气、气候、环境及人工影响天气等诸多领域的研究具有重要作用。获取大范围云系宏微观物理特征参数，对系统的追踪把握不同动力条件下云系演变规律，开展精细化天气分析预测，以及对监测识别大范围人工影响天气作业条件、分析可播区和播云效果等，具有十分重要的意义。

目前，利用各种卫星资料提取云特征参数已经作了不少工作，主要以极轨卫星的反演为多。Daniel Rosenfeld，刘健等人曾经利用NOAA卫星做过一些研究分析[1-3]，Terra/Aqua卫星上的MODIS也有一些关于云参数的产品[4]，虽然极轨卫星空间分辨率较高，但极轨卫星一天两个时次的资料，对于云降水监测分析特别是人工影响天气追云观测来说，是远远不够的。李娟[5]等用较高时间分辨率(1小时1次)的GMS-5静止卫星反演了云顶高度、云顶温度和云粒子有效半径等三个参量，改善了低时间分辨率不能用于连续监测云变化的不足，但GMS-5缺乏对粒子大小十分敏感的中红外通道，对云微物理参量的反演存在一定的局限性。

FY-2C静止卫星是由我国自主研制并于2005年6月1日正式投入运行的业务卫星，拥有较高的时间频次，通常一个小时一次资料，6—9月的汛期加密至半小时一次，2007年FY-2D的发射使得卫星资料的时间间隔缩短至15分钟，十分有利于跟踪监测目标云系。其主要探测器VISSR除可见光通道、两个长波红外窗区通道及水汽通道外，还有对粒子大小十分敏感的中红外通道(3.5—4.0μm)，这些条件为反演获得高时间分辨率较高精度的云物理特性参量打下了基础。然而，仅靠卫星资料来反演多类云宏微观物理参量是不够的。为此，本研究根据FY-2C/D卫星的条件，融合高空和地面等其它观测信息联合反演，尝试开发了一套包括云顶高度、云顶温度、云过冷层厚度、云暖层厚度、云底高度、云体厚度、云光学厚度、云粒子有效半径、云液水路径等云宏微观物理特征参数的反演方法，并业务化运行，形成了近10个云宏微观物理特征参数的系列产品，其中部分产品已于2006年1月1日开始发布。

本文将简单介绍反演获得的近10种云宏微观物理参数的基本情况、物理意义、反演

方法和业务反演流程,并在此基础上与 Cloudsat 云卫星探测结果和 MODIS 同类反演产品进行对比检验,初步分析了主要云参数的可用性。以期使这些高时空分辨率(间隔 15～60 分钟一组)的云宏微观物理特征参数产品,在云系演变特征监测、短时临近精细天气分析及人工影响天气播云条件分析等实时业务中发挥更大作用。

1　云参数产品简介

1.1　已开发的云宏微观物理特性参数产品

基于 FY-2C/D 静止卫星资料融合探空和地面观测等综合观测资料,开发了反映云宏观特性和微观物理特性的两大类产品,目前初步完成的有 6 种宏观物理特性产品,包括:云顶高度、云顶温度、云过冷层厚度、云暖层厚度、云底高度和云体厚度等;3 种微观物理特性产品,包括:云光学厚度、云粒子有效半径和云液水路径等,其中云顶高度、云顶温度、云过冷层厚度、云粒子有效半径 4 种云参数已准业务化发布。结合微波辐射计等其它资料还在不断发展云液水含量等更多的云参数产品。

1.2　云参数产品的物理意义

系列云参数产品的物理意义和可能作用分别为:

• 云顶高度(Z_{top}):云顶相对地面的距离,单位为(km)。有助于了解云系的发展程度和演变趋势。

• 云顶温度(T_{top}):云顶所在高度的温度,单位为(℃)。可用于进行人工增雨云系播云温度窗的选择。

• 云过冷层厚度(h_h):0℃层到云顶之间的厚度,单位为(km)。可用于了解云系冷暖云垂直结构配置。

• 云暖层厚度(h_w):云底到 0℃层之间的厚度,单位为(km)。有助于了解云系垂直冷暖配置结构和发展演变趋势。

• 云底高度(Z_{bot}):云底相对地面的距离,单位为(km)。有助于了解云系发展演变程度和降水发生的可能趋势。

• 云体厚度(Z):云底到云顶之间的厚度,单位为(km)。有助于了解云系垂直方向整层发展演变趋势。

• 云光学厚度(τ_e):是指云系在整个路径上云消光的总和,为无量纲参数,可用于了解云系垂直方向厚实程度。

• 云粒子有效半径(r_e):在假设云层水平均一且较厚的条件下,云顶粒子的有效半径,单位为(μm)。可用于进行云中平均粒子大小的判断。

• 液水路径(L_{wp}):是指单位面积云体上的垂直方向的液水总量,或叫柱液水量,单位为($g \cdot m^{-2}$)。可用于了解垂直方向上云水的丰沛程度。

1.3　产品时间分辨率和空间分辨率

云参数产品的时空分辨率主要依赖 FY-2C/D 本身的精度,时间分辨率有两种情况,单星(FY-2C)运行时段(非汛期)每隔 30～60 分钟一组产品,双星(FY-2C 星和 D 星)同时运行时段(汛期),每隔 15 分钟就可得到一组产品;空间分辨率系统采用 0.05°×0.05°资料反演计算,产品星下点空间分辨率可达为 5km;产品覆盖范围:0～60°N、70～150°E。

1.4　产品传输途径和资料格式

产品传输有 3 种方式:(1)日常通用产品:现阶段通过气象网站每隔 30～60 分钟发布一次;(2)应急特殊需要的产品:根据特殊需要加工后,采用不同方式点对点发布;(3)本地化实时运行反演:对有条件的用户,直接

安装简版云参数反演系统，实时获取所需各类本地化参数。

产品数据格式：为方便不同目的和不同用户的使用，输出产品包括：二进制格式、文本格式、图片格式、MICAPS13类格式和MICAPS4类数据格式等。

2 云参数产品的反演方法

根据云参数的性质分宏观云参数的反演及微观云参数的反演两类介绍。

2.1 宏观云参数反演方法

云宏观物理参量目前主要包括云顶高度、云顶温度、云过冷层厚度、云暖层厚度、云底高度和云体厚度等，其反演方法简略介绍如下：

2.1.1 云顶温度和云顶高度的初步反演

采用平面平行辐射传输模式SBDART2.2 (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer)计算分析卫星红外两个通道的亮温与云顶温度之差随高度的变化。给出在两个红外通道拟合得到的卫星亮度温度和云顶温度的差值随着有效半径和云顶高度的变化。最后，拟合得到各个有效半径时温度差值随云顶高度变化的关系式：

✚ 红外通道一(a_1，b_1 随有效半径变化)：

$$T_{top} - T_{b_1} = a_1 \log(H_{top}) + b_1 \qquad (1)$$

✚ 红外通道二(a_2，b_2 随有效半径变化)：

$$\log(T_{top} - T_{b_2}) = a_2 \log(H_{top}) + b_2 \qquad (2)$$

式中 T_{b_1}，T_{b_2} 为卫星亮温，T_{top} 为云顶温度，Z_{top} 为云顶高度。a_1，a_2，b_1，b_2 分别为有效半径的函数。三个方程联合求解，迭代计算得到云顶温度和云顶高度的初步计算值。

2.1.2 云顶温度和云顶高度的反演精度改进和云体过冷层厚度的反演计算

在上述计算中，使用了美国标准大气廓线温度和高度 $T_{top} = b_3 - a_3 Z_{top}$ 的线性关系。为了提高反演精度，在反演计算中改用实时探空资料参与反演计算。利用根据局地探空资料建立的温度和高度之间的相关关系式，代替美国标准大气廓线温度和高度关系式参与反演计算。其中，表达为：

$$T_{top} = a_4 Z_{top} + b_4 \qquad (3)$$

这里 $a_4 = \dfrac{n\sum Z_{top} T_{top} - \sum Z_{top} \sum T_{top}}{n\sum Z_{top}^{\ 2} - (\sum Z_{top})^2}$，

$$b_4 = \overline{T_{top}} - k_4 Z_{top} \qquad (4)$$

在反演计算中，使用所有站点的探空资料，按照空间对应的方法，通过站间资料内插处理，探空资料的质量控制，温度和高度关系式的拟合，逐一参与反演处理等，改进云顶温度和云顶高度的反演精度。

在改进云顶温度和云顶高度的同时，由实时探空还得到了云的0℃层高度参数，结合反演的云顶高度，进而得到云过冷层厚度等云宏观参数。

2.1.3 云底高度及暖层厚度和云体厚度的反演

利用高时空密度的地面自动站观测获得的温度、露点和气压信息，发展了一种新的抬升凝结高度计算方法，结合探空和云分类产品，得到大范围同卫星反演云顶高度分辨率相当的近似的云底高度值[8]。

根据多站实时探空得到的云的0℃层高度，结合反演的云顶高度和云底高度，进而得到云暖层厚度、云体厚度等云宏观特征参量。

2.1.4 宏观云参数反演计算流程

目前得到的6种宏观云特征参数的反演计算流程，见图1。

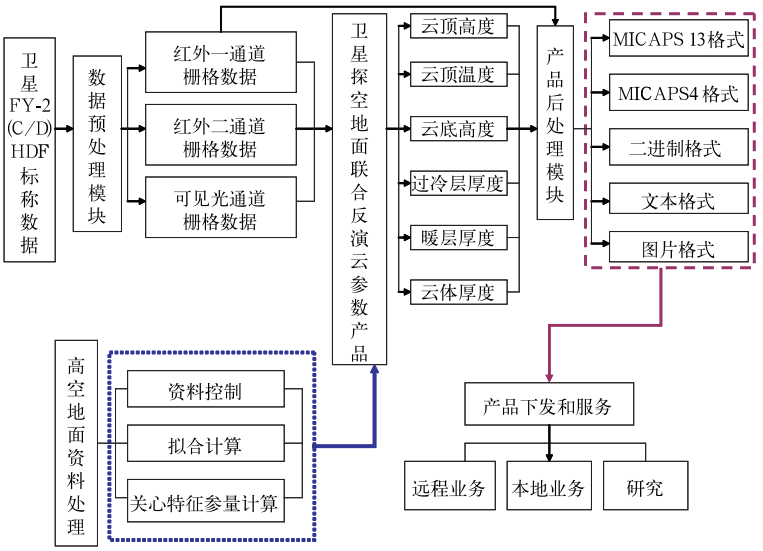


图 1　FY2C/D 宏观云物理特征参数反演流程

2.2　微观云参数反演方法

FY-2C/D 静止卫星的中红外通道(3.5～4.0μm)对于粒子大小具有较高的敏感性,据此利用 FY-2C/D 静止卫星可见光、近红外和红外一通道三个通道数据联合反演得到微观云参数产品,目前主要包括:云光学厚度、云粒子有效半径和云液水路径。

2.2.1　理论基础

① 当光学厚度足够大,并且反射辐射场为各向同性时,云层的反射函数可以用渐近式表示。在守恒散射的情况下(┘$_0$=1),有

$$R(\tau_c;\mu,\mu_0,\phi)=R_\infty(\mu,\mu_0,\phi)-\frac{4(1-A_g)K(\mu)K(\mu_0)}{[3(1-A_g)(1-g)(\tau_c+2q_0)+4A_g]} \tag{5}$$

式中 $R_\infty(\mu,\mu_0,\phi)$ 是半无限大气的反射函数,$K(\mu)$ 是逸出函数,q_0 是对于守恒散射的外推长度,g 为非对称因子,$q'=(1-g)q_0$ 是还原外推长度。

② 对于非守恒散射(┘$_0$<1)的情况,云顶的反射函数为

$$R(\tau_c;\mu,\mu_0,\phi)=R_\infty(\mu,\mu_0,\phi)-\frac{m[(1-A_gA^*)l-A_gmn^2]K(\mu)K(\mu_0)\mathrm{e}^{-2k\tau_c}}{[(1-A_gA^*)(1-l^2\mathrm{e}^{-2k\tau_c}+A_gmn^2l\mathrm{e}^{-2k\tau_c}]} \tag{6}$$

式中 k 是一个描述漫散射辐射衰减的指数,m 和 l 是依赖于单次散射反照率和不对称因子的常数,这些函数和常数可以通过拟合方法决定。

2.2.2　微物理参数的反演

2.2.2.1　云光学厚度的确定

解式(5)可得守恒散射情况下定标光学厚度为

$$\tau_c'=(1-g)\tau_c=\frac{4K(\mu)K(\mu_0)}{3[R_\infty(\mu,\mu_0,\phi)-R(\tau_c;\mu,\mu_0,\phi)]}-2q'-\frac{4A_g}{3-(1-A_g)} \tag{7}$$

可以看出,在非水汽吸收波段,尺度化的光学厚度 τ_c' 与 q'、A_g、$K(\mu)$ 以及测量辐射与大气辐射间的差相关。因此,在 q'、A_g、$K(\mu)$ 以及 $R_\infty(\mu,\mu_0,\phi)$ 可以近似确定的情况下,能够建立尺度化的光学厚度 τ_c' 与非吸收波段的反射函数测量值 $R(\tau_c;\mu,\mu_0,\phi)$ 的对

应关系。

2.2.2.2 云粒子有效半径的反演

云粒子有效半径 r_e 是一个光学物理量，研究云粒子有效半径对于云雾物理、大气物理过程的研究有重要意义。研究发现，对于明显的暖云和冷云降水来说，云滴的有效半径至少要达到 12μm[6]。

从式(6)可以看出，在水汽吸收波段，反射函数 $R(\tau_c;\mu,\mu_0,\phi)$ 除了与 $R_\infty(\mu,\mu_0,\phi)$、A_g、$K(\mu)$、τ_c 相关外，还与 k、A^*、m、m、l 5 个常数相关，这 5 个参数可综合用相似性参数 s 表示，s 主要与 r_e 有关，因此，在 $R_\infty(\mu,\mu_0,\phi)$、A_g、$K(\mu)$、τ_c 可近似确定的情况下，同样能够建立有效粒子半径 r_e 与反射函数测量值 $R(\tau_c;\mu,\mu_0,\phi)$ 的对应关系。

由式(5)可以看出，对于非水汽吸收波段，反射函数可由 (θ_0,θ,ϕ)3 个角度，M 个光学厚度 τ_c 和 K 个地面反射率 A_g 来描述。由式(6)可以看出，对于水汽吸收波段，反射函数可由 (θ_0,θ,ϕ)3 个角度，M 个光学厚度 τ_c，N 个有效粒子半径 r_e 和 K 个地面反射率 A_g 来描述。因辐射的计算量较大，为实现静止卫星资料实时反演云的光学厚度和粒子有效半径，需先期计算建立不同散射几何、不同云光学厚度、不同云粒子有效半径和不同地表反照率条件下，非水汽吸收波段和水汽吸收波段的计算值数据库。在这里，取 FY-2C 静止气象卫星上的可见光通道(0.65μm)为非水汽吸收波段，红外 4 通道(3.7μm)为水汽吸收波段。形成了一个非常大的查算表，在反演过程中，根据实际情况和双通道的辐射值内插得到云的光学厚度和粒子有效半径[7]。

2.2.2.3 云液水路径的确定

液水路径 L_{wp} 由云光学厚度和有效粒子半径的信息计算得到。

云的光学特性同云的微物理特征是紧密相连的，云的消光系数 β_e 可表示为

$$\beta_e = \int_0^\infty \pi r^2 n(r) Q_e \mathrm{d}r \tag{8}$$

式中，$n(r)$ 为云滴谱分布，r 为云粒子半径，Q_e 为云粒子的消光效率因子，对于水云云滴可作为球形粒子处理，单个粒子的散射和吸收问题由 Mie 散射理论给出了完整的解。在大滴近似下，$Q_e(r)\to 2$，消光系数 β_e 可近似表示为

$$\beta_e \approx 2\int_0^\infty \pi r^2 n(r)\mathrm{d}r = \frac{3}{2}\frac{W}{\rho_w r_e} \tag{9}$$

式中，ρ_w 为云水密度，r_e 为有效半径，W 为单位体积内云水含量。

再由云的光学厚度 τ_c 与消光系数 β_e 的关系：

$$\tau = \int_{Z_{\mathrm{bot}}}^{Z_{\mathrm{top}}} \beta_e \mathrm{d}z = \overline{\beta_e} Z \tag{10}$$

式中，Z_{bot} 为云底高，Z_{top} 为云顶高，Z 为云厚，$\overline{\beta_e}$ 为云层垂直方向平均消光系数。

由已经获得的云光学厚度和有效粒子半径计算得到液水路径，具体如下：

$$L_{WP} = \frac{2\tau_c \rho_w r_e}{3} \tag{11}$$

2.2.3 微观云参数的反演计算流程

利用 SBDART 模式计算了不同散射几何参数、不同光学厚度、不同云粒子有效半径、不同地表反照率、不同大气模式及云层条件下的双通道反射函数，并分析了双通道的反射函数对于各个因子的敏感性。发现：双通道反射函数对大气模式、云层状况等参数不敏感，而对散射几何参数和地表类型比较敏感，最重要的是：可见光通道的反射函数对云光学厚度很敏感，近红外通道的反射函数对云粒子有效半径很敏感，与前面公式分析的结果一致。证实可以假定近似的大气模式及云层状况，着力在地表类型和散射几何参数确定的条件下，利用双通道的反射函数反演云光学厚度和云粒子有效半径。

因此,微观云参数的反演计算流程设计中,如图 2,首先利用经纬度和时次信息计算散射几何条件,利用已获取的地表反照率,选择对应的查算表,输入可见光、红外和近红外通道资料,反演得到云光学厚度和云粒子有效半径,由两者计算出云液水路径。

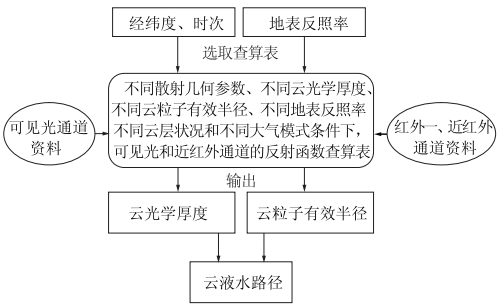


图 2　FY2C/D 微观云物理特征参数反演流程

3　云参数反演产品的初步检验

云物理特征参数无论在天气、气候还是云降水物理领域都有重要的应用价值,但反演得到的参数是否合理是人们十分关心的。然而,由于实际中很难得到实测的物理意义一致的观测数据,这就使得反演物理参数产品的检验十分困难。以下将就主要云参量与 Cloudsat 云卫星观测的合理性及同 MODIS(MYD06/MOD06)同类反演产品的对比来初步分析验证反演算法的有效性和产品的可用性。

3.1　云参数反演产品与 Cloudsat 云卫星观测的对比分析

Cloudsat 卫星是第一颗可以对云层特征进行全球观测的卫星,装载了毫米波段云雷达,可以直接测量从薄云到浓厚云的垂直剖面特征。2008 年 1 月我国南方大部分地区遭遇了长时间的低温雨雪冰冻天气,选取 28 日 14 时 cloudsat 正好横穿降水云系(23.9～33.6°N,111～113.5°E)作为个例进行分析,利用该卫星的云参数产品对反演的 FY-2C/D 云参数产品进行对比验证。

3.1.1　反演云顶高度同云卫星实测云顶的对比分析

为方便进行比较,将云卫星观测的云反射率剖面产品同一时次的云顶高度产品叠加,见图 3(a,见彩页)。并将沿 cloudsat 轨道的云垂直剖面按照云的结构特点划分为 4 个区域,A:稀疏的薄云云区;B:密实深厚的云区,无夹层,雷达反射率高,云顶较高;C:两层云区,雷达反射率中等,上层云顶很高;D:较低均匀的层状云区。可以看出,四类云区雷达的回波顶高与 FY-2C 卫星反演的云顶高度都十分吻合。从左至右,A 区云顶高度在 2～4km,发展旺盛的 B 区云顶高度在 7～8km,再往右的 C 区上层云顶高度上升至 10km,最后的 D 区云顶高度下降至 3～5km。可见反演的云顶高度参量无论是高度值还是变化趋势,同云卫星实测云顶都具有非常好的一致性,卫星探空联合反演得到的云顶高度具有较高的可信度。

3.1.2　反演云粒子有效半径产品同云卫星实测云剖面的对比分析

图 3(b,见彩页)为云卫星雷达反射率剖面叠加 FY-2C 反演的云粒子有效半径,由于目前反演方法主要适用于较厚的云系,因此暂不讨论 A 区结果的可用性。由已得到的云顶高度产品可以看出,B、C 两云区云顶发展旺盛,所以将其云顶作为冰粒子进行反演,可以看出,C 区的云粒子半径较大,大于 B 区,这可能是因为 C 区的云顶高度整体高于 B 区,云顶主要是大的冰晶和雪花,使有效粒子半径显著增大,而 B 区的云顶主要是小的冰晶。D 区云顶发展不高,考虑作为液态粒子进行反演,反演结果略大于 B 区,小于 C 区,主要由中小液滴组成。

3.1.3　反演云光学厚度产品同云卫星实测云剖面的对比分析

图3(c,见彩页)为云卫星雷达反射率剖面叠加FY-2C反演的云光学厚度,可以看出,B区雷达反射率高且无夹层,云体密实,因此反演的云光学厚度很大,C区虽云顶发展很高,但存在夹层,云的整体密实程度不如B区,反演的云光学厚度迅速减小要小于B区,而D区云层较薄,云光学厚度很小。需要指出的是,虽然A区云光学厚度也较大,但由于A区云系不密实,上层稀疏的冰云对反演的干扰,及用于反演云光学厚度的可见光通道可能反映的不是云顶的反射率,而是地表的反射等,使得对这类云的反演结果有待改进。

从这一个例分析可以看到,FY-2C卫星反演得到的云顶高度同云卫星测得的云顶顶高十分吻合,这使得云顶温度和过冷层厚度产品也比较可信,云粒子有效半径和云光学厚度等微观参数变化所反应的规律也非常合理。

3.2 反演产品与MODIS同类产品的对比分析

2007年8月16日10:30,MODIS正好经过台风SEPET云系上空,MOD06包含有相应的云参数产品,选取这一过程作为个例,对比MODIS与FY-2C卫星云参数产品对台风云系的反演结果,宏观参数取云顶黑体亮温,微观参数取云光学厚度、云粒子有效半径。

3.2.1 云顶黑体亮温的比较

由云顶黑体亮温产品对比来看,如图4(a,见彩页)MODIS与图4(b,见彩页)FY-2C对台风SEPET落区的确定和极值的反映都十分一致,台风眼、云墙及外围螺旋云带十分明显,MODIS的高分辨率体现在对云系内部丝缕状细致结构的反映。

3.2.2 云光学厚度的比较

由图5(见彩页)可以看出,FY-2C反演的云系结构与MODIS十分一致,具有较高的可信性,但光学厚度整体偏小,随光学厚度的增加,偏小的程度在加大。对比FY-2C/D与MODIS所使用的查算表,两者基本一致,因此初步分析,原因可能是极轨卫星和静止卫星在可见光通道上不同的波段设置所造成,可见光通道数据本身的差异造成了云光学厚度反演结果的整体性差异。

3.2.3 云粒子有效半径的比较

FY-2C反演的台风云粒子有效半径产品与MODIS基本一致,如图6(见彩页),以蓝色为主,由于台风云系发展旺盛,云顶为粒子有效半径在10~30μm之间的冰晶所组成。

4 结论和讨论

简单介绍了基于FY-2C/D静止卫星观测、融合探空和地面观测等综合探测资料,以静止卫星反演技术研究为核心,研发建立的云宏微观物理特性参数系列产品的反演技术方法。其中包括重复调用辐射传输模式的迭代法,得到云顶高度、云顶温度等云参数;引入实时探空资料得到的改进的反演结果及进一步获得的云过冷层厚度等参数;引入地面观测资料得到云底高度及进一步获得的云暖层厚度、云体厚度等参数;利用FY-2C/D静止卫星可见光、近红外和红外一通道三个通道联合反演得到的云光学厚度、云粒子有效半径和云液水路径等云微观物理参数的方法等。并对各宏微观物理参量产品的物理意义和数据格式等相关情况进行了介绍,为更好的利用这些产品提供了帮助。

利用Cloudsat云卫星等实测资料和MODIS同类产品的对比分析检验,发现云顶高度与云卫星实测到的云顶高度非常符合,这使得云顶温度及过冷层厚度产品也比较可信,反演的云光学厚度、云粒子有效半径等物理参量与云卫星观测到的云结构特征相吻

合;云光学厚度、有效粒子半径产品等与MODIS同类产品也有一定的一致性,说明产品具有较高的可信度。一些主要的云物理特性产品初步应用在冰冻天气云降水微物理结构、台风云系微物理结构特征及人工影响天气播云条件识别分析等方面,得到了一些合理的有意义的结果,说明初步得到的云系物理特性参数产品物理意义合理,在多领域具有很好的应用前景。

随着我国卫星、雷达、辐射计等遥感观测和高空、地面等观测的不断发展,基于这些综合观测技术和资料研发建立的云系宏微观物理特性系列产品将不断丰富和完善,这些高时空密度(15～60 分钟,1～5km)的大范围云系物理特征参数,必将在云降水特征的监测分析和短时临近精细天气预报及人工影响天气云条件分析中发挥作用。当前随着反演技术的不断完善,云特征参数反演产品将不断优化,新产品将不断发展,其各类云特征参量产品的检验和在不同领域的应用研究,还需不断的深入,尚有大量深入的工作需要联合各方面力量开展。

参考文献

[1] Daniel Rosenfeld, Garik Gutman. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data [J]. Atmos. Res., 1994, 34: 259-283.

[2] 刘健,许健民,方宗义. 利用 NOAA 卫星 AVHRR 资料分析云的性质[J]. 应用气象学报,1998,9(4): 449-455.

[3] 刘健,许健民,方宗义. 利用 NOAA 卫星的 AVHRR 资料试分析云和雾顶部粒子的尺度特征[J]. 应用气象学报,1999,10(1): 28-33.

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

[5] 李娟,毛节泰,姚展予,等. 利用 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: 47-55.

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

[7] 陈英英,周毓荃,毛节泰,等. 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(4): 29-34.

[8] 何小东,周毓荃,胡志晋. 利用地面资料计算云底高度的一种新方法[C]. 第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集,2008,731-734.

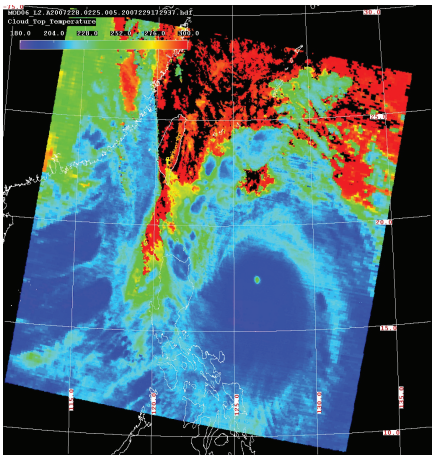


图 4(a) MODIS的云顶黑体亮温

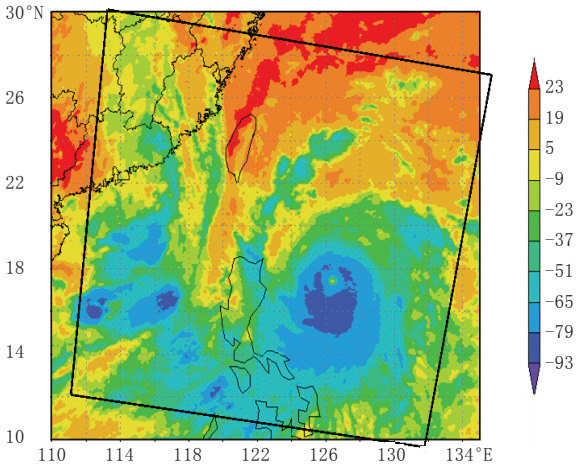


图 4(b) FY-2C的云顶黑体亮温

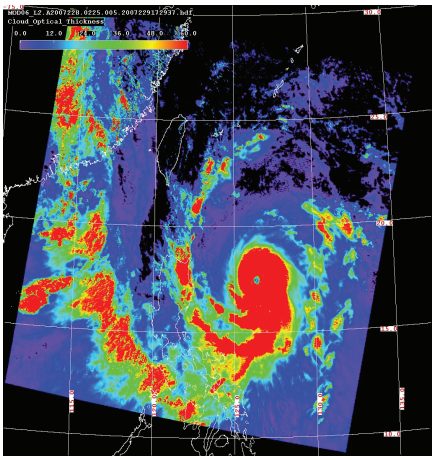


图 5(a) MODIS反演的云光学厚度

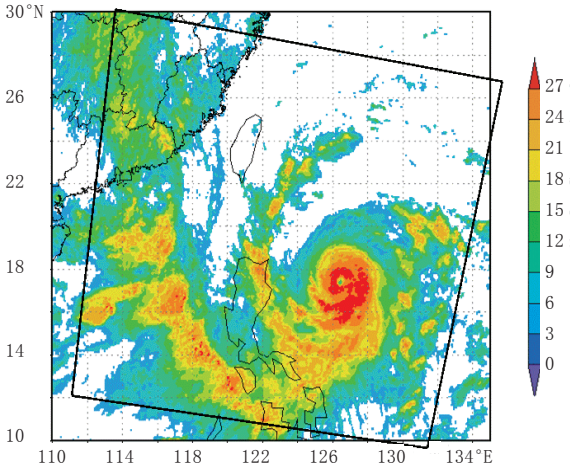


图 5(b) FY-2C反演的云光学厚度

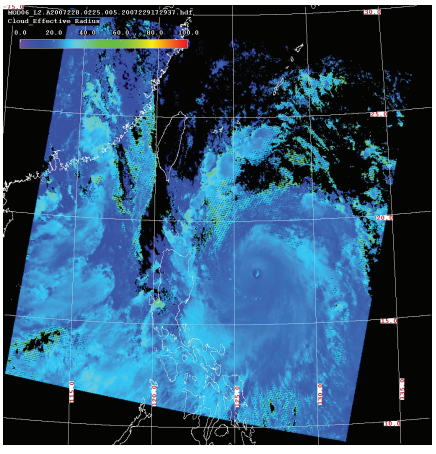


图 6(a) MODIS反演的云粒子有效半径

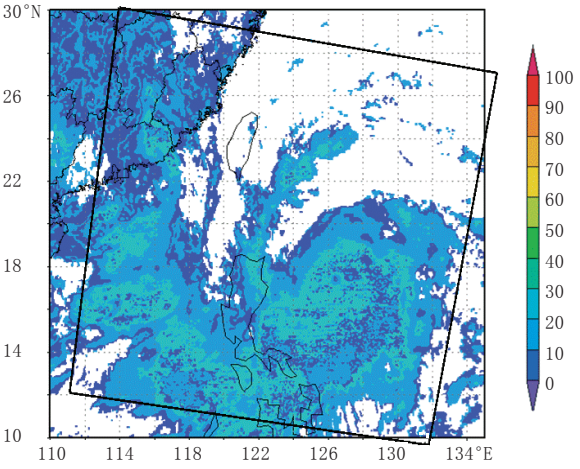


图 6(b) FY-2C反演的云粒子有效半径

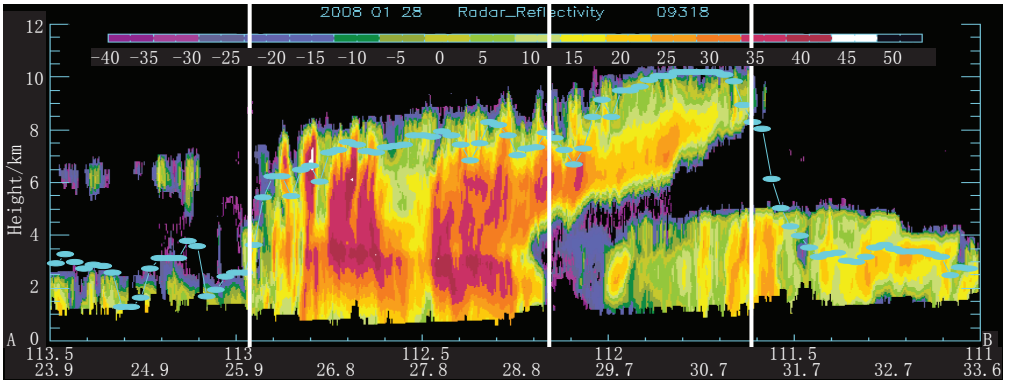


图 3(a)　CloudSat云卫星观测的云雷达反射率剖面叠加同一时次FY-2C/D的云顶高度反演产品
横轴为云卫星轨迹，从左至右为实际由南向北，23.9°N,113.5°E～33.6°N,111°E,依次经过
ABCD云区，纵轴为高度，阴影为云卫星雷达反射率，曲线为FY-2C反演的云顶高度

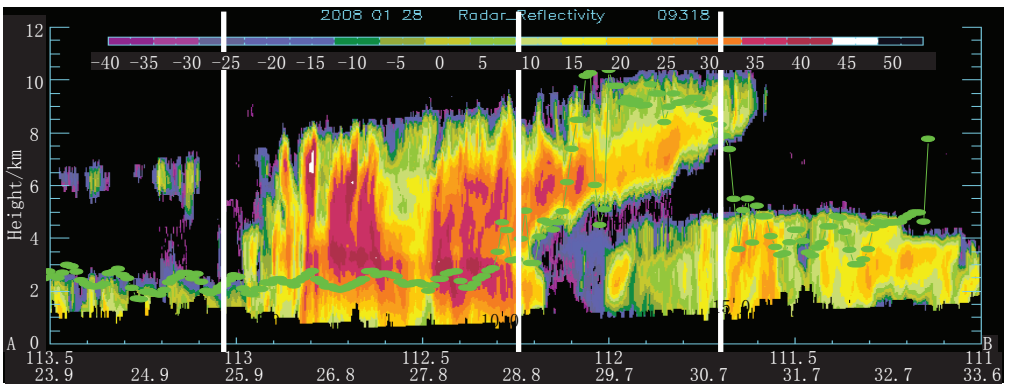


图 3(b)　云卫星雷达反射率剖面叠加同一时次的云粒子有效半径产品
横轴为云卫星轨迹，从左至右为实际由南向北，23.9°N,113.5°E～33.6°N,111°E,依次经过
ABCD云区，纵轴为高度，阴影为云卫星雷达反射率，曲线为FY-2C反演的云粒子半径

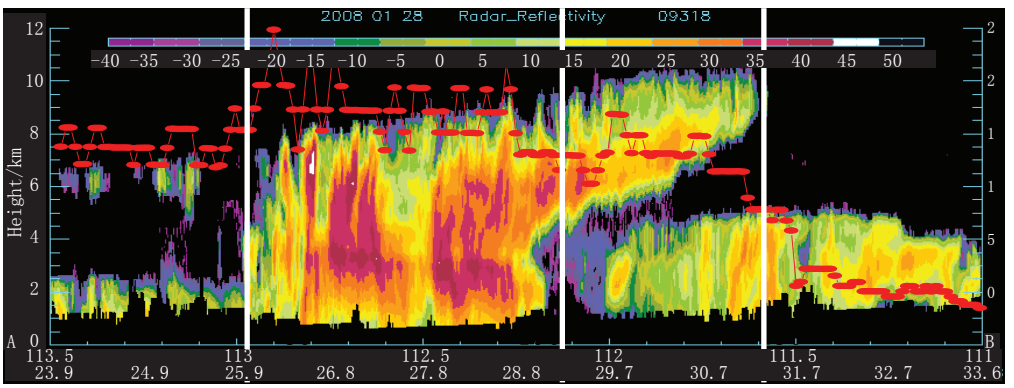


图 3(c)　云卫星雷达反射率剖面叠加同一时次的云光学厚度产品
横轴为云卫星轨迹，从左至右为实际由南向北，23.9°N,113.5°E～33.6°N,111°E,依次经过
ABCD云区，纵轴为高度，阴影为云卫星雷达反射率，曲线为FY-2C反演的云顶高度