

云探测卫星 CloudSat

马占山¹ 刘奇俊¹ 秦琰琰² 湛 芸¹

(1. 国家气象中心,北京 100081; 2. 中国气象科学研究院)

提 要: 介绍了一种新型的云探测卫星 CloudSat。首先概述了 CloudSat 卫星所携带的探测仪器及“A-列车”星座,着重介绍该卫星的主要产品和获取方式,并给出两种天气形势个例的卫星监测,最后探讨了 CloudSat 卫星产品的可能应用情况。

关键词: 云探测卫星 卫星监测 云垂直结构

Introductions to a New Type Cloud Detecting Satellite—CloudSat

Ma Zhanshan¹ Liu Qijun¹ Qin Yanyan² Chen Yun¹

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences)

Abstract: The CloudSat and CALIPSO satellites were launched into space from Vandenberg Air Force Base in California at approximately 6:02 a. m. EDT on April 28, 2006, beginning a mission to study clouds from orbit. In this paper, close attentions are paid to a new type cloud detecting satellite—CloudSat. The preceding sections give a general overview of the detecting instruments embarked on CloudSat and the “A-Train” constellation. The main products of CloudSat and the ways to get them are especially described, and then two samples of cloud detection by CloudSat for different kinds weather of synoptic situations are displayed. At last, the applications of CloudSat products to some aspects of weather or climate in future are discussed.

Key Words: cloud detecting satellite CloudSat satellite monitoring cloud vertical structure

引 言

云对地球能量平衡、气候变化以及天气演变具有重要的影响。云通过影响太阳短波辐射和地球长波辐射,来控制地球能量的收支。云在数量或分布上的很小变化,都能改

变气候,而且这种变化程度要比温室气体、人为气溶胶或其他因素对气候的影响大得多。因此在天气系统和气候变化的研究中,必须了解和考虑云的有关参数。云中各种水凝物三维结构的定量监测,在云-辐射相互作用、人工影响天气、气候变化以及空基微波遥感的大气订正等问题的研究中无疑具有重要意义。

资助项目: 国家自然科学基金(40675059)。

收稿日期: 2007年8月14日; 修定稿日期: 2008年6月27日

目前人们已采用飞机探测、地基及空基遥感等先进手段对云进行观测^[1-3],这些观测对理解和把握云的规律性提供重要参考。但现有的观测手段仅能提供云顶或云底的信息,无法提供垂直方向上云的三维结构,这使得很难得到了解云整体变化所需要的细节。2006 年美国发射的 CloudSat 卫星搭载着首部云探测雷达,它实现了对全球云三维结构的探测。WMO 秘书长雅罗指出:对于气象和气候学领域来讲,CloudSat 卫星的升空具有里程碑意义^[4]。同时科学家也预计,CloudSat 卫星的发射将改进人们监测大气和气候变化的能力。国外已有学者利用 CloudSat 卫星进行科学研究,例如 John M. Haynes 等^[5]利用该卫星数据研究得到,CloudSat 卫星探测到的 18% 的云层会产生降水,而且发现在监测的所有区域中,降水云层比非降水云层与空气对流单体更相关。目前,国内尚未发现采用 CloudSat 卫星数据进行相关研究工作,系统介绍该卫星的文献也不多见。

文中从卫星简介、搭载探测仪器和“A-列车”星座、主要卫星产品、监测个例以及卫星产品的可能应用等方面较系统地介绍了 CloudSat 卫星,希冀对利用该卫星及观测数据产品进行研究的学者提供有意义的参考。

1 CloudSat 卫星简介

2006 年 4 月 18 日,美国 NASA 的 CALIPSO 卫星(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Satellite Observation,直译“卡里普索”,全称为“云-气溶胶激光雷达和红外探测者卫星观测”)和 CloudSat 卫星在加利福尼亚 Vandenberg 空军基地发射成功。CALIPSO 卫星是美国宇航局和法国宇航局合作研发的,它主要提供气溶胶垂直分布信息,考察气溶胶与云之间的关系。CloudSat

卫星是美国宇航局“地球系统科学探路者”计划中的一项重要任务,其主要目的是提供云的垂直结构的观测数据。

CloudSat 卫星的主要科学目标是:1)定量评估天气和气候预报模式中云的作用,进而改进天气和气候预报的质量。CloudSat 卫星提供全球范围内云系的垂直结构探测,将有助于认识云是如何影响当地或大尺度大气以及云对辐射环境的影响机制;2)定量评估云系垂直剖面中的液态水和冰水含量与云辐射特征间的关系。CloudSat 卫星提供云液水和冰水含量的垂直剖面,还提供关于体积云微物理特征以及与其相应的光学特征的信息;3)定量评估现有卫星资料反演的云特征,促进发展遥感观测云的新方法;4)增强对气溶胶与云相互作用的认知水平。

CloudSat 卫星的成功发射首次提供云特征的全球观测,这些云特征对理解云对天气和气候的影响非常重要。CloudSat 卫星是空基遥感技术观测云的重大进步,它给出云的垂直结构(从云顶到云底)、定量估计产生降水云的百分比、定量估算云中液水和冰水的含量、估算大气凝结产生降水的效率,以及以观测为基础来评估云对大气热量的垂直分布的贡献程度。

2 CloudSat 搭载的仪器及“A-列车”星座介绍

2.1 搭载仪器和简要特征

CloudSat 卫星搭载的遥感探测器是云剖面雷达 CPR(Cloud Profile Radar),该雷达为 94-GHz 的毫米波雷达,它的灵敏度是标准天气雷达的 1000 倍,云剖面雷达向地球发射能量并按距离函数计算由云返回的能量。CPR 是由美国宇航局喷气推进实验室和加拿大航天局联合开发研制的,该雷达继承了目前应用于业务运行中的地基和空基雷达的基本原理,雷达许多参数的设置与空基

雷达中设定的参数基本一致,具体参数如表 1 所示。CloudSat 雷达不像地基厘米波雷达那样仅探测雨滴大小的粒子,它能探测到全球范围内的云廓线及其时空变化、天气过程的云系及降水的内部结构、云系中液水和冰水的含量以及云粒子到降水粒子的转换过程。

表 1 CloudSat 卫星搭载的云剖面雷达的主要参数

| 参数 | 参数设置 |
|---------|-----------|
| 正常频率 | 94GHz |
| 脉冲宽度 | 3.3usec |
| 脉冲重复频率 | 4300Hz |
| 最小可探测强度 | -26dBz |
| 数据窗 | 0~25km |
| 天线长度 | 1.95m |
| 积分时间 | 0.3sec |
| 垂直分辨率 | 500m |
| 水平分辨率 | 1.4×2.5km |
| 数据率 | 15kbps |

2.2 卫星运行轨道及“A-列车”星座^[6]

CloudSat 卫星的轨道高度为 705.438km,该轨道是太阳同步的,轨道面和平均太阳子午线间保持固定的角度,倾角为 98.2°。CloudSat 卫星的质量为 999kg,功率为 700W,设计寿命为 22 个月。

CloudSat 卫星与同时发射的 CALIPSO 卫星一起加入到轨道上已存在的三个卫星中;NASA 的 EOS-Aqua、EOS-Aura 卫星以及法国的 PARASOL 卫星一起组成称为“A-列车”的卫星星座。“A-列车”是由 Aqua 星引领,紧接着就是 CloudSat 和 CALIPSO 星,其后是 PARASOL 卫星,最后是 Aura 星。所有 5 颗星在下午 1:30 通过赤道,该星座的卫星在轨道上的分布如(图 1,见彩页)所示。星座每 15 分钟进行一次位置协调,编队飞行使 CloudSat 卫星按照非常严格的方式在轨道中飞行,其沿着 Aqua 卫星轨道行

驶,平均滞后 Aqua 卫星 60 秒。CloudSat 卫星约在 Aqua 星后 460.286km,而其距离更接近于 CALIPSO 卫星,相距 93.8km,二者的探测时间大约相差 12.5 秒。“A-列车”星座围绕地球旋转,大约 8 秒内 5 颗卫星可以飞过同一监测地点。由于这些卫星之间相互距离非常近,它们会紧凑地通过探测地,几乎可以忽略它们的时间差,这将极大地方便用户对这些卫星监测数据的结合应用。

“A-列车”星座中的每颗卫星都具有同一观测目标,它们之间的观测要素可以互相补充,这将提高对地球气候的理解。“Aqua”卫星是星座中的领头卫星,卫星搭载的有效载荷是大气红外探测器、先进微波探测器、微波湿度探测器、先进微波扫描辐射计、中分辨率成像光谱仪。“Aqua”卫星观测地球大气系统中的水,包括海洋上的蒸发、大气中的水汽、云、降水、土壤湿度、海冰、陆冰、雪盖以及冰等;另外还测量辐射能量通量、气溶胶、陆地植被覆盖、浮游植物、及海洋、陆地和水体的温度等。“CALIPSO”卫星搭载了一个主动激光雷达和被动红外辐射计,主要监测全球云和气溶胶的垂直结构和特征。“PASA-SOL”卫星滞后“CALIPSO”卫星 1 分钟,卫星的任务是描述地球大气中云和气溶胶的特征,区分自然气溶胶和人为气溶胶。“Aura”卫星滞后“Aqua”卫星约 15 分钟,星上搭载高分辨率动力探测仪器、微波探测器、臭氧监测仪、对流层辐射分光计,其任务是研究大气化学成分,重点观测大气污染和温室气体的水平、垂直分布及变化。

3 CloudSat 主要产品及获取方式

3.1 数据处理流程

CloudSat 卫星产品是在数据处理中心

DPC(Data Processing Center)进行加工和产品制作的,该数据处理中心隶属科罗拉多州立大学的大气研究合作研究所 CIRA(Cooperative Institute for Research in the Atmosphere)。在轨道飞行过程中,CloudSat 卫星将探测到的原始数据传输到美国空军卫星控制网的全球地面接收站。地面接收站将接收的数据传送到美国新墨西哥州的阿尔伯克基,在此将对原始探测数据进行质量控制。经质量控制检测后,数据通过 Internet 传送到科罗拉多的 CloudSat 卫星数据处理中心,然后经数据处理系统加工成各种 CloudSat 监测产品。一般来讲,6 周后经 DPC 制作的产品会对用户释放。

3.2 CloudSat 卫星产品及反演原理

CloudSat 卫星搭载的云剖面雷达每 0.16 秒对大气发射一次探测脉冲,卫星在轨道上向前飞行 1.1km 后接收大气返回脉冲,这样就对大气完成一次垂直探测。云剖面雷达在垂直方向共探测有 125 层,每层分辨率为 240m,共对 30km 厚度的大气层进行探测。卫星绕轨道 1 周约需 99 分钟,每条轨道上可以产生 37088 个云剖面,每天共有 14 条轨道。CloudSat 卫星一年绕地球进行 5307 次探测,共产生 1.62 亿个云垂直剖面产品。

CloudSat 卫星数据产品是对每个垂直剖面的探测数据加工而成的。目前 DPC 在线提供 7 种标准数据产品(1B-CPR、2B-TAU、2B-FLXHR、2B-GEOPROF、2B-GEOPROF-LIDAR、2B-CLDCLASS 和 2B-CWC-RO)和 2 种辅助数据产品(MODIS-AUX、ECMWF-AUX),这些产品都以 HDF 格式存放。

3.2.1 1B-CPR 产品

在标准数据产品中,1B-CPR 产品主要提供 CloudSat 卫星 CPR 接收到的垂直方向上的雷达回波强度信息。CRP 原始数据是

Level 0,它将测量的后向反射能量看作云体与雷达距离的函数,并根据飞行前和飞行中的校准测量仪器数据将其转化为 Level 1B 数据。CloudSat CPR 接受的信号满足天气雷达方程:

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2 G^2 \Delta \Omega \eta}{(4\pi)^3 r^2} \quad (1)$$

P_r 是天线端口的接收功率; P_t 为天线端口的发射功率; λ 是波长; G 为天线增益; r 是雷达到云或地面的距离; Δ 是脉冲积分; Ω 为双向天线方向图的积分; η 为单位体积的后向散射截面,即雷达反射率;在已知雷达硬件参数下,可通过式(1)求得 η 。从而可通过公式(2)求得反射率因子:

$$z = \frac{\lambda^4 \eta}{\pi^5 |K|^2} 10^{18} \quad (2)$$

z 是雷达等效反射率因子, $|K|^2$ 是介电常数的函数,在 94GHz 时其值约为 0.75,而 z 则可以通过取以 10 为底的对数转化成 dBz。

3.2.2 2B-TAU 产品

2B 产品是在 1B 产品的基础上加工生成的,其中 2B-TAU 产品主要包含观测和反演的垂直方向上云光学厚度信息。该产品主要是利用 CPR 雷达反射率因子、MODIS 大气顶的辐射量和 ECMWF-AUX 的温、压、湿和臭氧数据,通过贝叶斯统计方法和辐射传输模式反演得到^[7]。其中,辐射传输模式假定云在水平和垂直方向上都是均一的,一维的传输方程为:

$$u \frac{dI(\tau; u, \phi)}{d\tau} = -I(\tau; u, \phi) + \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 P(\tau; u, \phi, u', \phi') \times I(\tau; u', \phi') du' d\phi' + J(\tau; u, \phi)$$

此处,垂直坐标是光学厚度 τ , $I(\tau, u, \phi)$ 表示通过 $u = \cos(\phi_0)$ 和 ϕ_0 给定方向上的辐射值。

3.2.3 2B-FLXH 产品

2B-FLXHR 产品利用云中液相和冰相含水量、ECWFM 再分析资料的大气状态变

量值以及地面反射率数据,反演每个雷达剖面上的大气长波辐射通量和加热率。在大气不连续面上计算向上和向下长波和短波通量,并且利用这些通量求得相应的加热率。

反演算法的核心是采用宽频、双向、呈水平面的双倍递增的辐射传输模式^[8]。模式在六个短波通道中采用三角埃丁顿方程,而在十二个长波辐射通道中采用常半球方程。利用大气状态变量和云中冰相和液相含水量,计算谱带分辨率下光学特征的垂直剖面。这些光学特性被用于描述每个平面上的反射(R)、传输(T)和辐射源(ϵ)特征。根据相互作用原理,利用 R 、 T 和 ϵ ,便可以计算得到每个表面的宽频辐射通量。在计算每个平面表面的吸收或发射总通量的基础上,得到每个平面的辐射加热率。最后,宽带通量和加热率一起求得 2B-FLXHR 产品的谱分解和光谱分辨率。

3.2.4 2B-GEOPROF 产品

CloudSat 卫星轨道紧随 EOS PM1 卫星 (Aqua),该卫星携带被动的遥感探测仪来观测地球,这种协同观测大大增加对 CloudSat 卫星的几何剖面的理解。特别地,MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer)将提供在 CloudSat 卫星轨迹上的云的水平分布和存在的信息。MODIS 云量不仅包含了在 1km 相元上云存在的可能性,也包含 MODIS 观测的波谱辐射检验结果,这些波谱辐射数据对确定垂直方向上云的性质提供有用信息。2B-GEOPROF 是在 MODIS 提供的云水平分布、云量等协同观测数据基础上,采用 GEOPRO 方法反演云量、气体衰减和雷达反射率因子的信息。

3.2.5 2B-GEOPROF-LIDAR 产品

2B-GEOPROF-LIDAR 产品通过 CPR 和 CALIPSO 激光雷达观测数据联合反演云的剖面产品,产品包含的内容与 2B-GEOPROF 相同。由于两种观测卫星仪器具有不

同的空间范围,在反演中采用观测权重方法来确定仪器与产品之间的协同问题。以两个卫星观测空间概率为基础,建立如下的权重函数关系:

$$\omega_i = \iint_{x,y} P_r P_l dy dx$$

在此, i 为某雷达观测范围内的激光雷达剖面数, x 和 y 表示雷达附近上形成的空间面积大小,下标 r 和 l 分别代表雷达和激光雷达, P 是某一要素出现的空间概率。在雷达轨迹范围内,激光雷达云量观测的权重函数表示为:

$$C_l = \frac{\sum_{i=1}^{\# \text{ of lidar obs}} \omega_i \delta_i}{\sum_{i=1}^{\# \text{ of lidar obs}} \omega_i}$$

δ_i 表示激光雷达是否检测到水凝物的存在,1 表示有,0 表示没有。 C_l 给出雷达观测的大气柱中有水凝物的云体所占的数目,这也是雷达—激光雷达相结合产品的输出量之一。

3.2.6 2B-CLDCLASS 产品

2B-CLDCLASS 产品是利用垂直和水平云特征、降水是否出现、云体温度、MODIS 辐射数据来确定云分类信息,分类的主要依据是根据云相态、水凝物浓度、形状和滴谱分布四个基本因子。目前已能判断 St、Sc、Cu、Ns、Ac、As、深对流和高云等八种基本云型的反演方法和指标。

云分类的反演方法主要按照下列步骤:1)利用 CPR 雷达云量观测数据来确定云团存在与否;2)若云团被确定,那么云高、温度、最大反射率 Z_e 以及降水是否出现则也将确定。根据云体水平和垂直位置、最大反射率因子、降水水平范围等因子,降水云被分类为 Ns、St、Sc、Ac 和深对流云;非降水云则根据云的高度和温度,将其分为高、中、低云。云分类的反演方法,是对于每种特征参数设置

不同的阈值,这是一种简单且容易操作的方法,但是反演分类的结果却对阈值非常敏感。目前,反演中采用阈值与模糊理论分类方法的结合。

3.2.7 2B-CWC-RO 产品

2B-CWC-RO 产品提供雷达探测剖面上水凝物的含水量、数浓度及有效半径的信息。CWC 算法分别反演冰相云和液相云的微物理特征,反演假定雷达剖面分别是由液水或冰水组成的,而不是二者的混合物,冰相和液相的区分方法是通过 ECMWF 模式提供等温度来判断。

2B-CWC-RO 产品反演过程如下:首先依据 2B-GEOPROF 产品的云量信息确定有云存在的探测剖面;利用 2B-CLDCLASS 产

品判定探测剖面上云的类型(液相或冰相);基于气候的和温度的以及其他标准,假定每块云体液相或冰相粒子的滴谱分布;利用假定的先验值和 2B-GEOPROF 的雷达观测,反演每块云体的液相和冰相滴谱参数。

另外,当温度在 -20°C 以下认为云体全部由冰晶组成;当温度在 0°C 以上时,云体则全部是由液水组成;温度在二者之间时,则将冰晶和液水建立一个与温度有关的线性关系(主要是调整液水和冰晶的数浓度),使得在 -20°C 时为冰水而在 0°C 时为液水。

在液相云和冰相云的反演中,假定滴谱分布都符合对数正态分布,并根据滴谱分布可得到含水量、有效半径等微物理量特征,表 2 给出反演中的计算公式。

表 2 CloudSat 卫星反演液相云和固相云微观量的计算公式

| 项目 | 液相云 | 冰相云 |
|---------|---|---|
| 滴谱分布 | $N(r) = \frac{N_T}{\sqrt{2\pi\sigma_{\log}^2} r} \exp\left[\frac{-\ln^2(r/r_g)}{2\sigma_{\log}^2}\right]$ | $N(r) = \frac{N_T}{\sqrt{2\pi\sigma_{\log}^2} D} \exp\left[\frac{-\ln^2(D/D_g)}{2\sigma_{\log}^2}\right]$ |
| 水含量 | $LWC = \frac{4\pi}{3} N_T \rho_w r_g^3 \exp\left(\frac{9}{2}\sigma_{\log}^2\right)$ | $IWC = \rho_i \frac{\pi}{6} N_T D_g^3 \exp\left(\frac{9}{2}\sigma_{\log}^2\right) 10^{-3}$ |
| 有效半径 | $r_e = r_g \exp\left(\frac{5}{2}\sigma_{\log}^2\right)$ | $r_e = \frac{1}{2} D_g \exp\left(\frac{5}{2}\sigma_{\log}^2\right) 10^3$ |
| 反射率因子 | $Z = 64 N_T r_g^6 \exp(18\sigma_{\log}^2)$ | $Z_{Ray} = N_T D_g^6 \exp(18\sigma_{\log}^2)$ |
| 消光系数 | $\sigma_{ext} = 2\pi N_T r_g^2 \exp(2\sigma_{\log}^2)$ | $\sigma_{ext} = \frac{\pi}{2} N_T D_g^2 \exp(2\sigma_{\log}^2) 10^{-3}$ |
| 可见光光学厚度 | $\tau = \int_{z_{base}}^{z_{top}} \sigma_{ext}(z) dz$ | $\tau = \int_{z_{base}}^{z_{top}} \sigma_{ext}(z) dz$ |
| 水路径 | $LWP = \int_{z_{base}}^{z_{top}} LWC(z) dz$ | $IWP = \int_{z_{base}}^{z_{top}} IWC(z) dz$ |

3.2.8 辅助产品

在辅助产品中,MODIS-AUX 为中间产品,主要包含了辅助的 MODIS 辐射和云量数据,并提供 CloudSat 卫星搭载的云剖面雷达运行轨道的相关信息。ECMWF-AUX 提供 CloudSat 探测路径上的气压、温度、湿度和臭氧等状态变量的信息,该产品是由 ECMWF 的全球数据经插值到观测点上得到的。

CloudSat 数据产品的详细算法和说明可在其数据处理中心网站上链接得到,具体网址为:<http://CloudSat.cira.colostate.edu/data-ICDlist.php>。用户也可以在网站的 Data Products 页面上找到产品所需的输入和输出场的详细说明,并提供每种标准数据产品和辅助产品的数据格式和数据大小的相关信息。

3.3 产品获取及后处理

CloudSat 卫星标准数据产品的存储和分发是通过 CIRA 完成的,它们还提供卫星数据处理中心分类系统,实现数据产品的在线获取,但用户需先进行注册,该系统的网址为:<http://www.CloudSat.cira.colostate.edu/data-dist/orderdata.php>。在进入分类系统后,用户指明所需数据产品的具体要素场,并发送数据获取信息,系统将指定获取卫星数据产品的具体路径,进而获取数据产品。

CloudSat 卫星数据处理中心还提供每 6 小时的卫星轨道数据,文件为 mkz 格式,用户可以通过 google earth 软件快速查看卫星所监测的区域。图 2a(见彩页)给出 2007 年 5 月 25 日 06 时至 12 时 CloudSat 卫星的轨道分布,图 2b(见彩页)为经过中国华北地区的一次具体时间和轨道路径。值得注意的是,由于轨道数据是在原始数据的基础上绘制的,虽然它能提供一种查询卫星轨道的便捷方式,它没有经过任何定标处理,还可能存在一些误差,因此不适宜于业务应用。

另外,DPC 也提供处理 CloudSat-HDF 格式数据的原始解码和库文件,目前主要提供 C、IDL、Fortran、MATLAB 等常用程序环境下的解码和库文件,用户可以从网站上获取。

4 两个 CloudSat 个例

为直观了解 CloudSat 卫星对不同天气系统下云的垂直探测能力,下面简要地给出 CloudSat 卫星对一次热带风暴和一次锋面云系的探测个例。

4.1 热带风暴的个例监测

图 3(见彩页)给出 2007 年 5 月 9 日大西洋海岸附近的一个热带风暴 Andrea 的卫

星监测图像,其中图 3a 为 Aqua 卫星搭载的 MODIS 红外仪器监测的热带风暴云系。由图可见,Andrea 风暴已基本形成,风暴云系中心为晴空少云区,南北两侧的云系发展旺盛,云系深厚;风暴外围云系有较完整的弯曲积云带,但较中心明显浅薄。Andrea 风暴整体已呈现出中尺度螺旋状结构云带。

CloudSat 卫星在 Aqua 卫星观测后约一分钟时间对 Andrea 风暴从东北向西南进行了探测,图 3a 中的红线为卫星沿风暴经过的轨迹,CloudSat 卫星正好经过 Andrea 风暴中心,在卫星运行轨道上 CPR 探测的反射率因子垂直分布如图 3b 所示。由图可见,CloudSat 卫星很好的监测到了该风暴云系的垂直结构,风暴中心几乎无云系发展,出现明显的晴空少云区;风暴两侧对流发展旺盛,为深厚云系,其垂直高度达 13km,宽度上百公里;云壁两侧最大回波出现在 9km 左右高度上,温度约为 -40°C ,这可能与该高度上强烈的云微物理活动有关;而 Andre 风暴外围云系的水平宽度较主体云系明显变窄。

4.2 中国境内的探测个例

CloudSat 云剖面雷达可探测云中冰水含量、液水含量及其数浓度等云微观量的垂直分布,图 4(见彩页)给出 2006 年 11 月 15 日该卫星经过中国境内并对一次锋面云系的探测。图 4a 和 4b 分别为 FY-2C 卫星和 NASA 的 Aqua 卫星对云系的监测,4b 中的粗弧线为云卫星经过中国的轨迹。Aqua 卫星对云系的分布形式与 FY-2C 卫星相一致,云带呈西北—东南向分布,云带主体位于在中国的内蒙古西部、甘肃中南部、陕西和山西南部及河南北部等地。

图 4c 和 4d 分别为 2006 年 11 月 15 日 16 时 52 分 CloudSat 卫星在运行轨道中探测的云中冰晶比含量和冰晶数浓度的垂直分布。由图可见,该锋面云系中冰晶垂直方向

分布在8~15km高度上,其中高含量区域出现在9~12km高度上,冰晶含水量在 $0.2\sim 0.7\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,冰晶数浓度多达到50~250个/升;冰晶含水量和数浓度的最大值位于河南北部和山西南部地区,分别达到 $1.3\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和283个/升,出现最大值的位置与FY-2C监测的深厚云系位置一致;云系边缘冰晶比含水量较小,多在 $0.01\sim 0.1\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 间变化。此外,本次探测的云中液水含水量及其数浓度(图略)垂直分布高度要低于冰晶分布的高度,它们集中分布在7~12km高度上,这种现象符合云中实际水凝物的分布规律。

5 CloudSat 可能应用及效果

CloudSat 卫星首次搭载了能监测云垂直特征的雷达,这将揭开云内部结构的神秘面纱。CloudSat 卫星提供的科学数据产品,将更好地了解真实大气的云结构特征和云过程规律,从而提高对天气系统和云微物理结构的认识程度和对天气的预报能力;对云认识程度的提高,将使数值模式中云微物理过程参数化更加科学、合理;该数据产品可以用来检验其他卫星反演云特征的科学性和准确性;CloudSat 卫星数据与“A-列车”星座中的其他卫星数据的结合研究,将提高人们对云

与气溶胶之间的相互作用、云对地球能量平衡的作用等方面的认知水平。

参考文献

- [1] 汤琦,毛节泰,李成才. 利用 MODIS 资料对中国西部地区的云检测[J]. 高原气象,2006,35(6):990-1000.
- [2] 刘朝顺,吕达仁,杜秉玉. 地基遥感大气水汽总量和云液态水总量的研究[J]. 南京气象学院学报,2006,29(5):606-612.
- [3] 杨文霞,牛生杰,魏俊国,等. 河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究[J]. 高原气象,2005,24(1):84-90.
- [4] 程也. 从太空用雷达探测云:气象与气候研究的里程碑[J]. 气象科技,2006,34(4):497-497.
- [5] John M. Haynes and Graeme L. Stephens. Tropical oceanic cloudiness and the incidence of precipitation: Early results from CloudSat [J]. Geophysical Research Letters. 2007,34:1029-1038.
- [6] Stephens, G. L., Coauthors. The CloudSat mission and the A-train [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2002,83:1771-1790.
- [7] Marks, Rodgers. A retrieval method for atmospheric composition from limb emission measurements [J]. J. Geophys. Res., 1993,98, :14939-19953.
- [8] Stephens, G. L., P. M. Gabriel. Parameterization of atmospheric radiative transfer. Part I: validity of simple models. [J]. J. Atmos. Sci., 2001,48:3391-3409.

马占山等：云探测卫星CloudSat



图1 “A-列车”星座的卫星在飞行轨道上位置分布

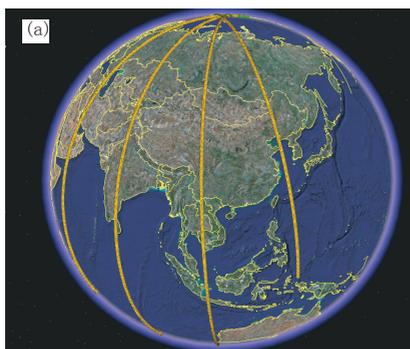


图2 2007年5月25日06-12时CloudSat卫星在中国区域的轨道分布(a)和经过华北地区一次具体时间和轨道路径(b)

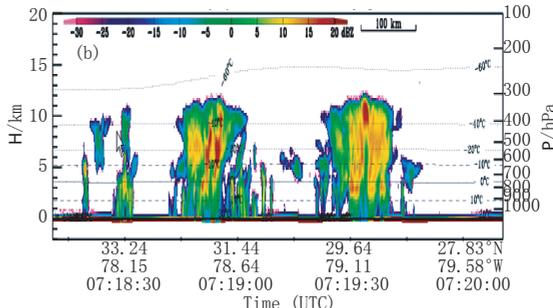
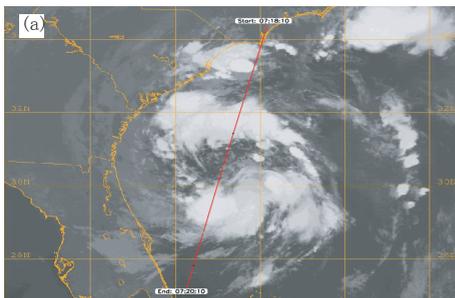


图3 2007年5月9日Andrea热带气旋的Aqua卫星(a)和CloudSat卫星(b)观测 (a)中实线为CloudSat探测风暴的轨迹, (b)中虚线为等温线, 阴影为雷达反射率因子

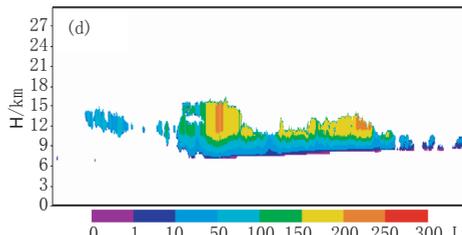
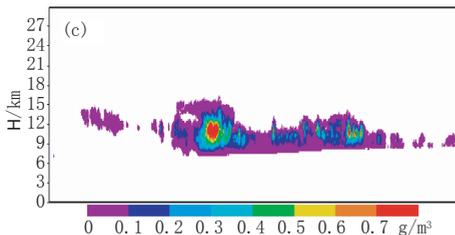
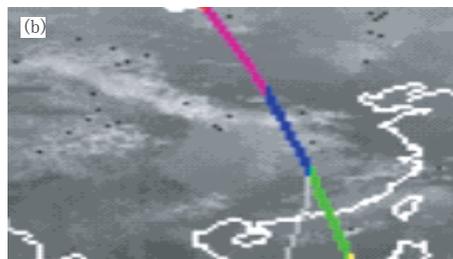


图4 2006年11月15日中国锋面云系的卫星监测 (a)为13时FY-2C卫星监测, (b)蓝色轨道为13时49分到53分Aqua卫星监测, (c)和(d)分别为同时段CloudSat卫星在蓝色轨道上监测的冰晶含量和数浓度的垂直分布