

卢乃锰,方翔,刘健,等,2017. 气象卫星的云观测[J]. 气象,42(3):257-267.

# 气象卫星的云观测<sup>\*</sup>

卢乃锰 方翔 刘健 闵敏 孙瑞静

国家卫星气象中心,北京 100081

**提 要:** 云体现着不同尺度天气系统发生、发展和消亡的过程。云还通过反射太阳辐射和阻止地球发射辐射,维持着全球能量平衡。1960 年气象卫星的出现,揭开了从浩瀚太空,俯视千变万化云系的历史。气象卫星云图的获取,加深了人们对天气、气候变化过程的认识,推进了大气科学的发展。本文围绕气象卫星云遥感主题,首先概述了利用卫星资料开展云检测、云相态识别、云光学厚度与等效粒子半径反演的原理和方法。而后,着重介绍了各类天气尺度和中尺度天气过程的云系特征。最后,文章回顾了国际卫星云气候方面的工作,展望了未来云观测技术的发展前景。

**关键词:** 气象卫星,云观测

**中图分类号:** P412,P414.4

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.03.001

## Understanding Clouds by Meteorological Satellite

LU Naimeng FANG Xiang LIU Jian MIN Min SUN Ruijing

National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** Clouds represent weather. Being a modulator of solar heating and thermal cooling of the Earth, clouds are also called “the shutters of the Earth”. In 1960, the first meteorological satellite was launched, demonstrating the new era of cloud observation. The acquisition of meteorological satellite cloud images deepens the understanding of the weather and climate change and accelerates the development of atmospheric sciences. In this paper, the principles and methods of cloud detection, cloud phase determination and retrieval of cloud optical thickness and effective radius using satellite data are first summarized. Then, the cloud features of synoptic scale and mesoscale weather processes are emphatically introduced. Finally, two international satellite cloud climatology projects, as well as the perspectives of future cloud observation technology, are presented.

**Key words:** meteorological satellite, cloud observation

## 引 言

2017 年世界气象日的主题是“识云观天”(Understanding Clouds)。作为大气圈层中最为重要的水成物,云在天气系统演变、全球水循环以及气候系统变化等方面发挥着极其重要的作用。首先,云是大气水汽凝结的产物,是大气动力和热力过程的表现。云粒子又通过凝结、碰并等过程产生雨雪天气。

与云相关的大气湿过程释放出潜热,改变了大气的层结,进而影响着天气系统的发生、发展和消亡。各种锋面天气系统、台风和暴雨云团、飚线以及外流边界等天气过程首先就是通过云和云系得以体现。云还是全球水循环的重要组成部分,改变着全球空中水资源的分布与循环的速度。

云对气候的影响可以从宏观和微观两个方面来理解。从宏观上看,云的全球分布特征以及云的三维结构特征的变化带来辐射强迫的改变,影响着全

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41201360 和 61531019)以及“电力微气象灾害监测与预警技术研究及预警体系建立”项目共同资助  
2017 年 2 月 14 日收稿; 2017 年 2 月 24 日收修定稿  
第一作者:卢乃锰,从事气象卫星遥感和卫星气象应用研究. Email:lunm@cma.gov.cn

球和区域气候的变化。从微观上讲,云的相态、云粒子形状、介电参数以及谱分布直接影响到云对辐射的发射、吸收和散射。大部分的水云可以在反射太阳辐射的同时,完成对地气系统红外辐射的吸收和再发射,前者减弱地球系统对太阳辐射的吸收,后者抑制地气系统的向外辐射。而对于冰云而言,其辐射强迫作用要复杂许多。随着云的光学厚度、亮度温度以及地表背景辐射的不同,冰云的辐射强迫可以呈现出完全相反的情况。云辐射的复杂性,特别是云与气溶胶相互作用的复杂性,使得其辐射强迫出现很大的不确定性。

1960 年第一颗气象卫星发射之后,气象学家就一直没有停止利用气象卫星进行云的观测和研究(卢乃锰和谷松岩,2016)。气象卫星具有跨越国界,全球覆盖的优势,卫星云图可以反映云的季节变化及其空间分布特征。随着卫星遥感技术的发展和云辐射传输理论的完善,气象卫星云分析工作也从早期的定性分析阶段,发展到现在的定量遥感阶段,并正在与模式同化技术相结合,在天气预报和气候变化研究中发挥着无可替代的作用。本文将在简述卫星对云的观测能力的基础上,重点介绍气象卫星在天气尺度、中尺度天气云特征分析方面的应用,并就国际卫星云气候计划进行介绍。

## 1 气象卫星对云的观测能力

### 1.1 云卫星遥感概况

极轨和静止气象卫星在云的观测方面各具优势。极轨气象卫星在 800 多千米太阳同步轨道上,刈幅宽度超过 2000 km,单颗卫星可以每天两次完成对全球的观测。由于轨道高度相对较低,极轨气象卫星能够实现对云的高空间分辨率和多光谱的观测。静止气象卫星的轨道高度约 36000 km,卫星绕地飞行公转速度与地球自转速度相同,所以卫星相对于地球保持不动,能够实现对地球同一地点的高频次持续观测。极轨和静止气象卫星相互配合,构成了对全球云的综合观测体系。

气象卫星对云的观测分为被动观测和主动探测两大类。被动观测发展较早,主要以可见光和红外观测为主,红外观测又可以细分为近红外、中波红外和远红外。图 1 是人类获取的第一幅气象卫星可见光图像。通常情况下,在气象卫星的可见光云图上,

白亮的云区表现的是云对太阳辐射的反射,而红外云图表现的则主要是云对红外辐射的发射。特别是在长波红外谱段,云对太阳辐射的反射作用已经不复存在,此时卫星云图反映的就完全是地气系统的热辐射。

目前云的主动探测仅限于激光雷达和微波云雷达。基于米氏散射原理的星载激光雷达能够通过接收激光回波信号,实现对云的探测和反演(Platt, 1973)。它可以准确测定云高,探测出光学厚度很小的薄卷云。美国和法国 2006 年联合发射的 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 卫星搭载的云-气溶胶激光雷达取得了很好的云观测数据(Hirakata et al, 2014)。其拥有的 532 nm/1064 nm 双通道以及 532 nm 垂直/水平偏振通道可以有效识别云滴形状,进而准确识别云的相态(Liu et al, 2009)。在光学厚度不大的情况下,激光雷达探测结果常被视为“真值”来检验被动观测的云产品质量(Winker et al, 2009)。但由于激光雷达的穿透能力有限,对于光学厚度较大的云层,需要借助于微波云雷达完成对云内部微物理参数和垂直结构的主动探测。当前应用最广的微波云雷达 CPR 装载在美国发射的 CloudSat 卫星上。它所积累的观测资料在云结构分析与研究方面发挥了重要作用。然而,受到技术水平的制约,目前的云雷达和激光雷达的采样效率都很低,还无法投入气象业务应用。本文内容主要集中在气象卫星对云的被动观测方面。

### 1.2 云检测

卫星从太空遥感地球,云与其他地物目标交织在一起,开展云分析首先就要将云与其他地物区分

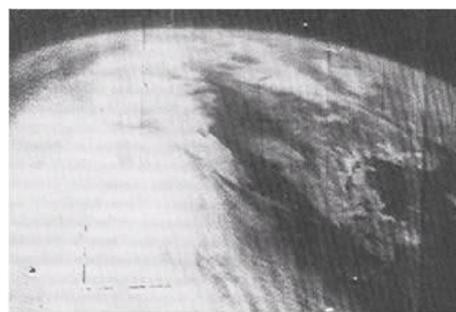


图 1 人类第一颗气象卫星遥感图像  
Fig. 1 The first meteorological satellite remote sensing image in the world

开来。目前在卫星图像上主要根据云的空间特征、时间特征以及通道特征,利用阈值法判定云的存在。大量云检测的技术研究都集中在最优阈值的选取方法上。其中 MODIS 云检测算法借鉴了先前算法的优点,并提出了云检测结果置信度的概念,得到了广泛的认同。尽管国际各类云检测技术千差万别,但从光谱测量的角度看,这些云检测方法的根据都是云的红外发射和可见光反射特性。

不受太阳光影响的红外谱段的卫星云图被广泛用于云检测。正常情况下,对流层大气呈现温度随高度递减的趋势,云的温度低于地表温度,云顶的亮温低于地表亮温,对于高云而言,这种差异尤为显著。这使我们能够很好地在红外图像上识别出云。然而,当云顶高度很低时,特别是在大气温度递减率较小,或是出现逆温的情况下,云顶与下垫面亮温差很小,甚至反相,此时就必须通过可见光图像或其他手段,判断云的存在。

对于绝大部分在红外图像上难以准确识别的云层(如低层云),云的光学厚度较大,在可见光图像上较为白亮,在没有积雪、太阳耀斑等亮背景因素干扰的情况下,比较容易识别。但在亮背景干扰的情况下,则需要通过形态学的办法或通过不同时次图像之间的变化对比,判识云区的存在。

### 1.3 云相态识别

根据云粒子相态可以将云分为冰云、水云和混合相态云。典型的冰云多由非球形粒子组成,主要出现在对流层上部和平流层下部,在全球的覆盖率大约为 30%;水云多由球形水滴组成,主要分布在对流层中下层,其全球覆盖率大约为 40%;在纯净的过冷却大气中,冰云和水云可以伴随着贝吉隆效应同时存在。

在近红外波段(如 1.38, 1.64 和 2.13  $\mu\text{m}$ ),由于冰水之间介电常数存在明显差异,导致冰云的反射率小于水云,因此,近红外波段卫星云图可以有效地识别云相态(Hansen and Pollack, 1970; Curran and Wu, 1982; Pilewskie and Twomey, 1987; King et al, 1992; 刘健和李云, 2011; 陈洪滨和孙海冰, 1999; 汪宏七和赵高祥, 1996; Baum et al, 2000)。此外,8~12  $\mu\text{m}$  的多通道红外云图也可以很好地区分冰云和水云。Ackerman et al(1990), Strabala and Ackerman(1994)和 King et al(1992)的研究表明,冰和水对辐射的吸收在 8~10  $\mu\text{m}$  波段上基本

相同,但在 10~12  $\mu\text{m}$  波段,冰的吸收系数明显大于水,因而在相同的光学厚度和高度条件下,冰云的亮度温度低于水云。因此,在 8~11  $\mu\text{m}$  和 11~12  $\mu\text{m}$  亮度温度差散点图上,冰云斜率大于 1,水云斜率小于 1,而在斜率为 1 附近的云多为混合相态,这便是 EOS/ MODIS 的云相态反演原理。刘健和李云(2011)针对 FY-1C 和 FY-2 数据开发的白天云顶粒子相态识别产品(图 2)与 CloudSat 卫星的云分类产品相比,高层冰云识别一致率达到 97%,低层水云的识别一致率达到 94.98%。

### 1.4 云光学厚度以及有效粒子半径反演

国内外研究表明,气象卫星可以遥感云光学厚度和有效粒子半径。特别是当有可见光云图,且云的光学厚度较大时,下垫面反射影响较小,反演结果精度较高。国外 King et al(1992), Minnis et al(1998), Baum et al(2000)很早就开展了利用卫星遥感资料反演云光学厚度和有效粒子半径的工作。国内赵凤生等(2002)、刘健等(2003a; 2003b)、刘健(2015)、陈英英等(2013)、刘贵华等(2011)、周毓荃等(2008)也利用 NOAA-AVHRR 和风云卫星数据(图 3)研究了多通道的云光学厚度的反演算法,取得了较好的结果。

除可见光通道外,红外通道也可用于反演云顶粒子有效半径。红外通道反演方法的基础是云发射率为云粒子大小和光学厚度的函数。这种方法的主要优点是不受观测时间的限制,特别适合对光学厚度较小的薄云的计算。Szejwach(1982)、Arking and

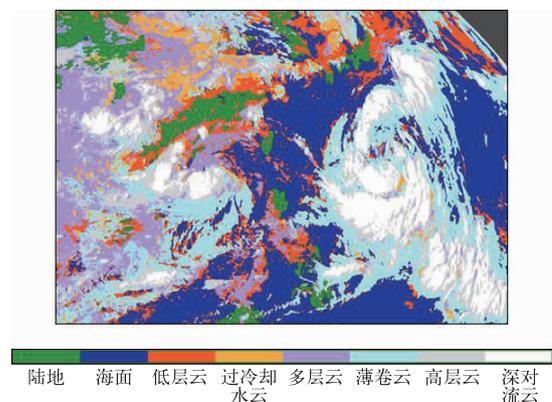


图 2 2009 年 8 月 4 日 00:00 FY-2C 云相态识别图像

Fig. 2 FY-2C cloud phase determination image at 0000 UTC on 4 August 2009

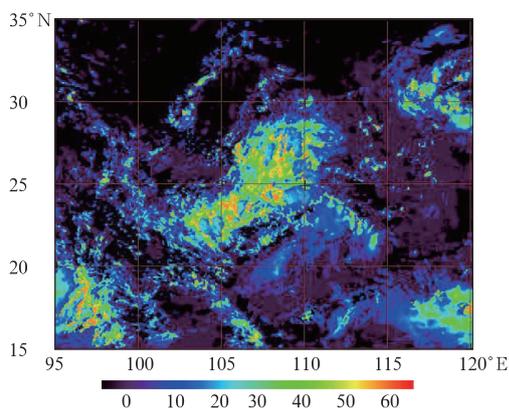


图 3 2013 年 8 月 19 日 0600 UTC  
FY-2E 云光学厚度图像

Fig. 3 FY-2E cloud optical thickness  
at 0600 UTC 19 August 2013

Childs(1985)、Ou et al(1993)提出了卷云云顶温度、光学厚度和平均有效冰粒子半径的反演算法。第一次国际卫星云气候计划区域试验加密观测(FIRE-I IFO)中,就运用了Ou的卷云参数反演算法。

## 2 天气尺度系统云型

天气尺度指的是水平尺度在几百至几千千米、生命期一天至几天的天气系统,包括锋面、涡旋、反气旋、急流等,其所对应的高空云系一般都具有相对稳定的云型特征。

### 2.1 锋面云系

在卫星云图上,锋面云系通常表现为一条狭长的云带,云带常常在高层有卷云,低层有中低云。在实际大气中,不同类型的锋,其云系特征和结构差异很大。冷锋云系通常表现为与涡旋云系相连接的连续完整云带。朝向云系尾部方向(远离涡旋中心方向)云带逐渐变窄,而云带头部(靠近涡旋中心的方向)则呈明显的气旋性弯曲,靠近冷空气一侧云带边界光滑整齐。从结构上看,这部分云带主要由多层云系组成,高层通常由卷状云构成,云体中冰晶含量较高,反照率较大,因此云带色调白亮,有时,云带中还包含有一些对流云团,它们发展程度不同,高度较高的云团在云带上产生暗影,使得云带表面的纹理分布不均匀。云带尾部云顶高度相对较低,主要以中低云为主,在红外云图上色调较暗(图 4)。

暖锋云系在卫星云图上通常也表现为带状云系结构,只是与冷锋云系相比,暖锋云系的长、宽比较小,一般一条活跃的暖锋云系约为 300~500 km 宽,几百千米长。从结构上看,暖锋云系的上面由大片卷云构成,卷云下面为高层云、雨层云和积状云,卫星云图上色调明亮。另外,从形态上看,云带总是向冷空气一侧凸起,在可见光通道图像上(图 5),云区内部反气旋弯曲的卷云纹理清晰可见(陈渭民, 2003)。

静止锋(准静止锋)是指冷暖气团势力相当,锋面位置变化很小的锋。在活跃的静止锋中,高空风大体上平行于锋,因此在云图上云系一般表现为一条宽的云带,云带没有明显的凸出或凹进弯曲,云带的北界相对整齐光滑,而南界则呈羽毛状,可以看到明显的云线。条状云线的走向,可以用来确定锋面南边的副热带高压脊线位置。从云系的结构来看,冬季的静止锋云系主要由高层云、高积云和层云等层状云组成,夏季云系内对流性积状云增多,以积云、浓积云和积雨云比较多见。梅雨静止锋属于活

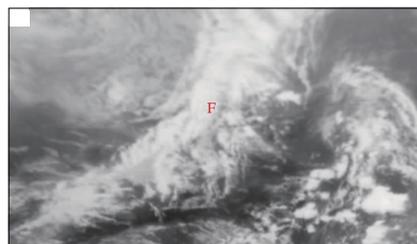


图 4 2008 年 6 月 11 日 0630 UTC FY-2C  
3.7  $\mu\text{m}$  夏季冷锋云系图像

Fig. 4 Cold front cloud system image  
(FY-2C 3.7  $\mu\text{m}$ ) at 0630 UTC  
11 June 2008

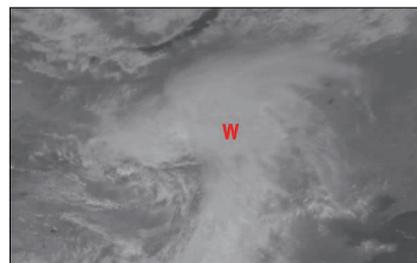


图 5 2008 年 8 月 29 日 0600 UTC FY-2C  
可见光通道(0.55~0.7  $\mu\text{m}$ )暖锋云系图像  
Fig. 5 Warm front cloud system image  
(FY-2C visible channel of 0.55~0.7  $\mu\text{m}$ )  
at 0600 UTC 29 August 2008

跃的静止锋,主要出现在每年6—7月间,它的建立和维持造成我国长江流域地区持续性强降水。梅雨锋云系由多尺度云团组成,云带中的中尺度对流系统使得梅雨锋云系上出现不同强度降水。在卫星云图上,梅雨锋云系表现为一条从华南、长江流域,一直向东延伸到日本列岛,然后向东北方向与太平洋上的极地锋面云系相连的云带。云带有时呈东—西纬向分布,有时呈东北—西南向,可以基本平直,也可以呈波动状,可以是层状云带,或层状云带中镶嵌对流云团,也可以完全由多个对流云团排列成带。图6是一张典型的梅雨锋云系云图,由图可见,云带的东段与北方西北太平洋的锋面气旋云系相连,云带中段基本上呈东—西走向,西段与季风低压相连,在层状云带中密集地排列着若干 $\alpha$ 中尺度对流云团和 $\beta$ 中尺度对流云团(如图中红色箭头所示)。

在卫星云图上,锢囚锋云系主要表现为一条宽为几百千米,从暖区顶端出发按螺旋形状旋向气旋中心的云带。在水汽图像上,可以清楚地观察到一条暗带从后部卷入气旋中心,这是后部干冷空气侵入的表现。受其影响,云带后界整齐光滑,而前界不是很整齐。在我国,常见的锢囚锋主要是三种,一种是地形锢囚,即主要是由锋面受山脉阻挡形成;第二种是冷锋追上暖锋形成的;第三种则是两条冷锋迎面相遇造成的锢囚(许培贞,1979)。图7给出的是一张我国北方出现的一次冷锋追上暖锋形成的锢囚锋实例。图中A—B为锢囚云带,F为冷锋云带,W表示暖锋云带。

## 2.2 涡旋云系

在卫星云图上,另一种典型的大尺度云型就是涡旋云系。从结构上看,涡旋云系表现为一条或数条云带或云线以螺旋形式围绕一个共同中心旋转,或者一片近乎圆形的密闭云区,涡旋中心位于云区的几何中心。云系表现为涡旋结构的典型大尺度天气系统就是热带气旋和温带气旋。热带气旋具有比较对称的云型,没有向南或西南方向伸出的锋面云带;温带气旋的云型则极不对称,均与不同类型的锋面云系相连。

图8给出一个典型的温带气旋云系的可见光、红外和水汽图像。从红外和可见光图像上可以清楚地看到,涡旋的主体云区色调很白,向北一侧的云区

向冷区凸起,涡旋边缘在高空有明显的辐散,向外辐散的气流形成云区外围边界辐散卷云的丝缕状结构,且在涡旋云系上还可以看到一些发展旺盛的对流云团(图8a)。结合水汽图像可以看到一条暗带卷入气旋中心,这是干冷空气侵入的表征(图8c)。

热带气旋是热带辐合带内出现的一类涡旋云系,它们具有暖心结构,通常表现为云线和云团围绕一个中心旋转的特征。发展旺盛的热带气旋云系由内向外的水平结构常常由三部分组成,即暗黑色的无云眼区,围绕眼区的连续密蔽的云区以及绕中心的外围螺旋云带。图9是一个发展中的热带气旋云系,从图上可以看到,热带气旋云系整体呈对称结构。在靠近赤道一侧对流发展旺盛,这里的云顶高度较高,在可见光云图上可以看到很多小的上冲云顶。另外,云区四周还可以看到由高空强辐散气流造成的明显向外辐散的卷云羽。

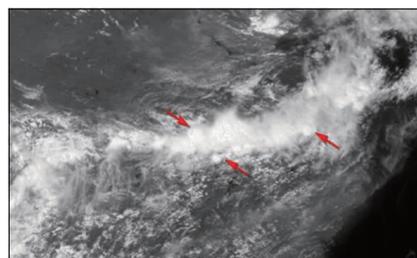


图6 2008年7月2日0530 UTC FY-2C可见光通道(0.55~0.7  $\mu\text{m}$ )梅雨锋云系图像  
Fig. 6 Meiyu front cloud system image (FY-2C visible channel of 0.55—0.7  $\mu\text{m}$ ) at 0530 UTC 2 July 2008

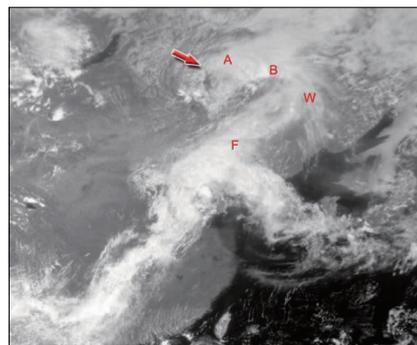


图7 2008年7月5日0530 UTC FY-2C可见光通道(0.55~0.7  $\mu\text{m}$ )锢囚锋云系图像  
Fig. 7 Occluded front cloud system image (FY-2C visible channel of 0.55—0.7  $\mu\text{m}$ ) at 0530 UTC 5 July 2008

### 2.3 地面反气旋云系

由于冷空气受到下垫面加热,地面反气旋在冬季海洋地区的云图上常常表现为细胞状云特征。开口细胞云主要由积云、浓积云组成,常常表现为指环状或“U”字型,每个细胞云的中间无云,四周有云,并通常出现在低压南侧低空气流呈气旋性弯曲的地方。闭口细胞云主要由层积云组成,一般呈球状,中央有云,四周无云或少云,从中央到四周,云厚变薄,色调变暗,边界为多边形,经常出现在高压东南象限,地面气流呈反气旋弯曲的地方。

从形成机制来说,闭口细胞云通常出现在稳定

的冷气团内,且没有强的冷平流。这类云系主要是由云顶辐射冷却作用、逆温层以上的干空气夹卷以及蒸发冷却共同作用而形成。逆温层以上的空气越干,蒸发冷却作用就越强,被充分冷却的空气下沉到达地面时产生辐散,这部分气流会与其他气流辐合而再次被强迫抬升,从而形成对流。在闭口细胞状云中下沉运动占主导地位,下沉运动区非常集中,低层的对流相对开口细胞云更弱(Anderson and Veltishchev,1973)。图 10 是一条入海的冷锋云系,图中云系的后部分布大量的开口(OP)和闭口(CL)细胞状云系,其中闭口细胞云所在的位置对应低空反气旋性环流。

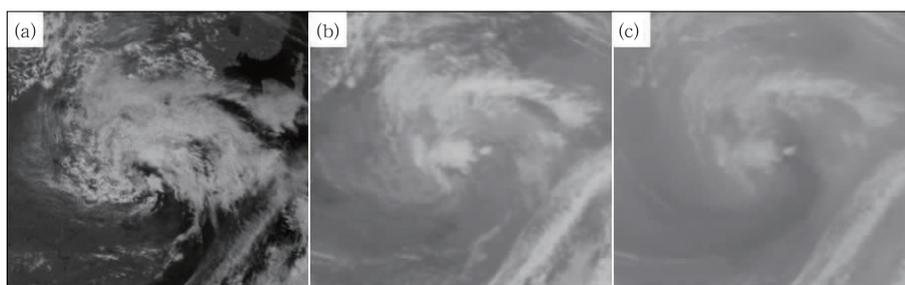


图 8 2008 年 6 月 4 日 0500 UTC 温带气旋云系

(a)FY-2C 可见光通道( $0.55\sim 0.7\ \mu\text{m}$ )图像,(b)FY-2C 中波红外通道( $3.7\ \mu\text{m}$ )图像,  
(c)FY-2C 水汽通道( $6.3\sim 7.6\ \mu\text{m}$ )图像

Fig. 8 Extratropical cyclonic cloud at 0500 UTC 4 June 2008

(a) FY-2C visible channel image of  $0.55\sim 0.7\ \mu\text{m}$ , (b) FY-2C middle infrared channel image of  $3.7\ \mu\text{m}$ , (c) FY-2C water vapor channel image of  $6.3\sim 7.6\ \mu\text{m}$

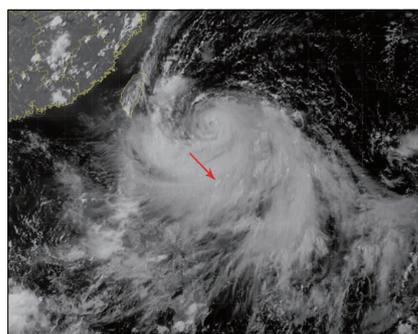


图 9 2008 年 7 月 26 日 0700 UTC 第 8 号台风凤凰 FY-2C 可见光通道 ( $0.55\sim 0.7\ \mu\text{m}$ )图像  
(箭头所指为热带气旋云区上的上冲云顶)

Fig. 9 Typhoon Fung-wong image (FY-2C visible channel of  $0.55\sim 0.7\ \mu\text{m}$ ) at 0700 UTC 26 July 2008

(The arrow is pointing toward the overshooting cloud tops above the tropical cyclone)

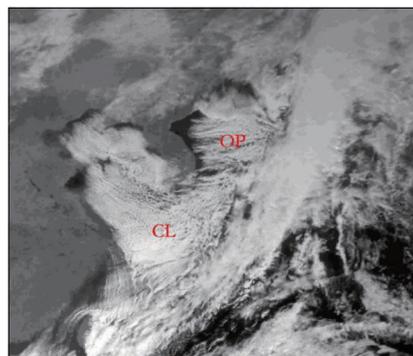


图 10 2008 年 12 月 8 日 0300 UTC FY-2C 可见光通道( $0.55\sim 0.7\ \mu\text{m}$ )地面反气旋对应细胞状云系图像

Fig. 10 The cellular cloud corresponding to surface anticyclone (FY-2C visible channel image of  $0.55\sim 0.7\ \mu\text{m}$ ) at 0300 UTC 8 December 2008

## 2.4 急流云系

急流是对流层内常见的天气系统之一,它在风场上表现为一股水平尺度在 2000 km 以上强而窄的气流,温度场上是一个温度梯度很大的带。急流分为高空和低空急流,高空急流通常指 200~300 hPa 风速大小超过  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的强风速带。而低空急流则是指 850~925 hPa 水平风速超过  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的强风速带。在卫星云图上我们看到的往往是高空急流。人们可以通过急流在云图上的结构变化来推断与之有关的天气系统的发展演变情况。静止气象卫星的 6.7 m 水汽图像是观察急流的有利工具。在水汽图像上急流的形态和结构特征被归纳为三

类:管状急流、正涡度平流型急流以及负涡度平流型急流。

管状急流是指那些在 300 hPa 或 250 hPa 高度上最大风速轴与流线基本平行的急流,在可见光和水汽图像上具有线状的特征,且云系不随时间变化产生旋转(图 11)。

在水汽图像上正涡度平流型急流表现为气旋性弯曲的带状云系。在急流形成阶段,水汽图像上还可以看到水汽边界呈逆时针旋转的现象(图 12)。

负涡度平流型急流与正涡度平流型急流正好相反,它的最大风速轴偏向下游方向右侧,呈反气旋性弯曲。因此,在水汽图像上,这种急流常常表现为反气旋性弯曲的带状云系(图 13)。

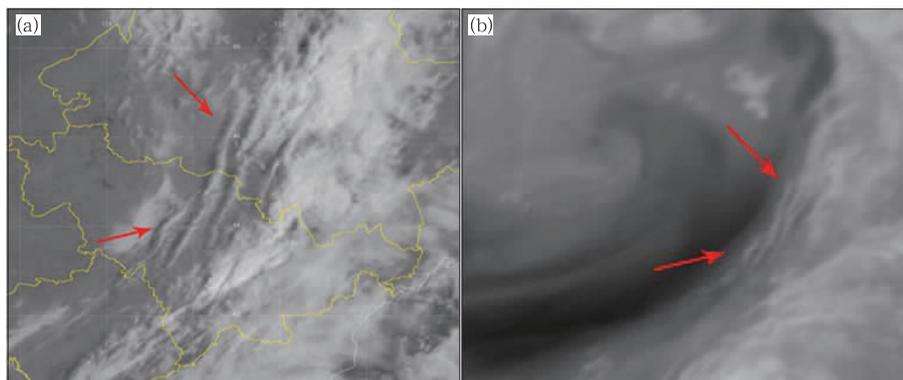


图 11 2009 年 8 月 11 日 0000 UTC 管状急流

(a)FY-2C 可见光通道( $0.55\sim 0.7 \mu\text{m}$ )图像,(b)FY-2C 水汽通道( $6.3\sim 7.6 \mu\text{m}$ )图像

Fig. 11 Tubular jet at 0000 UTC 11 August 2009

(a) FY-2C visible channel image of  $0.55\sim 0.7 \mu\text{m}$ , (b) FY-2C water vapor channel image of  $6.3\sim 7.6 \mu\text{m}$

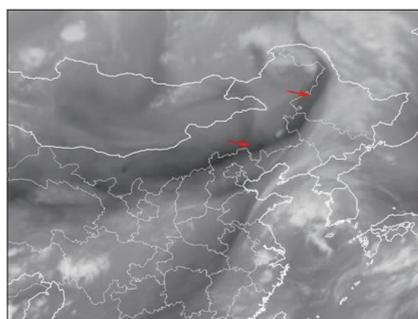


图 12 2009 年 8 月 10 日 1400 UTC FY-2C 水汽通道( $6.3\sim 7.6 \mu\text{m}$ )正涡度平流型急流云系图像

Fig. 12 Positive vorticity advection jet, (FY-2C water vapor channel image of  $6.3\sim 7.6 \mu\text{m}$ ) at 1400 UTC 10 August 2009

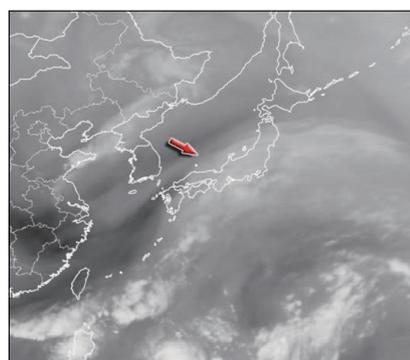


图 13 2009 年 6 月 5 日 0100 UTC FY-2C 水汽通道( $6.3\sim 7.6 \mu\text{m}$ )负涡度平流型急流云系图像

Fig. 13 Negative vorticity advection jet, (FY-2C water vapor channel image of  $6.3\sim 7.6 \mu\text{m}$ ) at 0100 UTC 5 June 2009

除水汽图像外,红外云图和可见光云图上,具有反气旋性弯曲、极地一侧边界清晰的卷云带也是高空急流的一个特征。

### 3 中尺度对流系统云系

中尺度对流系统是造成暴雨、龙卷、冰雹、大风等灾害的直接影响天气系统,由对流单体、多单体风暴和超级单体风暴以各种形式组织而成,包括飚线和中尺度对流复合体,水平尺度在 2~2000 km,生命史从几十分钟到十几小时。根据 Orlanski(1975)的尺度划分,可以细分为  $\alpha$  中尺度系统(200~2000 km)、 $\beta$  中尺度系统(20~200 km)和  $\gamma$  中尺度系统(2~20 km)。它们具有快速发展和尺度小的特点,常规观测不足以捕捉其生命史中的变化细节及其结构。

卫星云图上的中尺度对流云团可以涵盖  $\gamma$  到  $\alpha$  中尺度。星载仪器观测的时空分辨率决定了卫星云图适宜的监测对象,根据目前卫星观测仪器的性能(如 FY-2C/D/E 扫描辐射计红外通道空间分辨率为 5 km,可见光通道为 1.25 km) $\beta$  中尺度(或尺度更大,如  $\alpha$  中尺度)的对流云团,即空间尺度在 20 km 以上,生命史在几小时以上的对流云团和有组织的对流系统才是我们重点关注的对象(李俊和方宗义,2012)。

在卫星云图上,对流云型在形状和尺度上具有很大的跨度,可以由只有几千米的对流细胞、小云簇到几百千米直径的巨大对流复合体。在可见光云图中,这些云型常表现为清晰的边界和块状的纹理。可以再借助 11  $\mu\text{m}$  红外云图来确定它们是深厚的(冷云顶)还是浅薄的(暖云顶)。在白天,也可以借助 3.7  $\mu\text{m}$  的近红外图像(如 AVHRR 通道 3)来确定云的微物理特征(低反射率对应着冰晶或大水滴,高反射率对应着小水滴)(巴德等,1998)。

对流云常常被组织成为对流系统,强烈发展的对流云和中尺度对流系统由于云顶的迅速抬高,具有云顶亮温下降、云顶面积增大和云顶亮温梯度加大等特征。成熟强对流系统的结构特征主要包括三个方面:上冲云顶、云砧和边界层外流。

#### 3.1 上冲云顶

上冲云顶作为强风暴的一个特征,与明显穿过平衡高度(宽广的雷暴云砧顶的高度)的上升气流有

关。它的出现标志着该地区存在强烈的上升气流,并有可能出现剧烈的天气,特别是当清晰的上冲云顶持续很长时间时更是如此。

图 14 就是中尺度对流系统上冲云顶的例子。在可见光图像上,A、B、C 这样的上冲云顶明亮隆起。由于时间是在北京时 18 时,太阳高度角较低,卫星斜视云顶,上冲云顶在其东面云砧上投下暗影。显然,太阳高度角越低,这种阴影就越发明显,因此,在清晨或傍晚通过可见光图像确定上冲云顶最为容易。尽管红外图像的分辨率不如可见光图像,用红外图像来确定强雷暴中云顶最高处的位置往往也并不难。在红外图像上,上冲云顶具有最冷区,并伴有较大的温度梯度。对于很强的雷暴,在极轨卫星图像上曾经观测到上冲云顶与周围云砧有高达 18°C 的温差。这种温差在极轨卫星高分辨率图像上最容易被发现。需要注意的是,当可见光与红外图像的分辨率不同时(如静止卫星图像),红外图像上的上冲云顶的特征并不总是很明显(巴德等,1998)。

#### 3.2 云砧

云砧是积云顶扩展形成的砧状冰晶云体。当积雨云发展成熟后,云中产生的大量冰晶随云顶的辐散气流外流,从而形成云砧(图 15)。由于低温下冰面饱和水汽压很低,冰晶往往可以在大气中长时间存在而不至于蒸发完。当大气湿度较大时,云砧更加宽大而浓厚并长久维持,有时在高空风的作用下可以向下游伸展几十甚至上百千米。当积雨云母体消散时,云砧仍能维持,形成伪卷云。因此,与上冲云顶相关的云砧是分析研究中尺度对流系统的关注点之一。云砧会减少云下地面的太阳辐射,冰粒子的下落还可能影响下层云的微结构。

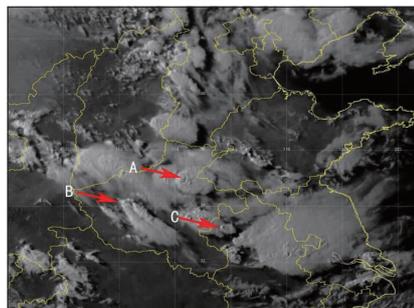


图 14 2009 年 6 月 14 日 1000 UTC 可见光图像

Fig. 14 Visible channel image at 1000 UTC 14 June 2009

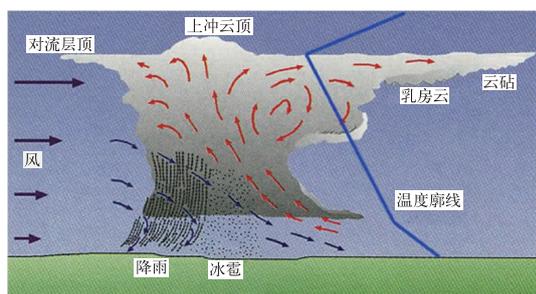


图 15 雷暴云示意图

(1998 Wadsworth Publishing Company/ITP)

Fig. 15 Schematic diagram of thunderstorm cloud

(1998 Wadsworth Publishing Company/ITP)

### 3.3 边界层外流

当雷暴发展到成熟阶段时,强降水伴随有强烈下沉气流(或称下击暴流)在地面形成冷性中高压,下沉到地面的冷气流向四周外流,并形成一条弧状外流边界,外流气流与周围气流相互作用,产生由积云、浓积云组成的弧状对流云线。在卫星云图上,弧状云线表现为一条向外凸起的很窄的云线,它刻画出了由雷暴产生的冷空气外流边界的前沿,这一边界又称之为阵风锋(陈渭民,2003)。东亚地区是著名的季风区,夏季暖湿气流的供应充足,中尺度对流系统常常在多层云区中形成和发展,明显的边界层外流边界并不常见。事实上,在我国即使是单独的中尺度对流系统,也较少看到清楚的外流边界与之相伴。这可能是东亚季风区中雷暴下沉气流不够猛烈,与北美情况略有不同。

图 16 展示了雷暴和雷暴外流边界,从 A 到 B、B 到 C 有两条明显的外流边界(在卫星图像中它们经常表现为弧状积云线),并且在两条外流边界相交处 B 发展出新的对流云团。

与外流边界相关的弧状云线通常表现为:

(1)在可见光图像上,由小而明亮的积云排列而成,云线呈弧状,并且不一定连续,弧线与雷暴母体之间有晴空区相隔(在某种情况下会有阵风锋出现,阵风锋会因上层卷云的遮盖而变得模糊不清)。

(2)在红外图像上,组成弧状云线的积云经常具有浅薄而温暖的云顶,它们也会因为尺度太小而在卫星图像上无法辨认。在足够的强迫和不稳定条件下,它们发展成新的深对流,并具有比原先冷得多的云顶。

(3)母体风暴消失后,云图上可识别的弧状云线能够维持数小时(巴德等,1998)。

图 17 是弧状云线形成的一种概念模式。它表明了弧状云线是在雷暴下击暴流外流与较暖较潮湿的环境大气之间的辐合区中形成的。在弧状云线形成的同时,外流区中冷而稳定的大气经历着下沉、扩散、干绝热加热,从而使相对湿度减小,带来局地的稳定和晴空。云和晴空之间的突变是卫星图像上外流边界如此醒目的主要原因之一(Purdom,1973)。

卫星遥感除能有效地监测上述对流云组成的中尺度天气系统而外,也能有效地监测由于地形强迫产生的重力波而形成的以层积云为主体的中尺度背风波云系。



图 16 2009 年 6 月 14 日 0930

UTC FY-2C 可见光图像

Fig. 16 FY-2C visible channel image

at 0930 UTC 14 June 2009

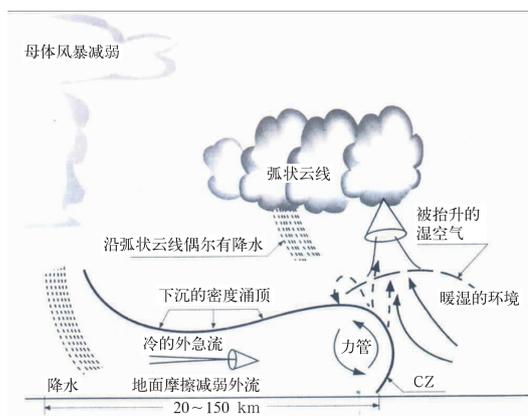


图 17 弧状云线形成的概念模式

(CZ 是辐合区,DSL 是密度涌线)

Fig. 17 Conceptual model of the

formation of arcus cloud

(CZ is the convergence zone,

DSL is the dense surge line)

## 4 国际卫星云气候数据

### 4.1 国际卫星云气候计划 (ISCCP)

国际卫星云气候计划 (International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP) 由世界气候研究计划 (World Climate Research Project, WCRP) 1982 年发起,旨在收集和分析全球卫星数据,获取长时间序列的云特征,加深人们对云在全球辐射收支中作用的理解 (Schiffer and Rossow, 1983) 的科学计划。ISCCP 的数据来自全球业务气象卫星 (Schiffer and Rossow, 1985)。为了保证气候研究所需的数据质量,ISCCP 完成了针对不同卫星遥感仪器的归一化定标与数据质量检验工作 (Rossow et al, 1987),在此基础上,根据统一的数据反演算法,处理生成了长时间序列全球云参数。ISCCP 第一版本的辐射数据在 1984 年发布,C 系列云参数数据在 1998 年发布 (Rossow and Schiffer, 1991)。此后,经过算法改进、参数扩充和版本更新,在第二版 D 系列数据中,日气候数据集 D1 包含了 206 个参数;月气候数据集 D2 包含有 130 个参数 (Rossow and Schiffer, 1999)。Rossow and Schiffer (1991; 1999) 的分析表明,ISCCP 云量产品全球偏差在 4% 左右。国内魏丽等 (1996)、翁笃鸣和韩爱梅 (1998)、刘洪利等 (2003)、王旻燕和王伯民 (2009)、刘瑞霞等 (2009) 和王可丽等 (2001) 通过与地面观测资料对比,得出在中国区域 ISCCP 总云量与地面观测结果虽然也存在一定的偏差,但总体分布较为一致的结论。ISCCP 云参数具有很好的空间覆盖,能够较好地反映全球和区域云的分布情况,是目前国际公认的云气候数据集。

目前 ISCCP 正在酝酿构建 ISCCP-H 系列数据集。与之前 ISCCP-D 系列相比,ISCCP-H 系列数据的空间分辨率由 30 km 提高到 10 km,格点产品从原先的 2.5° 等提高到 1°;在产品反演中还将使用卫星反演的大气廓线以提高产品质量。新数据将原有的 1983—2009 年数据扩展为 1980—2013 年。

### 4.2 卫星气候长期联合监测计划 (SCOPE-CM)

SCOPE-CM (Sustained and COordinated Processing of Environmental satellite data for Climate Monitoring) 是 WMO, WCRP, GCOS, CGMS,

CEOS 和 GEO 合作产生的卫星数据气候研究行动计划。云遥感是 SCOPE-CM 第一阶段的一个主题,旨在通过不同卫星、不同反演算法之间的系统性的比对,获取全球 30 年时间序列完备的云参数。为此,欧洲 EUMETSAT 已经构建了 1982—2009 年 NOAA/AVHRR 的云量、云顶高度、云光学厚度、云类、云水含量等云参数数据集,美国 NOAA 也构建了 PATMOS-X (Pathfinder Atmospheres-Extended) 云参数数据集。从 2013 年开始 PATMOS-X 数据实现了每日更新,完成了自 1979 年开始的历史数据与实时数据的对接。与 ISCCP 相比, PATMOS-X 数据主要取自 NOAA/AVHRR。同时 PATMOS-X 的算法与 ISCCP 也有所不同。涂钢等 (2014) 的对比结果表明,在中国区域, PATMOS-X 总云量、低云量多年平均的空间分布较 ISCCP 更接近站点观测。

## 5 结论与展望

经历 50 余年的发展,气象卫星形成了对云的强大的观测能力。在气象预报业务中,卫星云图首先用于识别各类天气系统,并与数值预报结果相结合,为天气分析人员提供必要的预报依据。气象卫星观测得到的云量、云相态、云滴有效粒子半径等云参数,为理解大气热力和动力过程提供着有效的技术手段。随着卫星遥感数据的积累,包括云参数在内的各类长时间卫星气候数据集在气候变化研究中的作用逐渐显现。它们在诊断全球云的时空分布特征、计算云的辐射强迫,减小气候变化预测不确定性方面发挥着重要作用。

展望未来,随着空间技术的进步,云的卫星遥感将呈现出如下发展态势:

#### (1) 多波段主动探测

星载主动探测技术可以准确地获取云的三维微物理结构信息。尽管目前空间遥感技术还难以实现云的大面阵主动探测,但随着激光雷达技术和微波雷达技术的快速发展,云的主动探测将成为气象卫星云观测的一个最为重要的发展方向。

#### (2) 云的动力结构观测

星载多普勒技术与多角度观测技术相结合,有望获取云的三维动力结构。这一技术的发展将填补目前云动力场观测的空白,极大地提升我们对各类天气系统发展机理的认识,有效地改善天气预报水

平(卢乃锰和谷松岩,2016)。

### (3)高时空分辨率和高光谱分辨率观测

云研究的深入对卫星空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率提出了更高的要求。目前静止轨道遥感卫星已经实现了空间分辨率几十米,时间分辨率数十秒级的大范围的云系观测。而高光谱分辨率的遥感资料可以更加有效地减小云参数反演的不确定性,提高反演精度。可以预见,未来卫星云观测将继续向高时空分辨率和高光谱分辨率的方向发展。

**致谢:** 本文的撰写得到国家卫星气象中心方宗义老师的指导,在此表示感谢!

### 参考文献

- 巴德,等,1998. 卫星与雷达图象在天气预报中的应用[M]. 北京:科学出版社,392.
- 陈洪滨,孙海冰,1999. 冰-水球形粒子在太阳短波段的吸收和衰减[J]. 大气科学,23(2):233-238.
- 陈渭民,2003. 卫星气象学[M]. 北京:气象出版社,350.
- 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[J]. 气象,39(4):478-485.
- 李俊,方宗义,2012. 卫星气象的发展——机遇与挑战[J]. 气象,38(2):129-146.
- 刘贵华,余兴,戴进等,2011. 地形云人工增雨条件卫星探测反演个例分析[J]. 气象学报,69(2):363-369.
- 刘健,2015. 风云二号卫星的冰云光学厚度反演偏差分析[J]. 气象学报,73(6):1121-1130.
- 刘健,董超华,张文建,2003a. 利用 FY1C 资料反演水云的光学厚度和粒子有效半径[J]. 红外与毫米波学报,22:436-441.
- 刘健,董超华,朱小祥,2003b. FY-1C 资料在云顶粒子热力学相态分析中的应用研究[J]. 大气科学,27(5):901-908.
- 刘健,李云,2011. 风云二号静止气象卫星的云相态识别算法研究[J]. 红外与毫米波学报,30(4):322-327.
- 卢乃锰,谷松岩,2016. 气象卫星发展回顾与展望[J]. 遥感学报,20(5):832-841.
- 涂钢,刘波,余清波,2014. PATMOS-x、ISCCP 云量产品及地面观测在中国区域的对比分析[J]. 地理学报,34(2):198-204.
- 汪宏七,赵高祥,1996. 云微物理特性对云光学和云辐射性质的影响[J]. 应用气象学报,7(1):36-44.
- 许培贞,1979. 华北锢囚锋的一个个例分析[J]. 气象,5(9):6-8.
- 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[J]. 气象学报,60(5):594-601.
- 周毓荃,陈英英,李娟,等,2008. 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[J]. 气象,34(12):27-35.
- Anderson P K, Veltishchev, N F, 1973. The use of satellite pictures in weather analysis and forecasting[R]. Technical Note 124, No. 333, WMO, Geneva, Switzerland, 275.
- Baum B A, Kratz D P, Yang Ping, et al, 2000. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS 1. data and models[J]. J Geo Res, 105:11767-11780.
- Curran R J, Wu M L C, 1982. Skylab near-infrared observations of clouds indicating supercooled liquid water droplets[J]. J Atmos Sci, 39:635-647.
- Hansen J E, Pollack J B, 1970. Near-infrared light scattering by terrestrial clouds[J]. J Atmos Sci, 27:265-281.
- Hirakata M, Okamoto H, Hagihara Y, et al, 2014. Comparison of global and seasonal characteristics of cloud phase and horizontal Ice plates derived from CALIPSO with MODIS and ECMWF [J]. J Atmos Oceanic Technol, 31, 2114-2130, doi: 10.1175/JTECH-D-13-00245.1.
- 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) [J]. IEEE Trans Geosci Rem Sens, 30:1-27.
- Liu Z, Vaughan M, Winker D, et al, 2009. The CALIPSO Lidar cloud and aerosol discrimination: Version 2 algorithm and initial assessment of performance[J]. J Atmos Oceanic Technol, 26(7):1214-1228.
- Pilewskie P, Twomey S, 1987. Cloud phase discrimination by reflectance measurements near 1.6 and 2.2  $\mu\text{m}$ [J]. J Atmos Sci, 44:3419-3420.
- Platt C M R, 1973. Lidar and radiometric observations of cirrus clouds[J]. J Atmos Sci, 30:1191-1204.
- Purdum J F W, 1973. Satellite imagery and the mesoscale convective forecast problem[C]. Preprints, 8th Conference on Severe Local Storms, 244-51.
- Rossow W B, Kinsella E, Wolf A, et al, 1987. International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) description of reduced resolution radiance data[R]. WMO/TD 58 (revised), World Climate Research Programme (ICSU and WMO), 143 pp.
- Rossow W B, Schiffer R A, 1991. ISCCP cloud data products[J]. Bull Amer Meteor Soc, 72:2-20.
- Rossow W B, Schiffer R A, 1999. Advances in Understanding Clouds from ISCCP[J]. Bull Amer Meteor Soc, 80(11):2261-2287.
- Schiffer R A, Rossow W B, 1983. The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): The first project of the World Climate Research Programme[J]. Bull Amer Meteor Soc, 64:779-784.
- Schiffer R A, Rossow W B, 1985. ISCCP Global Radiance Data Set: A New Resource for Climate Research[J]. Bull Amer Meteor Soc, 66:1498-1505.
- Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al, 2009. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms[J]. J Atmos Oceanic Technol, 26(11), 2310-2323, doi: 10.1175/2009JTECHA1281.1.