

第4章 地球大气的卫星观测

S. A. ACKERMAN^{1,2}, S. PLATNICK³, P. K. BHARTIA³, B. DUNCAN⁴, T. L'ECUYER^{1,2}, A. HEIDINGER⁵,
G. SKOFRONICK-JACKSON⁶, N. LOEB⁷, T. SCHMIT⁵, N. SMITH⁸

(1-2. CIMSS/大气海洋科学系, 威斯康星大学麦迪逊分校; 3-4. NASA; 5. NOAA/NESDIS/STAR/CoRP;
6. NOAA卫星产品部; 7. NOAA地学部; 8. 科技公司 (STC))

编译: 侯美亭 李婧华

摘要: 卫星气象学是大气科学中的一个相对较新的分支。该领域出现在20世纪50年代末的冷战时期, 它建立在二战后火箭技术发展的基础上。在不到70年的时间里, 卫星观测改变了科学家观察和研究地球的方式。本文将讨论我们在理解卫星观测能量和水循环、天气预报和大气成分方面的一些关键进展。虽然卫星气象学的发展离不开世界各国的推动, 但在有限篇幅的美国百年气象学会纪念文集上, 本文的重点是介绍美国在这方面的成就。



第一作者 史蒂文·阿克曼 (Steven. A. Ackerman)

阿克曼是美国威斯康星大学麦迪逊分校大气与海洋科学系教授、威斯康星大学气象卫星研究所所长。1987年获得科罗拉多州立大学大气科学博士学位, 此后一直就职于威斯康星大学麦迪逊分校。他的研究兴趣主要在于了解地球辐射平衡的变化如何影响和受到其他气候变量变化的影响, 如云、气溶胶、水汽和地表性质, 并利用理论模型和观测结果对这些反馈机制进行研究。
(编者提供)

1 引言

卫星观测从根本上改变了我们观察和理解地球的方式。从早期的卫星观测开始, 其数据就被用来对地球大气进行定量测量。现代卫星大气数据涵盖了温度和湿度探测、风场、痕量气体浓度、云和气溶胶特性、降水格局和辐射收支。本章重点介绍过去60年来大气卫星观测取得的一些关键进展, 并列举了一些例子来说明目前空间设备对于了解大气的重要性。

在美国气象学会诞生之前, 人们就已经很好地构建了从高空观看地球的概念。1891年, Ludwig Rohrmann发明了火箭助推照相机的第一项专利, 其原理是在载荷返回地球时拍摄照片。1896年, Alfred Nobel申请了一个改进版本的专利, 称为“一种获得摄影地图的改进方”。1928年, Herman Potočnik发表了“太空旅行的关键——火箭发动机”一文, 定义了地球静止轨道, 并可将其用作通信平台。1945年, Arthur C. Clarke发表了“地外转播——火箭发射台可以提供全球无线电覆盖吗?”一文, 普及了轨道的概念。第二次世界大战后, 火箭将摄像机发送到大气层高处来拍摄天气系统, 并展示了地球轨道卫星观测天

气的潜力 (Wexler 1954)。Wexler委托艺术家创作的卫星观测模拟图见图1。

气象卫星时代开始于20世纪50年代的“太空竞赛”。1957—1958年国际地球物理年 (IGY) 间,



图1 美国天气局前气象研究主任 Harry Wexler 博士于1954年委托绘制了一幅画, 畅想卫星可提供的风暴的鸟瞰图

全球68个国家在研究我们的星球。1957年10月，苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星。在1959年，人类第一颗用于气象观测的人造卫星——探险者7号（Explorer-7），被用于监测地球的热量收支，这是第一次成功地从空间观测地球。它改变了未来科学家研究地球的方式。从那时起，仪器、数据技术、卫星和观测策略便逐渐有了巨大的改善。

观测策略始于定义一个合适的卫星轨道。具体科学目标的完成依赖于各种各样的卫星轨道。低地球轨道（LEO）卫星（300~1500 km）为遥感仪器提供了几方面的优势，包括高空间分辨率观测、特定时间和空间上的采样。轨道倾角描述了轨道平面和赤道的夹角。极地轨道卫星的倾角约为 $\pm 90^\circ$ ，能提供全球范围内的采样，该轨道的一个亚类是太阳同步轨道，在该轨道上，卫星轨道平面和太阳始终保持固定取向。太阳同步轨道卫星通过赤道的时刻基本保持固定的地方时。例如，美国最新业务极轨卫星系列（JPSS）的高度、倾角、轨道周期和白天通过赤道时刻分别为824 km、 98.8° 、101 min和当地时间13:30。对于低轨轨道，需要对轨道进行定期调整，以避免由于大气阻力引起的扰动。地球静止（GEO）轨道卫星在赤道上方约35800 km的高度飞行，轨道周期与地球自转相匹配，因此卫星大致固定在特定经度的赤道上空。另一种轨道类型是高椭圆轨道（HEO），具有低空近地点（通常在1000 km以下）和高空远地点（通常在35000 km以上）的特点。一个例子是苏联/俄罗斯的卫星从20世纪60年代开始使用的Molniya轨道，能为地球观测通常覆盖不到的极地区域提供很好的覆盖。虽然HEO轨道尚未用于地球科学观测，但此类轨道的实用性仍在探讨中（Kidder and Vonder Haar 1990; Trishchenko et al. 2015）。最后，位于第一Lagrange点（L1）的卫星提供了一个独特的视角，它在距离地球（朝向太阳）约160万 km的地方。从这个相对稳定的轨道上，地球观测仪器可以不断地观测到被白昼照亮的半个地球。一个例子是2015年发射的NOAA-NASA DSCOVR卫星。虽然它的任务是太阳物理和空间气象观测，但DSCOVR是第一个包括地球成像（EPIC）和宽带辐射测量（Nistar）仪器的平台。利用一种新的后向散射太阳视图几何结构，科学家正在研究该轨道对痕量气体、云和气溶胶观测的潜力（Marshak et al. 2018）。卫星的最佳轨道部分取决于研究目标。

美国环境卫星中两个特别值得注意的研究项目包括Nimbus和地球观测系统（EOS）。这两个项目都在极地轨道上执行了几次卫星任务。Nimbus是一个在

1964—1978年启动的7-卫星计划（Shapiro et al. 2014; Ward 2015），在NASA、NOAA和USGS的传感器开发中发挥了关键作用，这些将在“天气监测和预报”一节作进一步讨论。EOS开始于20世纪80年代，部分原因是认识到需要一个更加综合的、多学科的观测项目，以便更好地推进地球系统过程和气候科学研究。虽然多年来研究方案发生了相当大的变化，但最终共发射了10颗不同的卫星，包括著名的Terra（1999年）、Aqua（2002年）和Aura（2004年）卫星。关于EOS的全面回顾，可以参考King and Platnick（2018）以及EOS项目科学办公室的12篇文章，见*Earth Observer newsletter*（cosps.nasa.gov/earthobserver/new-perspectives-eos）。当然，其他项目和个别任务也为地球的天气和气候研究做出了重要贡献。卫星气象学的历史可以沿多种视角进行讨论（例如，Purdom and Menzel 1996; Smith et al. 1986），包括按时间顺序讨论卫星任务。本章所采取的方法是按照卫星测量对天气和气候科学进步的贡献。虽然过去几十年中，基于卫星的科学进展是相互关联的，但我们将本章分为四个广泛的科学领域：**辐射能量收支、水文循环、天气系统和预报，以及大气成分**。增进我们对这些广泛领域的了解需要卫星任务的观测。

辐射能量收支：大气层顶（TOA）能量收支是最基本的测量地球气候的方法。TOA地球辐射收支（ERB）囊括了太阳能量输入地球系统、辐射损失和热辐射发射三方面。根据太阳、大气和地球表面之间能量流动的地理变化，建立了平均大气和海洋温度模式，它是全球风和洋流模式的驱动力，并通过蒸发和降水过程控制着水文循环。量化地球的能量平衡对于了解气候系统和预测全球气候变化的影响至关重要。自从第一颗气象卫星发射以来，它们在增进对全球能量收支的认识方面发挥了关键作用。

水文循环：水文循环即整个地球系统的水循环。大气水汽的主要来源是海洋的蒸发；地表和植物的蒸发蒸腾也是大气水汽的一个关键组成部分。水汽只占大气的1%~4%（按体积百分比），但它在天气和地球能量平衡中起着关键作用。水汽吸收和辐射电磁辐射的光谱范围很广，为对流层和平流层各水相的遥感提供了基础。云至关重要，它不仅在大气循环过程中将水输送到全球，而且通过与太阳和红外辐射的相互作用来调节地球的辐射能量收支。降水是淡水的重要来源，了解世界各地何时、何地、下多少雨或雪对科学和社会都很重要。降水也代表着地球大气的重要能量（潜热）和水文交换，卫星可以量化和监测

云、降水和大气水汽的全球分布 (Peters-Lidard et al. 2019)。

天气监测和预报：卫星观测提供了对天气预报至关重要的常规大气全球评估。通过跟踪天气系统和提供从其他平台不可能获得的时空尺度上的大气动力学信息，卫星观测改变了气象学。卫星观测对于模式配置和资料同化也至关重要，有助于解决天气系统的动力学问题，从而改进预报。今天的卫星系统定期监测全球的天气格局，是日常天气预报和公众气象意识的重要组成部分。

大气成分：气溶胶和微量气体在许多方面影响着地球的天气、空气质量和气候。气溶胶对气候的直接冷却效应在概念上已经很清楚了，但是气溶胶光学参数的全球分布在气候模式评估中需要更好的限定。云凝结核 (CCN) 和冰核 (IN) 形式的气溶胶也可以通过改变云的光学特性间接影响气候，从而影响包括辐射特性在内的一系列云特性。需要长期气溶胶数据来帮助区分人为气溶胶与自然气溶胶的效应。专门的卫星传感器能够反演多种痕量气体信息，为了解空气质量及平流层臭氧状态提供基本数据。

各种各样的卫星携带着不同仪器，生成了大量的数据。这些传感器使用主动或被动的校准和定标技术来观测能量。在某些情况下，观测到的辐射会形成图像。天气预报利用卫星动态图像监测大气状况。辐射也可以直接同化在数值天气预报模式中。对于许多其他应用，观测到的辐射通过计算机算法转换为地球物理参数 (例如能量通量、温度分布、气溶胶光学厚度)。这些算法是以物理和统计框架为基础的。算法产品的验证是通过地面观测网络 (例如, Holben et al. 2001; De Mazière et al. 2018)、探空仪 (例如, Nalli et al. 2018a, b)、机载观测 (例如, Cox et al. 1987) 和独立的卫星方法 (例如, Ackerman et al. 2008) 的一些结合进行的。通过对已知误差源使用特定的协方差方法，可将反演不确定度作为一个数据集与反演结果一起生成 (例如, Austin et al. 2009; Poulsen et al. 2012; Platnick et al. 2017)。

从卫星平台观测地球，使地球系统科学研究得到了迅速发展，并带来了巨大的社会效益，例如天气预报和空气质量监测的改善。

2 辐射能量收支

天基观测为我们对地球辐射平衡的理解带来了革命性的变化，它首次提供了对太阳净辐射和TOA射出热辐射空间分布的真正全球估计 (例如, Weinstein and Suomi 1961; Raschke and Bandeen 1970; Harrison et al.

1990)。最早的人造卫星任务之一就是观测地球的辐射收支 (ERB)。

1959年发射了搭载Verner Suomi和Robert Parent开发的平板辐射计的“探险家七号” (House et al. 1986, 附图1)，其首次成功地从太空测量了ERB。在早期的航天器中，尽可能避免移动部件；Suomi和Parent创造了一个简单的设计，由两对平板组成，平板安装在旋转的航天器的对面。一对漆成黑色，另一对漆成白色。这对黑色的平板可以吸收光线，包括直接来自太阳的，以及地球反射和地球辐射的。另一对白色的平板反射了大多数光线，但可以吸收地球辐射。通过测量这些平板的温度，并用热平衡方程计算了太阳和地球发出的辐射量。这项试验首次提供了地球辐射平衡的粗略测量，并确立了云在辐射能量收支中的重要作用。在随后的几年里，我们了解到地球比地面仪器所测量的要更暗、更热，热带和中纬度之间吸收太阳能的梯度比以前想象的要大得多 (Vonder Haar 1994)。环境科学服务管理局 (ESSA) 5~9号航天器 (于1967—1969年发射) 携带了与“探险家七号”上的类似的辐射计。



附图1 “探险家七号”卫星

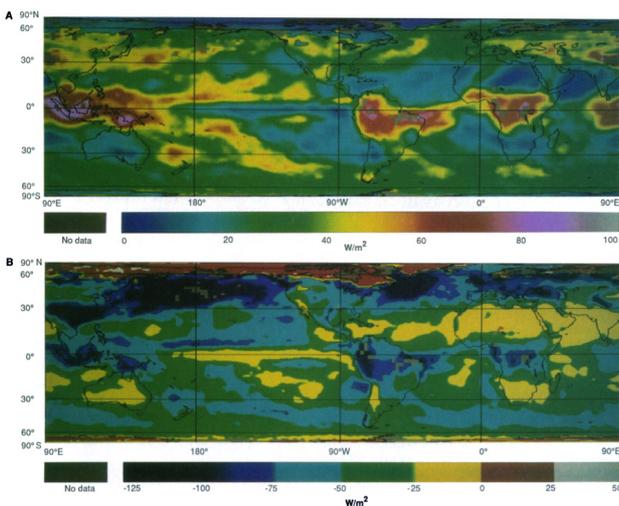
1964年，设计了极地轨道Nimbus计划，通过同步测量入射太阳辐射和射出地球反射及地球辐射，来确定ERB。Raschke et al. (1973) 利用Nimbus 3观测估算了地球每年的全球辐射收支，包括全球、半球和纬向平均的行星反照率、吸收太阳辐射和射出红外辐射损失。他们也提供了近天气尺度空间分辨率的全球图像。1969年，对Nimbus 3号卫星上扫描辐射计收集的数据进行分析后发现，地球的行星发射温度约为254 K，并且反射了约29%的入射阳光 (Vonder Haar and Suomi 1969; Vonder Haar et al. 1972)。

Nimbus 6号和7号卫星携带了一个地球辐射收支

(ERB) 仪器, 该仪器由一个宽视场 (WFOV) 仪器和一个扫描窄视场 (NFOV) 仪器组成, 能以更高的空间分辨率 (约10~100 km) 测量地球辐射。WFOV 辐射计的足迹长达几千千米, 且不受晴空和多云场景的影响。这些仪器通过在不同的观测天顶角进行扫描, 从根本上测量了辐射而不是通量。将辐射观测转换为通量需要一个角分布模型 (ADM)。Nimbus 测量显示了大陆对辐射收支和纬向变化的影响 (Kubota and Imai 1986), 同时也证实了ERB分量的纬向变化大于经向变化; 而经向变化主要由陆海分布决定。

a 地球辐射收支试验 (ERBE)

地球辐射收支试验 (ERBE) 是对Nimbus辐射测量的后续改进 (Barkstrom 1984; Barkstrom and Smith 1986)。ERBE是围绕着三颗地球轨道卫星设计的: NASA地球辐射收支卫星 (ERBS) 和两颗NOAA卫星。ERBS卫星处于57°倾斜轨道上, 而NOAA 9和NOAA 10上的ERBE扫描仪处于极地轨道上; ERBS卫星的轨道允许测量白天地球辐射的变化。每个卫星都携带扫描 (Kopia 1986) 和非扫描辐射计 (Luther et al. 1986) 以及太阳辐射计。然后, 将基于Nimbus 7 NFOV发展的角分布模型应用于ERBE的NFOV仪器上 (Suttles et al. 1988; Suttles et al. 1989), 它能够测量晴空和多云地区的辐射收支。ERBE观测结果成为大气环流模式 (GCMs) 的重要参考 (例如, Ramanathan et al. 1989, 附图2)。



附图2 结合 ERBS 和 NOAA-9 卫星观测结果得出 1985 年 4 月长波 (上) 和短波 (下) 云强迫, 当时的误差达到 $\pm 10 \text{ W/m}^2$

云调节着 TOA、大气和地表的辐射收支。云增加了地球的反照率, 从而减少了地球吸收的太阳辐射量。云减少了地面红外辐射的损失。ERBE 计划通过推断云辐射效应 (CRE), 量化了云对地球辐射能量

收支的影响。它定义为在所有天空和无云条件下测得的反射太阳辐射和/或发射热辐射之间的差异, CRE 取决于云的宏观物理和微观物理性质。ERBE 的一个重要成果是发现在全球范围内, 短波 CRE 超过瞬时长波 CRE。负 (正) 净 CRE 通常被称为冷却 (加热) 效应。其他 ERBE 成果包括:

- 为气候研究建立准确的长期数据集 (Loeb et al. 2009; Loeb et al. 2015);
- 在区域尺度上 (如海洋层积云区和热带辐合带) 估算 CRE, 从而能够测量云类型;
- 提供用于验证和改进气候敏感性研究的 GCM 的辐射标准 (Cess and Potter 1988; Ramanathan et al. 1989);
- 首次反演出全球区域辐射参数的准确日变化 (Harrison et al. 1988);
- 测量 1987 年厄尔尼诺期间的长波和短波辐射异常 (Soden 1997);
- 测量皮纳图博火山喷发引起的短波和长波异常。ERBE 测量了反射阳光的增加和向空间发射的热能的减少, 这导致了轻微的全球冷却 (Minnis et al. 1993)。

在 ERBE 计划实施后的几十年里, 校准的改进、空间和时间分辨率的提高、地表和大气特性模型的更好建立, 以及空基主动传感器的发展导致了地球能量收支观测的定期改进。例如, 由于目前在太阳辐射和气候试验 (SORCE) 中的总辐照度监测器 (TIM) 非常精确的测量, TOA 处的入射太阳通量密度 (通常称为太阳常数) 现在是已知的, 为 $1360.8 \pm 0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (Kopp and Lean 2011)。

定义全球能量收支需要对 ERB 日循环进行适当抽样。ERBE 通过提供全球采样的三颗卫星解决了这一问题, 但对于非极地区的采样在时间上仍然有限。自 2003 年以来, 欧洲第二代气象卫星 (MSG) 的地球物理辐射收支 (GERB) 仪器直接解决了这个问题, 尽管只覆盖了全球的部分区域 (Harries et al. 2005; Schmetz et al. 2002)。

b 云和地球辐射能量系统 (CERES)

在过去的 17 年里, 云和地球的辐射能量系统 (CERES) 试验定期收集全球的 ERB 观测数据。Terra、Aqua、S-NPP 和联合极地卫星系统 (JPSS-1) 等太阳同步卫星都搭载了 CERES 仪器。每个 CERES 仪器都是一个 3 通道扫描辐射计, 使用精密热敏电阻来探测 $0.3 \sim 200 \mu\text{m}$ (全通道)、 $0.3 \sim 5 \mu\text{m}$ (短波通道) 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ (窗区) 的辐射 (Wielicki et al.

1996)。CERES仪器的空间分辨率在Terra和Aqua上为20 km（星下点），在S-NPP和JPSS-1上为24 km。

比较Terra和Aqua的CERES测量结果表明，CERES数据符合Ohring et al. (2005) 提出的稳定性要求，其建议在95%置信水平，TOA通量的长期稳定性对于短波（SW）为每10年 $0.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，长波（LW）为每10年 $0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

CERES的一个独特的特征是它可以从地面被命令以不同的模式扫描。在交叉跟踪模式下，扫描垂直于地面跟踪，从而优化空间采样，每天提供全球覆盖。CERES旋转方位平面（RAP）扫描模式依赖于仪器的方位轴驱动系统；当处于RAP模式时，仪器在方位角旋转时以仰角扫描，从而获得在视场天顶和相对方位角组合范围内的辐射。该仪器可以在沿轨道模式下扫描，以获取沿地面轨道的多角度测量值，也可以置于可编程的方位平面模式下获取测量值，以便与其他仪器进行相互校准或支持野外试验。

CERES项目的一个核心目标是继续获取从TOA到地表的辐射收支的长期全球气候数据记录，以及影响它的有关的大气和地表特性。为了实现这一目标，需要大量的数据源。除了CERES仪器外，还有测量太阳输出的宽带辐射计、太阳同步轨道和地球静止轨道上的高分辨率光谱成像仪、气溶胶和臭氧同化数据以及基于微波辐射计数据的冰雪/海冰图。虽然TOA辐射收支很大程度上是由精确的CERES宽带辐射计测量直接确定的，但地面辐射收支是通过使用基于成像仪的云和气溶胶反演以及气象同化数据初始化的辐射传输模型间接得出的。为了准确地捕捉ERB从年际到年代际的变化，用于产生这些数据记录的卫星仪器必须是辐射稳定的，输入数据必须没有人为的不连续性。否则，将真实的气候系统变化与数据记录中的人为因素区分开是非常困难的。

CERES项目已经产生了一套独特的数据产品，用于在一系列时空尺度上研究ERB。CERES RAP数据和基于成像仪的反演已被用于开发新的经验ADM，用于将测量辐射转换为辐射通量。利用中分辨率成像光谱仪（MODIS; Salomonson et al. 1989）和可见红外成像辐射计（VIIRS; Wolfe et al. 2013; Xiong et al. 2014），CERES科学团队开发了专门针对ERB应用程序的云反演数据。

为了解释CERES观测时间之间的日循环变化，成像仪数据补充了来自地球静止卫星的数据（Doelling et al. 2013; Doelling et al. 2016）。在任何给定的时间，5个地球静止成像仪都在测量 60°S — 60°N 可见光谱和红

外光谱上的辐射。CERES小组对所有这些仪器进行交叉校准，以提供精确的辐射通量和每小时平均 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 格点区域的云属性。迄今为止，CERES团队已经处理了来自5个CERES仪器、2个MODIS、1个VIIRS和16个地球静止成像仪的数据，所有这些都集成在一起，以保证从大气顶部到底部的辐射通量的精度。

CERES项目使用辐射传输模型确定地表辐射通量（Fu and Liou 1993; Fu et al. 1998; Kratz and Rose 1999; Kato et al. 1999, 2005）。利用从附加卫星观测中获得的云属性以及其他原始输入数据，初步确定了该模型，以提供卫星地面辐射通量的长期记录（Rutan et al. 2015; Kato et al. 2013, 2017）。通过与48个海洋浮标和37个陆地站点的地面辐射测量值的比较，CERES地面辐射通量的年平均值与地面测量值一致（Kato et al. 2017）。

CERES数据产品已用于一系列科学研究。下面列出了这些研究的一些结果。

- CERES已用于评估气候模式中参数化方案的影响（Park et al. 2014; Gettelman et al. 2015）。示例包括英国气象局统一模式的大块冰云属性参数化（Baran et al. 2015），GFDL实验室模拟大气成分的统一湍流和云参数化方案（AM3 GFDL GCM）（Guo et al. 2014），多尺度模式框架中的三阶湍流闭合（Xu and Cheng 2013a, b），WRF模式中的辐射（Herwehe et al. 2014）和积云参数化方案（Lim et al. 2014）。
- CERES得出的全球平均净TOA通量变化与ARGO现场数据中海洋热含量变率的变化进行了比较（Loeb et al. 2012; Johnson et al. 2016）。
- CERES数据被用来解释为什么ITCZ的平均位置在北半球（Frierson et al. 2013; Marshall et al. 2013; Loeb et al. 2016）。
- CERES数据结合大气再分析用于估计整个大西洋的海洋热传输。结果与观测很好地吻合（Trenberth and Fasullo 2017）。
- CERES数据已用于研究TOA辐射收支变化对北极海冰变化的响应。2000—2012年，9月海冰面积每减少 10^6 km^2 ， 75° — 90°N 的年平均吸收太阳辐射会增加 $2.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 或者约 $6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在观测到的北极变暗过程中，云量变化的作用似乎微不足道；因此，对于减轻未来北极变暖，北极云反照率反馈的可能性降低了（Hartmann and Ceppi 2014; Pistone et al. 2014）。
- CERES数据产品使人们对气候反馈和气候敏感

性有了新的认识 (Dessler 2010; Zhou et al. 2015; Brient and Schneider 2016)。

c 能量收支构成

ERB是基本的气候参数,需要在稳定性和绝对精度方面进行测量。只有从卫星对ERB进行连续测量,才能在全球范围内提供所需的时间和空间分辨率。然而,值得注意的是,早期行星能量平衡的估计值经受了时间的考验。Terra和Aqua卫星上的CERES证实了地球的反照率为29.4% ($\pm 0.3\%$),并且行星发射的黑体温度相当于255 K (± 1 K) (Wielicki et al. 1996; L'Ecuyer et al. 2015)。

虽然现代卫星可能没有显著改变TOA全球平均能量平衡的估计值,但新的测量提供了对地球能量平衡及其调节因素的更深入的洞察 (L'Ecuyer 2016)。早期的卫星在极地区域缺乏覆盖,提供的信息不足以限定云的特性。能量的地理分布不平衡,大气中的辐射加热和冷却,以及大气与地面之间的热交换驱动着天气和气候。此外,在过去十年里,来自Argo观测的海洋热含量变化表明,当大气适应人类活动排放和相关气候反馈产生更高浓度温室气体时,其捕获的多余能量仅为 $0.75 \pm 0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (von Schuckmann et al. 2016);该值与卫星重力和高度测量的独立估算值吻合良好 (Llovel et al. 2014; Dieng et al. 2015)。早期的卫星记录没有足够的信息来解决大气成分和地表性质的变化,这些变化可能会带来数量级的影响。

早期研究 (例如, Cox and Griffith 1979; Ackerman and Cox 1981, 1987) 尝试推导区域大气辐射辐合廓线,使用卫星观测确定云量并估计其垂直分布。这些观测结果与辐射传输计算的温度、水分、二氧化碳、臭氧和气溶胶的垂直和水平分布相结合,可以估计大气中的辐射辐散。地表通量也可以以这种方式计算。

量化影响地球能量平衡的因素一直是21世纪卫星观测的主要目标。现代卫星提供了对云、气溶胶、海洋表面温度、积雪和海冰、植被、风和痕量气体的新的估算,其准确度足以更好地诊断它们对地球能量收支的影响。例如,来自CERES的辐射通量和来自3个云传感器 (MODIS、CloudSat的云廓线雷达 (CPR) 和CALIOP上的正交极化云气溶胶激光雷达 (CALIPSO)) 的云属性数据,改善了我们对云在调节地球和太空之间的辐射交换过程中重要作用的理解 (King et al. 2003; Stephens et al. 2002; Winker et al. 2007, Winter et al. 2010)。先进微波扫描辐射计 (AMSR-E; Njoku et al. 2003) 提供了更完整的地表辐射特征 (温度、土壤湿度和冰盖)。现在,新的高

光谱仪器,如大气红外探测仪 (AIRS; Susskind et al. 2011),能够以前所未有的分辨率和准确度获取温度和湿度曲线。主动和被动微波传感器的观测结果改进了降水中潜热释放的全球分布的估计;这些测量结果也使我们能够开发出一种算法,该算法旨在通过体积公式推断出地表蒸发和感热通量所需的近地表温度和湿度 (例如, Clayson and Bogdanoff 2013)。

在过去的25年中,工程技术的进步使得人们可以同时从多颗卫星组成的星座中进行观测 (Stephens et al. 2002; L'Ecuyer and Jiang 2010; Stephens et al. 2018)。这一突破促进了新的多传感器辐射通量集成数据集的开发,如CloudSat的2B-FLXHR-LIDAR产品 (L'Ecuyer et al. 2008) 和CERES-CALIPSO CloudSat-MODIS (C3M) 产品 (Kato et al. 2012)。在这些数据集中使用的来自CloudSat和CALIPSO的垂直结构和云底估计,已经对地球表面能量收支进行了修订。例如,地表被 $165 \pm 6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的太阳能和大气向地表释放的额外的 $345 \pm 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的热能加热 (Stephens et al. 2012a,b)。AMSR-E数据表明,这些表面热源被来自水蒸发 (主要来自海洋) 的潜热传输的 $81 \pm 4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、显热传输的 $25 \pm 4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和表面热排放冷却的 $399 \pm 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 所抵消 (L'Ecuyer et al. 2015)。

对云、气溶胶、降水及其环境的同时测量也促进了对调节地球能量收支的特定因素的新的研究。Chand et al. (2012) 的研究表明,当气溶胶位于云层上方时,吸收气溶胶会对气候产生暖化影响,这促使重新审视之前对气溶胶直接辐射强迫气候的估计。基于这些发现, Matus et al. (2015) 利用来自CALIPSO和CloudSat的全球气溶胶和云量信息以及辐射传输模型,估计全天空条件下的全球气溶胶直接辐射净效应为 $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,填补了之前估计中经常忽略的多云场景的重要暖化贡献。基于20世纪80年代和90年代的创新性工作,多传感器A-Train 测量显示,云反射到空间的太阳光比例大约是原来的两倍,从晴空时的15%到观测到的29.4% (L'Ecuyer et al. 2015; Matus and L'Ecuyer 2017)。该测量值代表了输入太阳能减少 $49 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。同样,云将地球释放到太空的能量减少了约 $28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (相当于无云行星情况下地球发射温度的 8°C 的变化)。因此,总的来说,与无云大气相比,云使地球冷却了约 $21 \pm 4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (Matus and L'Ecuyer 2017)。

3 水文循环

a 云

从最早的预测时代起,云被视为大气圈的当前状态。早在器测时代之前,诸如“环月”之类的民间

说法就已经成为普遍的预测经验法则。后来，在太空竞赛的早期，科学家们认识到，卫星观测可以提供一个全球云图的鸟瞰图，为从地面观测到的数据和清晰度提供了依据。1960年4月1日发射的红外观测卫星（TIROS-1）首次对云层进行了卫星观测。1960—1965年间发射了10颗试验性的TIROS卫星，主要是通过识别云系统来支持天气预报。为了解水文循环，需要测量的云量特性有：云量、云顶和云底高度、水相、微物理特性及其降水状态。

b 云量

除了在卫星气象学和气候学中的应用之外，地面和晴空大气研究也需要云探测，以便于处理可能含有云的像素。由于云通常具有比下垫面更高的反射率和更低的温度，简单的可见光和红外窗口阈值方法在云探测方面提供了相当的技巧（Arking 1964; Saunders and Kriebel 1988; Derrien et al. 1993; Chen et al. 2002）。早期的方法使用恒定的阈值，后来用场景类型的阈值或变化的阈值代替（例如，Ackerman et al. 1998; Minnis and Harrison 1984a, b）。另一种方法是在二维柱状图上定位云像素簇（Desbois et al. 1982; Phulpin et al. 1983）。聚类中心在柱状图中被识别出来，然后被分类为清晰的或特定类型的云。

国际卫星云气候学项目（ISCCP）始于1983年，其重点是基于卫星观测，得出云特性的全球气候学，以表征云的分布和变化及其对辐射收支的影响。ISCCP数据产品也被用于评估全球云分布的气候模式模拟。利用可见光和红外辐射，提出了ISCCP的云检测方案。Rossow（1989），Rossow et al.（1989）和Rossow and Garder（1993）等描述的云掩膜算法，利用了地球静止卫星平台上的窄可见光（ $0.6\ \mu\text{m}$ ）和红外窗口（ $11\ \mu\text{m}$ ）通道数据。该算法的前提是：（1）只有两种情况，即多云和晴朗，可以解释观测到的可见光和红外辐射；（2）辐射范围及其与这两种情况相关的变异不重叠（Rossow and Garder 1993）。因此，该算法基于阈值；只有当至少一个辐射值与推断的阈值之间的差异大于该阈值的不确定性时，才将像素分类为云。

美国国家海洋和大气管理局极轨业务化环境卫星（POES）上的先进甚高分辨率辐射仪（AVHRR）于1978年开始进行观测，从那时起提供了具有一致光谱和空间特征的数据记录。AVHRR处理方案（APOLLO）云检测算法使用了AVHRR的5个可见光和红外通道数据（Saunders and Kriebel 1988; Kriebel et al. 1989）。该方案使用了全空间分辨率下应用于

AVHRR通道的阈值，通常在星下点为 $1.1\ \text{km}$ 。瑞典水文气象研究所（SMHI）于1988年建立并实施的SCANDIA（使用AVHRR数据的SMHI云分析模型）数据集是首个区域AVHRR云气候学项目之一（Karlsson 1989）。斯堪的纳维亚地区的空间分辨率为 $4\ \text{km}$ 。探路者大气项目（PATMOS）数据提供了空间分辨率为 1° （ $110\ \text{km}$ ）的升轨和降轨全球数据，仅包括下午星的AVHRR传感器（NOAA-7、9、11、14）。

作为一个具有长期影响的开创性项目，PATMOS将总云量作为其唯一产品。来自AVHRR的PATMOS云（CLAVR）使用一系列光谱和空间变异性测试来探测云。第一阶段的CLAVR算法使用AVHRR的所有5个通道来反演全球云数据（Stowe et al. 1991）。它检查多光谱信息、通道差异和空间差异，然后使用一系列连续决策树方法。在 $2^\circ \times 2^\circ$ 全球区域覆盖（GAC）像素（ $4\ \text{km}$ 分辨率）下，确定无云、混合（亚像素云）和多云区域。CLAVR的后继版本使用了根据NOAA卫星前9天重复周期的晴空辐射统计数据观测到的角模型预测的动态阈值。这些云算法在20世纪90年代发展起来，在气候学研究中使用了10年。

作为PATMOS的延伸，探路者大气扩展（PATMOS-x）项目于2004年启动（Heidinger et al. 2014）。它包括了所有的AVHRR传感器，包括NOAA和欧洲气象卫星组织（EUMETSAT）的早晨和中午轨道卫星上的传感器。此外，它还扩展了产品列表，包括云类型、高度、光学厚度、水路径、颗粒尺寸、反照率和透射率，并包括校准的AVHRR观测。PATMOS-x还以 0.1° 的初始分辨率生成了全球数据，这是通过采样而不是平均来完成的。因此，PATMOS-x可以作为其他衍生云记录的基础。例如，PATMOS-x数据集已应用于气溶胶/云相互作用的研究（Rausch et al. 2010; Bennartz et al. 2011）、沙尘输送的气候影响（Evan et al. 2009）、全球（Norris and Evan, 2015; Marvel et al. 2015）和区域云研究（Ackerman et al. 2013; Rausch et al. 2010）。近年来出现了其他几种AVHRR云数据集，包括欧洲气象卫星组织气候监测卫星应用设施（CM-SAF）和欧空局（ESA）云气候倡议（CCI）数据集。这些活动确保了AVHRR数据记录在未来的许多年内保持关联。

c 云顶高度

科学家利用卫星的多光谱观测来推断云顶高度。例如，20世纪70年代开发的二氧化碳切片技术使用波长在 $13.3\sim 14.2\ \mu\text{m}$ 测量的窄带辐射来反演云顶压力和有效云量（Chahine 1974; Smith et al. 1974）。高分辨

率红外辐射探测仪 (HIRS) 多光谱观测使用二氧化碳切片法来区分透射云、不透明云和晴空 (Wylie et al. 1994)。该技术也已应用于GOES VISSR大气探测器 (VISSR/VAS) (Wylie and Menzel 1989)。利用这种方法, 科学家可以研究云顶高度的日变化特征。

由于MODIS具有用在HIRS研究中的关键二氧化碳切片通道, 因此它可以提供相对于HIRS (20 km) 更高的空间分辨率 (1 km) 产品。由于午后深对流, 来自MODIS Aqua的冰云的云顶压力比相应的MODIS Terra (云顶压力降低100 hPa) 在陆地上显示出更高的云层 (King et al. 2013)。

立体观测法也是探测云顶高的有效方法之一。在这种情况下, 云高度的确定仅取决于几何结构, 前提是假设云不移动。Minzner et al. (1976) 和Hasler (1981) 描述了如何利用两个不同的地球静止卫星的观测值来估算云高。为了获得全局测量结果, 采用多角度成像光谱辐射计 (MISR) 利用立体观测法收集云顶数据, 该仪器使用九个固定角度的相机, 一个观测最低点 (垂直向下) 方向, 四个分别观测沿航天器地面轨道向前和向后的方向, 具体是在26.1°、45.6°、60.0°和70.5°对地球成像。它的数据经过仔细校准, 以提供反射阳光的亮度、对比度和颜色的精确测量。

d 云光学和微物理特性

云光学和微物理性质的被动反演从确定热力学相变开始。利用CALIOP观测到的去极化后向散射, 科学家可以直接推测云顶附近云中的水相 (Hu et al. 2009), 它被用作被动成像算法的参考标准 (如Marchant et al. 2016)。在CALIPSO发射器被指向星下点附近的第一年, 从水平方向的冰晶中产生比预期更多的镜面反射。为了减少这种镜面反射, 在2007年11月, CALIOP的视角从0.3°改为3°。

光学性质 (光学厚度、有效粒径) 反演从使用可见光、近红外、短波/中波红外太阳反射测量的各种组合的机载研究开始 (Twomey and Cocks 1989; Nakajima and King 1990; Rawlins and Foot 1990)。首次定量卫星反演是针对AVHRR数据 (Arking and Childs 1985; Han et al. 1994; Platnick and Twomey 1994)。随着诸如MODIS等成像仪的可用性, 以及其改进的辐射稳定性和轨道平均局部时间交叉控制, 被动光学反演进入了一个新的时代 (即MODIS标准产品 (King et al. 2003; Platnick et al. 2003, 2017) 和为CERES而开发的产品 (Minnis et al. 2011a,b))。

e 云水路径

云水路径是单位面积上空大气垂直柱中所有云层的水 (液体和/或冰) 质量的总和。云水路径和含量 (单位体积质量) 变化很大, 取决于云的类型。海洋上空云的液态水路径 (LWP) 的最长记录来自使用19和37 GHz测量的被动微波估算。这些频率下的吸收状况与沿路径的液态水总量有关, 其中包括氧气和水蒸气的吸收以及海洋表面温度和粗糙度 (Wentz 1997; Greenwald et al. 1993; Liu and Curry 1993)。由于相对均匀的表面发射率, 这些方法在海洋上是最好的。利用特殊的微波成像仪传感器 (SSM/I)、双极化通道 (19.35、37和85.5 GHz) 的被动微波辐射计和垂直极化通道 (22.235 GHz) 的被动微波辐射计, 估算了海洋上空降水云和非降水云中的LWP。自1987年以来, SSM/I已被搭载在DMSP卫星上。

f 降水

降水是水文循环的重要组成部分。降水具有较大的时空变化, 在天气预报、山洪暴发预报、潜热能量释放等方面具有重要意义。传统上, 用雨量计测量降雨量, 并在特定位置进行观测。雷达观测提供了更好的区域平均值, 但这两种方法都缺乏全球覆盖。

卫星观测的早期应用试图通过使用极轨图像中的云量和云类型来确定降水量, 特别是24 h降水量。多种可见/红外雨水反演算法 (Scofield and Oliver 1977; Griffith et al. 1978; Adler and Negri 1988) 根据降水类型提供了不同的技巧。地球静止卫星提供的高时间分辨率测量可用于确定风暴的生命周期, 但它们的可见光和红外测量不能直接观测降水, 这限制了它们的应用。此外, 这些方法还存在随机偏差, 这些偏差与主要源自云顶附近的红外辐射及来自云系底部的降水之间的间接关系有关。

科学家开发了从红外和微波卫星观测中获得降水信息的算法, 并将其应用于全球 (如Barrett and Martin 1981; Arkin and Ardanuy 1989)。全球降水气候学项目 (GPCP) 始于1986年, 部分原因是为了更好地了解降水格局, 因为它们在区域、季节和年际上都有所不同 (Xie and Arkin 1997)。GPCP使用雨量计数据和卫星图像 (红外和微波) 来填补在海洋和人口稀少地区的空白。这些早期降水数据集对于描述和研究全球大尺度降水的年变化和年际变化至关重要。

在微波方法中, 云滴的吸收很小, 典型的非降水云团的透过率大于0.9。当雨滴大小的粒子与微波辐射发生强烈的相互作用时, 云滴的散射可以忽略。因此, 除非下雨, 否则云在微波中几乎是透明的, 这是

微波探测降水的基础。根据1978年首次发射的国防气象卫星计划 (DMSP) 上的SSM/I微波测量, 对降雨量进行了估算。在足够低的频率 (< 20 GHz) 下, 冰粒子散射可以忽略不计, 且亮温的变化是由雨滴光学深度的变化引起的, 该变化与总雨水量近似成比例。由于总降水量与地表降水量密切相关, 低频微波亮温提供了降雨速率的相对直接表示。这种方法适用于海洋, 在海洋上, 海面温度和海表比辐射率一般不会发生显著变化。通过将卫星观测与辐射传输模型计算相匹配, 得到了亮温与降雨速率之间的关系, 辐射传输模型计算确定了大气温湿度分布、云水含量、降雨层厚度和雨滴的尺寸分布。然而, 由于地表发射率较高、变化更大, 这种方法不能在陆地上应用。

高于80 GHz的频率主要用于基于散射的降水算法。对于高频微波 (>80 GHz), 高空冰粒子散射是雨云观测的主要标志。与发射信号相比, 散射信号在物理上与降水的直接关系较小, 因为它指示冰层以上的冰量。

g 热带降雨测量任务 (TRMM)

热带降雨测量任务 (TRMM) (Kummerow et al. 2000) 于1997年底启动, 2015年结束。这是NASA和日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 的联合项目, 首次使用主动和被动微波仪器来估算降水量。低倾角轨道 (35°) 使TRMM成为全球研究热带地区降水和相关风暴和气候过程的首要项目。

TRMM降水雷达 (PR) 提供了观测降水及其垂直分布的最直接方法, 从而实现了降水的三维视图。TRMM PR是天线为128单元开槽式波导阵列的主动相控阵系统, 工作频率为13.8 GHz。它的条带宽度为215 km, 横向空间分辨率约为4.3 km。PR的设计目的是实现0.7 mm/h的最小可探测降水率。

作为一个以热带降水气候学为中心的实验任务, TRMM发展成为一个可用于分析从3 h到年际尺度降水特征的卫星。TRMM具有独特的传感器套件, 包括PR、微波成像仪 (TMI)、可见光和红外扫描仪 (VIRS)、闪电成像仪 (LIS) 和CERES扫描辐射计 (Kummerow et al. 1998)。这种传感器的组合使TRMM观测结果能够产生当时最佳的瞬时降水量估计值; 然后, 这些估计值被用来校准或调整其他卫星的降雨量估计值, 以提供比单个卫星更高的时间分辨率的分析。TRMM多卫星降水分析 (TMPA, Huffman et al. 2007) 提供了多颗卫星的校准降水量估计值, 并在可行的情况下, 以精细尺度 (0.25°×0.25°和3 h) 进行了降水分析。降水产品被用于各种研究, 包括验证气

象再分析、水文建模、分析海洋降水系统、表征季风对流和水资源收支, 以及其他水文气象应用。TMPA也广泛应用于NASA与洪水、滑坡、农业、保险和疾病相关的应用活动中。

在超过17年的时间里, TRMM科学团队进行了极具创新的降水科学研究, 开发了具有广泛意义的有益于社会的应用。以下是TRMM最重要成就的详细总结。

- 准确的降水气候学。TRMM数据提供了热带地区降雨的基础气候学, 大大减少了先前天基降雨估计的不确定性范围 (Adler et al. 2009)。TRMM对降雨时间变化的观测, 从日尺度到年际尺度, 揭示了与Madden-Julian振荡和ENSO相关的重要变化 (如L'Ecuyer et al. 2006; Arndt et al. 2010; Lau and Wu 2009; Waliser et al. 2009)。TRMM还提供了热带潜热加热的垂直分布估算图 (图3), 这是全球大气循环的关键驱动因素 (Olson et al. 2006; Tao et al. 2010)。此外, 人类对降雨的潜在影响与城市热岛、森林砍伐和气溶胶相关的过程有关 (Hand and Shepherd 2009)。TRMM气候学为全球气候模式提供了一个重要的基准, 包括准确的

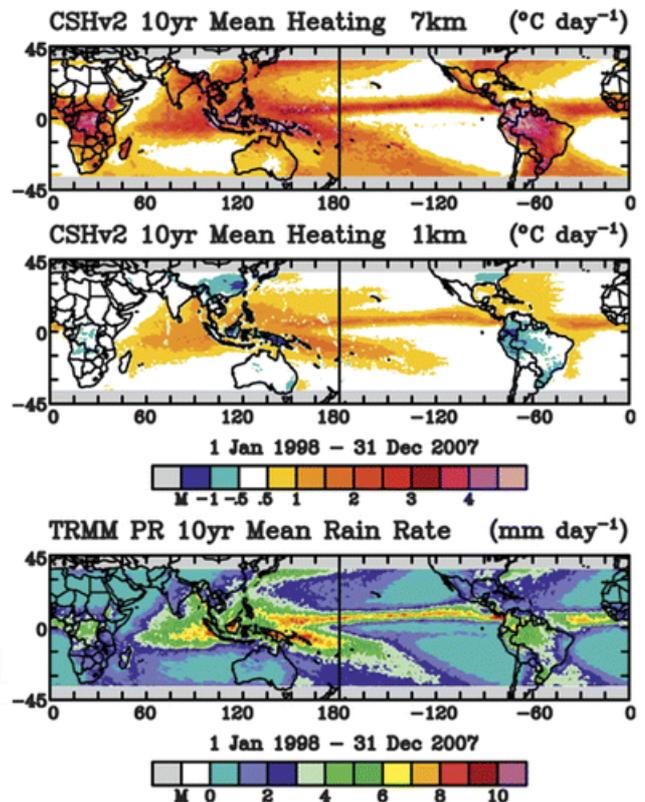


图3 十年 (1998-2007年) TRMM 平均潜热加热, (上) 在地面以上7 km处, (中) 1 km处, (下) TRMM 降水雷达平均降水率

对于辐射传输建模至关重要，以匹配DPR和GMI（所有频率）以及在野外作战期间获取的飞机数据（如Kuo et al. 2016; Olson et al. 2016）。

GPM-CO测量和IMERG高时空分辨率合并星座产品有助于提高对降水系统、水循环变率和淡水可用性的认识。Liu and Liu (2016), Battaglia et al. (2016b) 和Hamada and Takayabu (2016) 报告了风暴结构的改进特征，而Liu and Zipser (2015) 利用第一年的GPM-KuPR数据对地球上最大、最深和最强的降水系统进行了分类。同时，GPM继续揭示各种现象的多样性，这些现象对我们理解水循环至关重要。此外，Gong and Wu (2017) 利用来自垂直和水平通道的GMI微波极化信号发现，冻结粒子的散射在整个热带和中纬度急流区的对流层上部高度极化，表明这些粒子是水平方向的。

GPM和TRMM数据已用于进一步改善美国境内（如Wen et al. 2016; Kirstetter et al. 2015）和国际上（如Libertino et al. 2016）的定量降水估算。Tan et al. (2016) 比较了各仪器造成的IMERG误差源，发现最可靠的IMERG估计来自被动辐射计，这对水文研究应用这些产品很重要。Maggioni et al. (2014) 和Wright et al. (2017) 为卫星水文应用提供了精细分辨率降水产品的误差模型。另外，Lin et al. (2015) 利用WRF 4D 变分系统，通过同化6 h NCEP第四阶段数据，构建了一个降水降尺度动力框架。

i 改进气候模式的降水

GPM对云/降水微物理、对流/层状分离和大气中潜热释放的估计，可能会改善气候模式的参数化和初始化（Hagos et al. 2014; Tapiador et al. 2017）。例如，使用GPM数据，Adirosi et al. (2016) 比较了雨滴尺

寸分布与模拟的结果，Tao et al. (2013) 调查了降水的日结构，而Iguchi et al. (2014) 利用云解析模式研究了混合相降水中的融层结构，Colle et al. (2017) 分析了暖锋降水的结构和演变。结合其他卫星数据集，Hill et al. (2016) 使用GPM数据，确认了ECMWF再分析数据（ERA-Interim）和全球模式倾向于在一天中过早产生对流，从而影响潜热估计。

在成功完成其3年的在轨主要任务后，GPM任务目前正在延长执行。GPM-CO飞行器上的燃料，可以持续10年以上，这为进一步测量提供了重要的机会，以最大限度地发挥任务的科学和社会效益。GPM将生成一个一致、统一和长期的下一代降水记录，覆盖TRMM和GPM时代，并可能会延长到30年或更长的记录（取决于GPM-CO的运行情况）。

4 天气监测及预报

第一颗气象卫星只是简单地从太空拍摄地球的静态照片。20世纪60年代，NASA发射了第一批地球观测、极地轨道卫星：TIROS卫星。1960—1965年发射了10颗实验性的TIROS卫星，1966—1969年又发射了9颗业务型TIROS卫星。TIROS-1提供了地球的静态光学云格局的初步数据。1965年2月13日，第一张完整的全球云图是由450张TIROS-9号卫星拍摄的图像合成的（图5）。TIROS卫星被设计成实验性的——以证明科学家是否能从太空有效地研究地球的天气；它们的成功促使1978年发射了TIROS-N系列卫星。早期的TIROS-N卫星搭载了AVHRR传感器，提供对云、海洋、冰和雪的昼夜观测，也搭载了提供从地球表面到大气层最上层的温度和水汽信息的TIROS垂直探测器（TOVS）。

海洋上空大气的垂直综合水汽含量是通过光谱中



图5 基于TIROS卫星图像拼接的第一张完整的全球云图（根据1965年2月13日的TIROS-9卫星观测拼接而成）

微波部分的云来测量的 (Alishouse et al. 1990)。利用SSM/I辐射计测量数据,可有效地获取总可降水量(TPW),为气象预报提供依据。其他微波仪器也被设计用于类似的目的,如先进微波探测器(AMSU)和AMSRE。天气预报员使用TPW动画来支持对强降水的预测。从这些动画中,科学家们开发了变形集成微波图像(MIMIC),它混合了微波反演,为气象预报人员提供气象现象的可视化,如大气河流和热带风暴(Wimmers and Velden 2011)。气象预报员利用这些图像监测热带海洋的水汽,这些水汽在遇到陆地时会导致暴雨和洪水。

a Nimbus 卫星

Nimbus的7颗卫星在1964—1978年被送入太阳同步极轨道。作为美国第一个基于卫星遥感的研究项目,Nimbus为理解地球和气象学做出了许多贡献,包括来自Nimbus-1的全球云和大尺度天气系统图像。Nimbus-2(1966—1969年)携带了一个中分辨率红外辐射计,可以绘制出大气水汽和二氧化碳的分布。Nimbus-3于1969年发射,携带卫星红外光谱仪(SIRS)和红外干涉仪光谱仪(IRIS),用于测量地球大气系统的发射光谱。IRIS提供了对地球的第一个高光谱分辨率(5 cm^{-1})红外观测。Nimbus-4(1970—1980年)收集全球臭氧层的观测资料,而Nimbus-5(1972—1983年)用红外温度廓线辐射计(ITPR)和第一个微波探测装置(NEMS- the Nimbus E微波光谱仪)初步估计海洋上的降雨量。Nimbus-6(1975—1983年)及其近红外光谱仪(HIRS)使改进大气探测成为可能。Nimbus-7在1978—1994年间进行了8次收集数据试验。Nimbus7颗系列卫星对地球科学研究有很大的促进。

来自Nimbus-3的SIRS和IRIS的测量数据证明了获得大气温度廓线的能力。附近的几个波长位于混合气体的吸收带,如二氧化碳的 $15\ \mu\text{m}$ 带或 $5\ \mu\text{m}$ 的氧气吸收带,结合辐射传输方程可以用来反演与实测辐射一致的垂直温度分布(Chahine 1968; Smith 1968)。这项研究为许多后续卫星任务中使用的仪器打下了基础。

使用类似于反演大气温度的方法,从卫星测量数据中反演了水汽廓线。卫星对来自空气中的水汽测量可返回到Nimbus-7卫星的平流层邻边红外监测仪(LIMS)、以及平流层和中间层大气温度探测仪(SAMS)。这些仪器在 $6\ \mu\text{m}$ 红外光谱区探测大气中的热发射。卫星上测量红外能量的仪器被用来观测对流层和平流层的水汽。

b 地球静止卫星

由于早期实验传感器的成功,科学家们很快意识到从地球静止平台观测云对天气预报的重要性。这一轨道使得在相同的近似位置连续监测天气成为可能。从地球静止角度进行的常规成像迅速从概念过渡到经验阶段和业务阶段,并取得了巨大的进展;实验阶段开始于1960年代中期,而业务化阶段开始于1970年代中期,并一直持续到今天。地球静止轨道上的卫星,定期监测诸如云、对流、飓风、火灾、烟雾、地表温度、大气运动、积雪、雾和火山灰羽状物等现象。

Verner E. Suomi教授在1964年定义了地球同步卫星上“云相机”的概念(Lewis et al. 2018)。随着风暴和其他天气现象的发展,这种“风暴巡逻”将每10 min监测一次。1966年12月6日发射了一个实验传感器(ATIS-1卫星上的自旋扫描云量照相机—SSCC; Suomi and Parent 1968)。尽管来自SSCC的完整圆盘(或半球视图)图像“仅”每20 min一次,但地球的时间序列动画仍然是革命性的。由于图像在电磁频谱的可见部分,SSCC只在白天提供图像。这一缺点通过在1974年发射的同步气象卫星(SMS)的可见、红外自旋扫描辐射计(VISSR)上增加红外(IR)传感器而得到了解决。

第一颗业务运行的后续卫星是地球同步运行环境卫星-1(GOES-1),于1975年10月发射(Davis 2007)。作为GOES-A发射,在到达地球静止轨道后被指定为GOES-1。与SMS-1类似,GOES-1成像仪携带一个可见光和一个红外传感器,首次提供动态图像。云的实时监测是天气监测的一大进步,改变了短期天气预报(Benjamin et al. 2018)。地球同步卫星的卫星图像动画也极大地改变了预报员向公众传递天气信息的方式(Henson 2010)。GOES-2和GOES-3是GOES-1的复制,地球同步气象卫星的下一个进展是在1980年的GOES-4系列卫星上,采用了VISSR大气探测器(VAS)(Menzel and Purdom 1994)。虽然VAS是一个实验传感器,但它提供了晴空中大气温度和湿度的垂直廓线。从这些测量值可以估计大气稳定参数。VAS还提供了更精确的云属性,超过了单独使用成像仪得到的云属性。

地球同步卫星气象监测的又一个进展是随着GOES I-M系列开始的,GOES-I(即GOES-8)于1994年4月13日发射。最近的对地球监测的提升(Menzel and Purdom 1994)包括增加一个特殊波段和更精细的空间分辨率(例如,从 $7\sim 14\text{ km}$ 到 $4\sim 8\text{ km}$)。定标性能也得到了提高。GOES-8航天器是三轴稳定的,

与早期仪器的自旋扫描设计不同。由于采用了三轴设计，当航天器旋转时，这种结构使得朝向太空的时间更少，因此可以有更长的停留时间来收集地球图像。此外，GOES-8成像仪显示较少的条纹和较高的每像素比特数。到GOES-12及后续的卫星时，能以更精细的空间分辨率（从8 km到4 km）显示水汽带。在GOES-13、GOES-14和GOES-15上的航天器改进，允许在以前与数据中断相关的日食期间进行更多的常规成像。地球静止平台时代在对流、湍流、对流指数、总可降水量、火灾探测与监测等方面带来了诸多科学进展。来自大气红外和微波探测的数据同化改进了天气预报，并为先进的高光谱分辨率红外观测奠定了基础。

GOES-R系列卫星于2016年11月19日发射，GOES-16是四颗系列卫星中的第一颗，GOES-S（GOES-17）于2018年3月1日发射。GOES-R系列上搭载的先进基线成像仪（ABI）是一种最先进的16波段辐射计，其光谱波段覆盖电磁频谱的可见光、近红外和红外部分（图6）。与传统的GOES成像仪系

列相比，ABI具有更高的光谱、空间和时间分辨率（Schmit et al. 2017; Schmit et al. 2018; Goodman et al. 2018）。

其他国家也在寻求通过升级他们自己的传感器设计来实现类似的图像改善。例如，日本在2014年推出了先进的Himawari Imager（AHI）；在设计上类似于ABI，AHI有绿色通道（0.51 μm ），替代了ABI的1.38 μm 通道。其他先进的卫星成像仪也被计划用于第三代气象卫星（MTG）、韩国和中国等国家的地球同步气象卫星项目。这些地球同步成像仪与来自美国的成像仪组成了一个类似卫星仪器的全球星座，从地球同步的角度开创了先进地球监测的现代时代。与传统系统相比，这些现代观测有了数量级上的改进。

与传统的GOES成像系统相比，ABI和AHI具有更多的光谱波段、更高的空间分辨率和更好的覆盖率。其他改进领域包括信噪比（SNR）、噪声等效增量温度（NE Δ T）、每像素比特数、图像导航和配准以及在轨可视化校准。之前的GOES成像仪都没有包

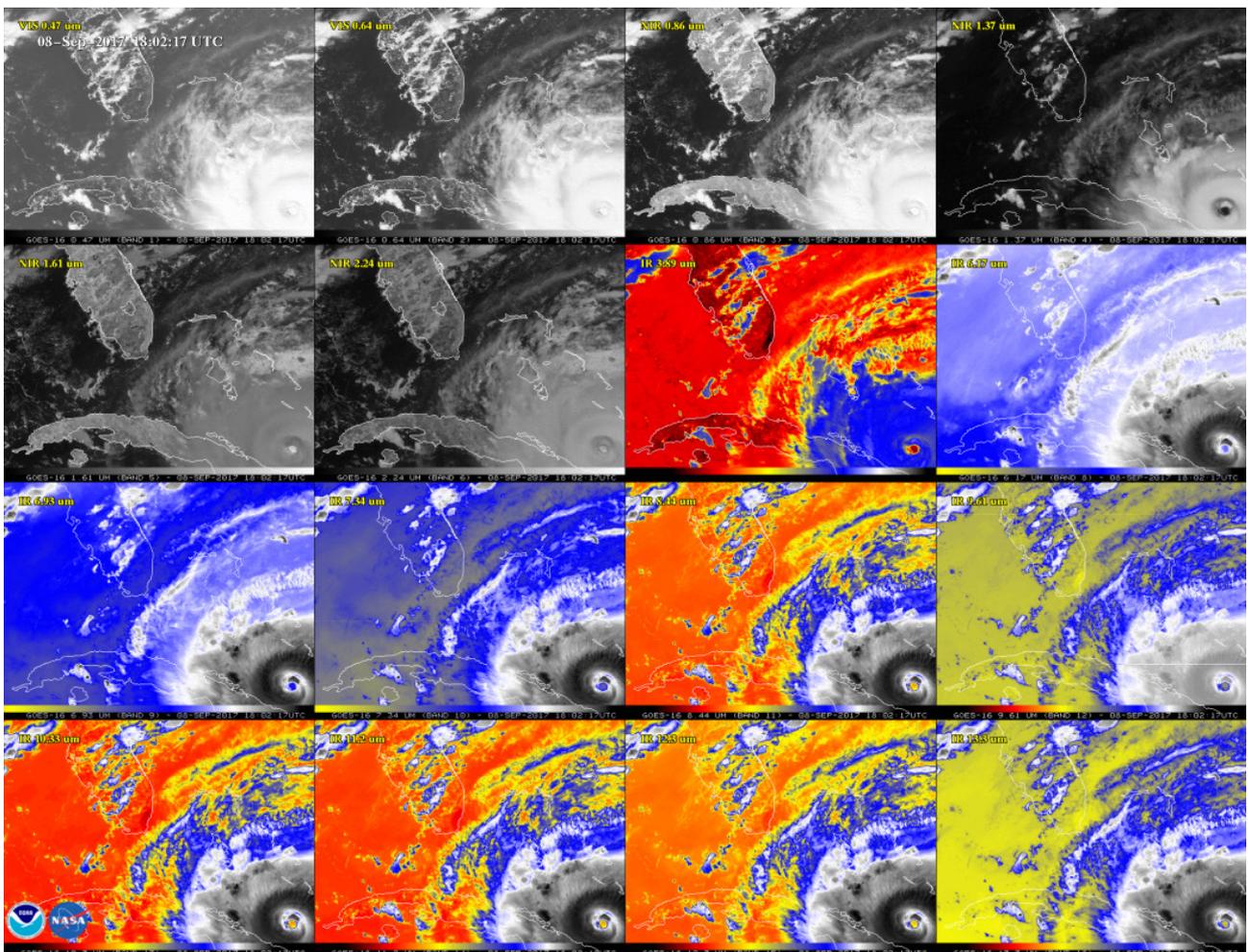


图6 2017年9月8日GOES-16的16通道先进基线成像仪（ABI）观测图像（2个可见光、4个近红外和10个红外通道）

含“蓝色”可见波段, 或对气溶胶敏感的波段, 而气溶胶敏感波段是构建自然彩色图像、气溶胶检测和表征的关键。最后一幅从地球静止角度拍摄的美国上空真彩色图像是1967年发射的ATS-3; ATS-3有三个可见波段, 以红、绿、蓝三种波长为中心, 而GOES-16之前的一代只有一个可见波段, 因此无法获得真实的彩色图像。ABI/AHI有16个谱带, 允许大量新的或改进的衍生定量产品。这包括, 但不限于: 气溶胶检测和光学深度和粒径、云属性、大气运动向量、稳定性指标、短波辐射、火灾特征、飓风强度、地表温度、海面温度、积雪、冰、总可降水、火山灰检测。

c 对流

随着卫星图像的出现, 科学家们很快开始评估和分析大气条件和风暴生命周期信息 (Houze 2018)。急流的轴线是依据极轨卫星观测到的云图估计出来的。所有类型的雷暴都可以通过卫星的时间图像来识别。Purdum (1976) 演示了如何使用卫星图像检测积云发展以及飢线信息。此外, 卫星图像上的外流边界分析表明, 它们可以与邻近的风暴相互作用, 从而增加两个风暴的强度。

正是卫星观测导致了中尺度对流复合体 (MCC) 的发现, MCC是一个由单个风暴组成的复合体, 覆盖了很大的面积 (10万 km²) (Maddox 1980)。与飢线一样, MCC寿命长, 可以持续6个多小时。MCC通常在下午早些时候和晚上开始形成, 在夜间和接近黎明时达到成熟阶段。卫星图像中, MCC作为雷暴的集群而出现, 大型风暴的出现伴随着寒冷的云顶温度 (<-40°C)。MCC常导致大部分的夏季降雨集中在美国中西部, 它们的大小、持续时间和结构可使用红外卫星图像识别 (Maddox 1980)。早期卫星数据有助于确定监测恶劣天气的位置。今天, 我们看到气象预报员正在使用卫星探测来获得中尺度对流前环境的三维特征 (Wheeler et al. 2018; Smith et al. 2018)。

d 热带风暴

卫星图像提供了一个监测飓风和热带风暴的关键机会, 特别是在传统测量方法无法获得的地区 (Emanuel 2018)。Dvorak技术 (Dvorak 1975, 1984) 是根据地球同步观测得到的红外图像, 来确定飓风和热带风暴强度。该技术将卫星红外和可见光图像与许多可能的模式类型相匹配, 从这些模式类型派生出“T数”和“急流强度 (CI) 数”。这些指标与飞机观测到的风暴强度相关联, 得到了被观测风暴的强度。在没有飞机侦察的情况下, Dvorak技术仍然是估计热带气旋 (TC) 强度的标准方法。作为该

方法的更新, 新版本的Dvorak技术 (ADT) 减轻了原Dvorak技术的局限性, 同时仍然是一种易于使用的TC强度计时指导工具 (Velden et al. 1998; Olander and Velden, 2007)。这些测量数据重新成为今天卫星飓风强度评估的核心。微波观测也被用来估计飓风强度 (Kidder et al. 1978; Velden and Smith 1983; Velden et al. 1984)。微波观测测量了可以反演风速的暖核的径向梯度 (Kidder et al. 1980; Demuth et al. 2004)。GOES-16和GOES-17更高的成像频率将有助于分析和识别中心位置。特别是, GOES 16/17将使识别和跟踪低云线中正在发展的系统的低层中心变得更加容易。

除了地球静止卫星数据, 来自近地轨道卫星的被动微波图像 (GPM、AMSR-2、SSM/I) 有助于定位热带气旋中心和监测热带气旋结构演化。卫星海洋表面矢量风 (ASCAT) 对热带气旋的发展、中心位置、强度和风场结构的监测也具有重要意义。虽然飓风路径预报的准确性自1990年以来有所提高, 但强度预报的准确性几乎没有提高。NASA的一项新任务, 气旋全球导航卫星系统 (CYGNSS) 使用8颗小卫星来精确测量海洋表面的风 (Ruf et al. 2013), 从而更好地估计风暴的强度。

e 大气运动矢量 (AMV)

通过跟踪一系列卫星图像中的云, 可以对风进行估计。科学家们用已知的时间差在连续的卫星图像中观测同一云团的位置, 并测量距离和方向的变化 (Hubert and Whitney 1971)。随着地球静止卫星时代的开始, 跟踪云的运动很快成为定义大气流动的一种方法 (Hubert and Whitney 1971)。GOES图像的时间分辨率使得跟踪云运动和云运动矢量 (CMV) 成为常规。观测到的CMV被用于数值天气预报 (NWP) 的初始化, 特别是在海洋上空。

f 湍流

航空湍流可分为两类: 云中的湍流和晴空湍流。卫星图像中的横向带状 (或“径向卷云”) 特征是雷暴生命周期中的一个常见特征 (Lenz et al. 2009)。在大区域范围内, 强大气湍流区域的特征通常是广泛的云层覆盖, 有时包括清晰的横向卷云带, 如在可见光或红外卫星图像中观察到的 (Ellrod 1985)。

当空气在稳定的大气层结中流过山脊时, 就会产生背风波 (Durran 1986)。由振荡的背风波所产生的强垂直运动可导致湍流。在山脉背风处形成的云几乎与扰乱气流的地形平行; 这些云的特征已经在卫星图像中观测到 (如Fritz 1965; Ernst 1976; Ellrod 1985)。在大气中缺乏足够的水分的情况下, 波云将

不会形成，尽管可能存在发展良好的背风波和湍流。 $6.7\ \mu\text{m}$ 水汽通道的卫星仪器被用来研究晴空湍流。

g 闪电

除了ABI外，GOES-R系列的每一个航天器都有一个地球静止轨道卫星闪电成像仪（GLM），这是地球静止轨道的一个新特性（Goodman et al. 2013）。该仪器可探测大部分闪电，在半球大部分地区具有几乎一致的8 km风暴尺度空间分辨率，产品更新频率小于20 s（Christian et al. 1989; Goodman et al. 2013）。GLM补充了ABI信息，用于快速更新和强对流天气的临近预报和短期预报（Goodman et al. 2013; Stano et al. 2014; Gravelle et al. 2016）。GLM将扩展最初由TRMM建立的西半球闪电和雷暴气候学（Cecil et al. 2012; Albrecht et al. 2016）。

h 降水

TRMM数据被业务预报中心（如Rappaport et al. 2009）和热带气旋研究人员大量使用，在热带气旋监测和分析中发挥了重要作用（如Blake and Pasch 2010; Kimberlain and Brennan 2011）。这些数据有助于建立热带气旋降水分布和变化的关键特征，并将其作为强度、发展阶段和环境条件的函数（如Lonfat et al. 2004, Chen et al. 2006）。海面温度（SST）和TRMM的降雨数据经常被利用来研究风暴发生和快速增强的机制（如Braun 2010; Vianna et al. 2010）。TRMM数据具有较高的空间分辨率，在对气旋形成具有重要意义的 10° — 37° 纬带内频繁采样，常用于探测热带气旋的位置和强度。

结合定量误差表征，将GPM受降水影响的辐射和瞬时降水速率同化到天气预报和数据同化系统中，以改进4D再分析。事实上，ECMWF正在业务中使用GPM-CO数据（Geer et al. 2017）。利用GMI等微波成像仪对多云、降水地区的卫星观测资料进行同化处理，对动力敏感地区的大气参数具有重要的约束作用，对气象预报精度有重要影响。Kim et al. (2017)描述了将GMI全天空（包括云层和降水）辐射数据集成到Goddard地球观测系统第5版（GEOS-5）的框架，该系统将成为NASA全球模式和同化办公室（GMAO）2018年运行预测系统的一部分。类似地，Zhang et al. (2017)为NASA统一天气研究预报（NU-WRF）模式开发了集成数据同化系统，该系统可以将高分辨率数值模式预报和GPM卫星数据的信息进行最佳集成。

i 大气探空

大气探空的主要目标是温度和湿度廓线，为气

象预报人员提供有关大气结构和状态的重要信息，如不稳定度、逆温、干燥空气层或高空冷空气。近一个世纪前，第一次测量廓线是用附在气球上的仪器，即无线电探空仪进行的。探空仪通过沿着气球路径的一系列点源来测量垂直大气。自此，无线电探空仪在实现和维持高质量预报方面变得不可或缺。然而，尽管每天都有数百次发射，但它们采样间隔长且集中在北半球陆地，使得大气层的大部分都没有被观测到。卫星提供了唯一的平台，能够始终如一地定期观测整个地球。

20世纪50年代，科学家们开始提出利用遥感测量大气气体浓度来推断温度结构。例如，King (1958)指出，几个切向观测角度的测量可以提供温度结构随高度变化的信息。Kaplan (1959)认为，大气廓线可以通过逆转辐射传输过程，在几个特定的光谱区间内进行测量来完成。在假设已知 CO_2 剖面的情况下，利用 CO_2 带的发射得到温度廓线，然后从热发射带的水汽中推断出水分浓度。每个波段的不同传输特性被用来从不同的光学深度获得温度信息。这种方法仍然是目前大多数温度探测仪的基础。常规大气温度探测始于1972—1979年运行的NOAA 2-5卫星上的垂直温度廓线辐射计（VTPR）。它们有6个温度探测红外通道，从 $13\sim 15\ \mu\text{m}$ ，加上 $18\ \mu\text{m}$ 的水汽通道，另一个通道是 $11\ \mu\text{m}$ 的大气窗口。

云的存在是卫星探测误差的主要来源，因为仪器视场中的不透明云阻碍了云下的透射率。从被动红外观测中完全消除云层的影响是困难的，但是有方法可以改善它们。例如，可同时进行红外和微波辐射测量（如Smith 1968），以便对破碎云场周围的晴空大气进行探测。微波辐射对非降水云的敏感度远低于红外观测。

微波探测仪（MSU）是一个四通道微波辐射计，覆盖了57 GHz的 O_2 带；在这些频率下，云具有高透明度，可以降低云对温度探测的影响。MSU和SSU最终被先进微波探测仪（AMSU）取代，这是一种设计用于温度和水汽探测的20通道微波辐射计。温度和湿度的准确观测对NWP至关重要。精确计算误差的方法允许NWP系统进行自定义和优化，从而产生可能的最佳预测。20世纪90年代，NCEP和ECMWF引入了卫星辐射的直接同化（Benjamin et al. 2018; Derber and Wu 1998）。全球预报模式同化了长波红外波段的辐射通道，因为这些通道具有良好的特性和稳定性（Eyre and Lorenc 1989; Benjamin et al. 2018）。这种方法对NWP产生了积极的影响（如McNally和Vesperini

1996)。

直接模拟更多的光谱通道, 如对水汽和臭氧吸收敏感的通道, 以及反演到的温度、混合比和痕量气体廓线, 仍然是重要的研究课题, 特别是随着计算能力和误差计算的不断提高(如Jones and Stensrud 2012)。目前正在努力从卫星观测同化中获得更多参数。Minnis et al. (2008b) 等的近实时反演得到的云属性, 在各种模式中都得到了同化, 包括业务模式和实验模式。例如, NOAA业务快速更新模式(Benjamin et al. 2016)通过对小时云顶压力和温度的同化, 改善了预报。Chen et al. (2015, 2016)对云水路径进行同化, 发现了WRF对温度、风、降水预报评分的提高。Jones et al. (2016)也将云水路径同化到高分辨率WRF, 用于强风暴预测。为了最大限度地地在NWP模式中利用卫星观测, 仍有许多工作要做, 因为只有一小部分可用的资料在业务上得到了利用。

最初的POES计划中, NOAA旨在维持在两个不同的极地与太阳同步轨道卫星: 一个在当地时间07:30向南穿越赤道(上午星)和一个在14:30向北跨越赤道(下午星)。这样对任意点的重复覆盖为每6小时。随着2006年Metop-A的发射, EUMETSAT接管了上午轨道(09:30向南穿越赤道)的任务。Metop-A是3颗系列卫星中的第一颗, 包括HIRS/4和AMSU仪器(基于连续性)以及用于温度探测的新仪器: 红外傅里叶变换光谱仪和GPS接收器。

NOAA-19(2009年发射)之后, 美国计划将NOAA和军用极地轨道气象卫星项目合并到国家极地轨道运行环境卫星系统(NPOESS)中。NPP(NPOESS预备项目)卫星于2011年10月发射, 后来更名为Suomi NPP。虽然NPOESS项目已被放弃, 但NOAA继续和NASA开发联合极地卫星系统(JPSS), 覆盖下午的极地轨道; 美国国防部开发国防气象卫星系(DWSS), 覆盖上午轨道。NPP和JPSS-1,2卫星包含两种新的温度探测仪器: 交叉轨道红外探测仪(CrIS), 一个红外傅里叶变换光谱仪、以及先进微波探测仪(ATMS, AMSU的改进版本)。

j 高光谱红外探测

早期探测仪的观测能力仅限于测量垂直大气的一层或两层, 但随着NWP系统的改进, 在一二层高度上的观测对预测的影响逐渐减小。卫星探测技术的发展, 有助于更好地解决这个问题。高光谱探测现在可以扫描电磁光谱的红外部分, 其中有数千个通道的光谱, 可以精细地分析热力学结构和化学成分, 从而继

续改进预测(Smith et al. 2009)。2002年, NASA的Aqua平台搭载了一对微波和高光谱红外探测器, 首次实现了真正的三维观测能力。这些仪器通过从地表到大气层顶的多个气压层的均匀采样来观测地球大气。这种三维观测能力已经成为NWP、实时天气预报和风暴分析的重要组成部分, 以至于15年后, 低地球轨道(LEO)的高光谱分辨率红外探测仪已经包括了Aqua上的大气红外探测仪(AIRS)、MetOp上的红外大气干涉仪(IASI)和计划在2040年进入近地轨道的CrIS(Glumb et al. 2002)。

微波观测可以在晴空和非降水云天气条件下进行探测, 而高光谱红外观测可以在晴空区域进行探测, 但垂直分辨率要高得多。Ferraro et al. (2005)阐述了微波探测对天气预报的重要性, 特别是对低层水分运输与降水的关系, 而大量研究表明高光谱分辨率红外探测器数据能够使全球数值天气预报改善到7天(Chahine et al. 2006; Le Marshall et al. 2006; Jones and Stensrud 2012)。这些仪器有助于在晴天和多云的条件下捕捉大气状态的全貌。

除了对NWP的改进之外, 这些精确校准的高光谱分辨率辐射探测还开创了一个气象应用的新时代, 使用的是探测的反演产品, 而不是原始辐射(如Smith 1991; Hilton et al. 2012; Weisz et al. 2015; Berndt et al. 2015, 2017; Berndt and Folmer 2018; Iturbide Sanchez et al. 2018; Smith et al. 2018; Wheeler et al. 2018)。美国国家气象局(NWS)的预报员需要独立的观测来实时验证NWP模式。一种NWP模式的改进可能会导致与另一种模式的不一致, 而卫星探测结果有助于预测人员确定哪种NWP模式在风暴系统演化过程中最能反映地面条件。

由于有成千上万的光谱通道, 从辐射测量中提取大气廓线的快速计算的方法需要在实际应用中应用。从辐射测量中反演廓线最常用的两种方法是线性回归(Weisz et al. 2007; Smith et al. 2012; Weisz et al. 2013)和最优估计(Rodgers, 2000)。2008年, NOAA采用NOAA独特联合大气处理系统(NUCAPS; Sun et al. 2017; Gambacorta and Barnet 2018; Nalli et al. 2018a, 2018b)业务化生产反演产品, 包括温度和水汽廓线、微量气体(O_3 , CO , CH_4 , SO_2 , HNO_3 , CO_2 和 N_2O)气柱浓度, 以及云和地表特性。

经过十几年的共同努力, NUCAPS最近在美国国家气象局高级天气交互处理系统(AWIPS-II)中得到应用。这使得预报员可以测试和评估NUCAPS产品并与传统产品的交互。因此, 新的应用正在出

现。NUCAPS探测将大气结构和组成的变化，描述为一定的特征和这些特征周围的大气状态（如温度和湿度梯度）。2016年NOAA厄尔尼诺快速响应（Dole et al. 2018）和2019年区域和全球火灾环境影响试验（FIREX）等外场项目评估了产品的准确性和适用性。

2016年12月，中国发射了下一代地球同步气象卫星FY-4-01，搭载地球同步干涉红外探测仪（GIIRS）。这种红外高光谱垂直探测仪具有1650个光谱通道，是第一个在地球静止轨道上飞行的星载干涉仪。EUMETSAT计划在2023年之前在地球静止轨道上安装一个高光谱探测仪，作为气象卫星第三代计划的一部分。

k GPS-RO (全球定位系统无线电掩星探测)

全球定位系统（GPS）网络提供高精度导航。GPS系统包括卫星信号和接收数据的支持站网络。这些GPS卫星信号被大气减慢，导致信号到达的时间比信号在空间传播的时间要晚。GPS卫星发出的无线电电信号在穿过大气层时发生折射，折射的量可以从其他卫星上测量得到。当一颗卫星相对于另一颗卫星固定或上升时，将测量折射角序列。这些测量可以转换成大气折射率的垂直剖面，从而得到具有高垂直分辨率的垂直温度探测（Ware et al. 1996; Kursinski et al. 1997, 2000; Kuo et al. 2004）。这通常被称为全球定位系统无线电掩星探测（GPS-RO）。

中国台湾—美国气象、电离层和气候卫星联合观测系统（COSMIC）于2006年4月实施，由6颗微型卫星组成。这些数据包括电离层的电子计数，以及天气、对流层和平流层的温度、湿度和压力的大气廓线的关键参数。GPS-RO探测对数值天气预报有积极的影响（Luntama et al. 2008; Cucurull 2010; Healy et al. 2005; Anthes 2011）。Feltz et al. (2014) 论证COSMIC GPS-RO网络具有空间覆盖、时间连续性和稳定性的特点，为微波与红外探测廓线产品的比较提供了共同参考。

5 大气成分（微量气体及气溶胶）

a 星下点后向散射紫外观测仪

星下点后向散射紫外观测仪测量地球在Hartley-Huggins臭氧吸收带（250~340 nm）内散射的太阳辐射。该观测始于1970年4月，当时在Nimbus-4卫星上搭载了后向散射紫外光谱仪（BUV）。从那时起，十多个这样的仪器在NASA、NOAA和国际卫星平台上运行。近年来的仪器具有更高的光谱分辨率和较宽的波长范围来测量边界层中的痕量气体，如SO₂、

HCHO和NO₂。

Dave and Mateer (1967) 首先确定，从星下点紫外线测量值估算臭氧柱在理论上是可能的。随后，Mateer et al. (1971) 应用该方法从Nimbus 4 BUV中反演了第一个臭氧柱和廓线数据。BUV的改进版本，太阳后向散射紫外辐射计（SBUV），连同臭氧总量测绘光谱仪（TOMS）一起在Nimbus-7卫星上发射。基于同样的测量原理，TOMS被设计用来提供每日全球臭氧总量图。

该TOMS仪器及其后续设备在监测极地臭氧消耗方面发挥了关键作用。臭氧洞是南极洲哈雷湾的一台地面仪器（Dobson光谱仪）在1985年首次在臭氧柱数据中发现的。它验证了人类活动对地球大气的全球性有害影响。南极臭氧洞的第一张卫星图像（图7）是由1978年发射的“Nimbus 7” TOMS拍摄的，并在1985年的一次研讨会上发表（Bhartia et al. 1985）。结果表明，臭氧洞是一种大陆尺度的现象。Nimbus 7 SBUV的数据进一步表明，大气臭氧损耗发生在平流层下部，具有很强的季节性循环特征（Bhartia et al. 1985）。TOMS和SBUV的数据记录了臭氧洞的开始，而早期的Nimbus 4 BUV已经建立了一个基线。

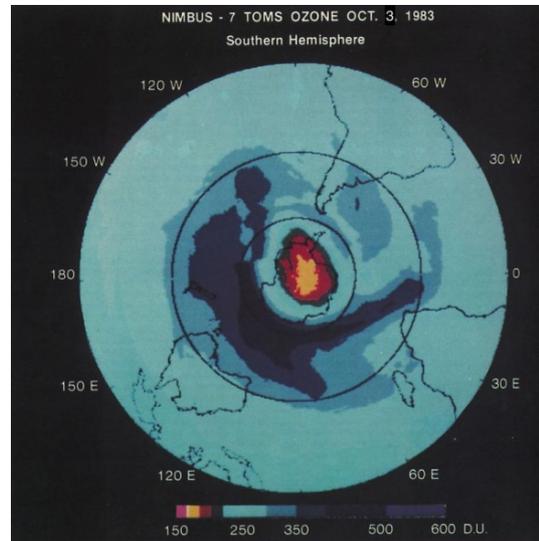


图7 来自 TOMS 数据的高极洲上空臭氧洞的第一张图像 (Bhartia et al. (1985) 首次展示, Callis and Natarajan (1986) 首次发表)

b 平流层气溶胶和气体试验 (SAGE)

平流层气溶胶测量（SAM）和平流层气溶胶与气体试验（SAGE）提高了我们对平流层气溶胶特性的认识。SAM II是一个单一波长（1 μm）太阳光度计，搭载在Nimbus-7卫星上。SAGE-I（1979年2月18日发射）利用太阳光在4个光谱区域的衰减，得到了1000和450 nm波长气溶胶消光的高度廓线，以及臭氧和二

氧化氮浓度的剖面。Nimbus 7和SAGE-I这两个卫星系统开始记录高层大气的微粒，提供了高层大气1 km层气溶胶的纬向、纵向和时间变化。

SAGE-II在1984年10月启动，作为ERBS计划的一部分（McCormick 1987; Poole and McCormick 1990），对大气层进行垂直扫描。SAGE I和SAGE II的观测表明，在两个半球高纬度地区的平流层上层臭氧减少（McCormick et al. 1992）。此外，在皮纳图博火山爆发后的几个月里，SAGE II的测量监测了火山气溶胶在整个热带平流层和中高纬度地区的运输情况（McCormick and Veiga, 1992）。气溶胶浓度的增加导致皮纳图博火山附近的平流层升温2.5~3℃。SAGE II的测量结果也有助于发现火山气溶胶破坏二氧化氮。总的来说，10年来SAGE II对水汽的高分辨率测量使我们对平流层的化学和运动有了更好的了解。

SAGE-III是一种光栅光谱仪，测量紫外和可见光，其光谱覆盖范围从280~1040 nm，光谱分辨率约为1.2 nm。它还包括一个1550 nm的通道，用于区分气溶胶和云，以及测量更大的气溶胶。SAGE III搭载在俄罗斯2001年发射的一颗名为“Meteor-3M”的卫星上，历时5年。自2017年初以来，第二个SAGE III已经在国际空间站（ISS）上，并继续保持着SAGE数据记录。

c 红外临边热传感器

红外临边热传感器以比星下点紫外观测仪更高的垂直分辨率测量臭氧和许多其他微量气体。Nimbus-7卫星上的平流层红外邻边传感器（LIMS）是第一个这样的仪器；不幸的是，它只持续了6个月，因为它的探测器是用固体致冷剂冷却的。

随着1991年UARS任务在航天飞机上的启动，临边热传感器测量取得了重大进展。它的目的是研究高层大气的物理和化学过程，以更好地了解大气光化学和传输（Reber 1993; Dessler et al. 1998）。该任务是第一颗收集大气中关键化学物质长期数据记录的卫星，并证明了平流层中的氟氯烃是人类制造的。此外，它还建立了臭氧耗损的三维分布与活性氯之间的直接相关性。UARS MLS观测有助于证明水汽进入平流层与对流层热带对流和对流层上层温度有关。

菲律宾皮纳图博火山刚好在发射UARS之前喷发，向热带平流层喷射了大量硫酸气溶胶。UARS的观测被用来跟踪气溶胶云，并在随后一年监测这些气溶胶在全球平流层的传输。大部分由UARS开始的平流层微量气体的关键测量，随着2004年7月在Aura卫星上发射了改进的MLS仪器而继续进行。MLS测量地球大气边缘的微波热发射，以估计大气气体、温度、

压力和云冰的垂直分布。MLS测量臭氧和许多影响臭氧的化学物质的垂直分布。

MLS观测结果为全球空气质量研究提供了信息，特别是在监测对流层上层受污染空气的全球运输方面发挥着重要作用。MLS测量的N₂O和CO（所谓的污染运输的“示踪剂”）以及位势高度，提供了关于大气运输的信息，有助于将大气运动的影响与化学破坏分开，而火山SO₂的测量则有助于诊断火山对臭氧层的影响。云冰以及较低高度上的H₂O的观测提供了下部空气进入平流层过程的信息。

d 对流层微量气体

TOMS是第一个从太空测量对流层臭氧的卫星仪器，它采用了云切片技术（Ziemke et al. 1998）。然而，该技术在热带地区效果最好，且只提供对流层气柱臭氧（TCO）数据。自2005年以来，通过结合Aura MLS平流层臭氧和Aura OMI总气柱臭氧，对TCO的全球估计已经成为可能（Ziemke et al. 2006）。这些测量结果表明，对流层低层的TCO值虽小，但显著增加。ESA的ERS-2卫星全球臭氧监测试验（GOME），于1995年推出，在较大的光谱范围（240~790 nm）内以足够高的光谱分辨率（0.2~0.4 nm）测量紫外和可见光，以反演平流层和对流层的二氧化氮、甲醛（HCHO）、臭氧和一氧化溴（BrO）等微量气体（Burrows et al. 1999）。尽管GOME的空间分辨率很粗（40 km×320 km），但首次捕捉到了亚洲、北美和欧洲工业区上空二氧化氮水平的升高，以及洛杉矶等大城市附近明显的“热点”。虽然GOME的数据是大气柱，但对某些气体来说，柱的对流层部分可以从平流层部分分离出来，从而可以估计排放和表面浓度。目前无法从大气柱中推断出近地表臭氧水平；然而，GOME反演的NO₂和HCHO可作为地表臭氧形成过程中两种重要成分（NO_x和VOCs）的指示变量（如Martin et al. 2004）。

e 气溶胶

在20世纪60—70年代，早期的气象卫星产生了带有“异常灰色阴影”的可见图像，这些图像有时与灰尘和人为烟雾有关（如Fett and Isaacs 1979）。AVHRR 0.63μm的观测数据证实了沙尘的海洋运输（Prospero et al. 1970）。然而，较差的辐射定标和较少的光谱波段限制了数据在气溶胶研究中的定量应用。从AVHRR反射率测量得到的气溶胶反演分析，揭示了全球范围内主要灰尘、烟雾和污染气溶胶流的季节格局。Husar et al.（1997）分析了1989年7月—1991年6月的AVHRR数据，证明冬季草原燃烧峰

值期在撒哈拉以西的大西洋上空形成了烟柱。夏天，来自北非的灰尘和来自中非的烟雾在邻近的水面上形成了羽状的烟柱，而来自中东的灰尘则吞没了阿拉伯海。此外，美国东海岸以外的污染源在夏季比一年中的其他时候更为突出。MODIS的观测结果使得气溶胶光学厚度（AOD）反演具有较高的辐射定标精度和稳定性（Hsu et al. 2012）。MODIS气溶胶数据已与实地观测结果进行了比较，结果表明，MODIS气溶胶数据适用于在局地、区域和全球尺度上监测空气质量事件（Chu et al. 2003; Wang and Christopher 2003; Engel-Cox et al. 2004）。Zhao et al. (2017) 利用MODIS和MISR的观测资料，研究了2001—2015年美国东部、西欧、中国东部和中部三个人口稠密地区气溶胶的十年尺度趋势。在所有这些地区，AOD趋势的幅度在夏季远远大于冬季。研究探讨了AOD趋势与大气污染物排放变化的关系。除矿物粉尘和NH₃外，各主要污染物的年平均AOD值均随着排放的减少而降低。

6 社会效益

卫星观测对天气研究和建立实用的环境预报至关重要。数值天气预报的技巧对初始化观测值的准确性和分布很敏感。卫星观测填补了传统气象观测系统的巨大空白，改善了气象预报，造福社会。自1969年4月世界上第一台卫星观测仪SIRS-A发射以来，卫星观测一直在显示其价值。从那时起，预测精度一直在提高。多光谱图像，特别是在时间序列上的多光谱图像，对世界各国的国家气象服务机构提高其形势感知能力至关重要，尤其是在面临即将到来的恶劣天气时。

例如，GPM数据为最终用户提供了关键信息，帮助他们改善对地球水循环的了解，并促进决策（Kirschbaum et al. 2017）。下面列出的一些GPM应用的例子：

- GPM数据正在集成到多个机构、多国饥荒预警系统网络（FEWS NET; <https://www.fews.net/>）。
- GPM在促进粮食-水-能源方面发挥了重要作用（Shepherd et al. 2016）。
- 海军研究实验室（NRL）自动热带气旋预报系统（<https://www.nrlmry.navy.mil/TC.html>）将GMI数据在不到1 h的时间尺度内集成到其系统中，以改进热带气旋位置的修正。
- 导致洪水或滑坡事件的极端降水，是GPM应用的领域之一，例如，NRT全球洪水监测系统（Wu et al. 2014），区域和全球滑坡灾害评估模型。NASA土地信息系统（LIS）提供了土壤水分的短期预测，以更好地理解天到年尺度上的陆地-大气

相互作用（Kumar et al. 2006）。

航空业是卫星为社会提供效益的另一个主要领域——无论是在效率方面，还是更重要的安全方面（Mecikalski et al. 2007）。风力预报有助于节省燃料，同时识别雾和湍流，有助于保护生命和飞机。Smith et al. (2012) 和Yost et al. (2018) 详细介绍了使用近实时云特性分析，分别提供机身和发动机积冰的短时预报。白天可见的图像可以用来识别雾。

“大雾”产生的温差主要取决于辐射表面不同物理特性引起的发射率差异。火山灰预警是卫星观测支持航空公司和社会需求的另一个例子。火山喷发会将火山灰喷射到商用飞机飞行的高度。不同红外通道之间的光谱差异用于识别羽流（Pavolonis et al. 2013）。EUMETSAT将该算法应用于地球静止轨道上的第二代气象卫星上搭载的自旋增强可见光与红外成像仪（SEVIRI），对2010年冰岛Eyjafjallajökull喷发的火山灰羽流进行了探测和跟踪。伦敦火山灰咨询中心（VAAC）使用了火山灰云位置的信息。改道、延误和航班取消可能会让人沮丧，但对乘客的安全却是必要的。

此外，还有实时预报的冷空气（ $< -65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），可以帮助飞行员改变航线，避免飞机燃料冻结。在过去，当高空温度低于 $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，就会形成冰晶。阿拉斯加的天气预报员使用NUCAPS的温度反演数据，向航空业发布气象影响报告。

7 范式的变化

a 星座在空间和时间上的协同

时间和空间尺度上不同观测的相互协同日益成为一项优先事项。随着科学从专业学科发展到更广泛的跨学科问题，跨越一系列尺度将物理、化学和动态过程联系起来变得至关重要。实际上，这种科学要求意味着一颗卫星将无法提供所有有关的地球物理参数。不幸的是，大型多仪器和多用途卫星可能会导致成本和计划上的困难。另一种流行的选择是发射一组较小的卫星，每个卫星都有自己的一套观测资料，作为协同轨道星座的一部分。NASA和几个国际合作伙伴，共同开发了下午星座（A-Train，这些卫星一起飞行，因此得名），该星座卫星被放置在太阳同步的极地轨道，在当地时间13:30左右以上升（北行）轨道穿越赤道（Stephens et al. 2002; L'Ecuyer and Jiang 2010）。

最初的两颗A-Train卫星是NASA地球观测系统（EOS）的旗舰级Aqua（2002）和Aura（2004）平台，这两颗卫星都由多个主要用于研究水-能量

循环和大气化学的仪器组成。Aqua搭载了来自日本（JAXA）和巴西（INPE）的仪器，Aura搭载了荷兰的仪器。法国国家空间研究中心（CNES）的PARASOL项目于2004年加入了A-Train的行列，使用一架成像孔径仪研究气溶胶和云层。随着2006年NASA地球系统科学探路者（ESSP）计划的CloudSat（云雷达）和NASA-CNES CALIPSO（气溶胶-云激光雷达和红外成像仪）任务的联合发射，星座达到了成熟。

A-Train卫星在几分钟内或更短的时间内相互飞行（图9），这使得仪器观测条件的显著变化最小化。而且，不需要精确的飞行协调。NASA管理的A-Train是通过为每个卫星分配空间“控制箱”来实现的，这些控制箱的边界通常相隔不到一分钟的飞行时间。在控制箱内，卫星可以根据需要自由机动。只有CloudSat和CALIPSO需要紧密协调，以确保主动传感器同步地面观测。

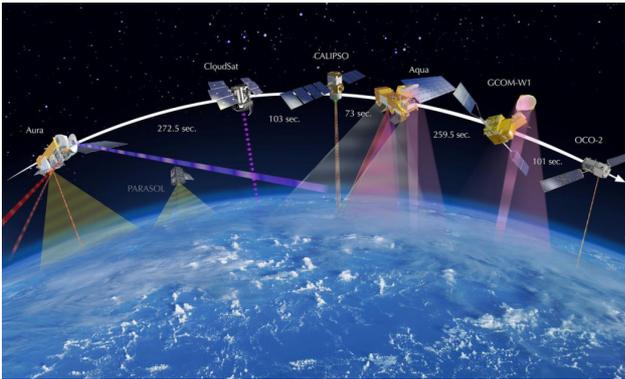


图9 截至2017年，国际下午星座卫星（A-Train）的平均时间间隔。不同传感器的观测几何图形由半透明的颜色组成，表示不同部分的电磁波谱。其中，PARASOL卫星在2009年退出了该星座

最近的一项进展是使用低成本的SmallSat解决方案进行地球观测。NASA CYGNSS任务，作为第一个地球风险任务在2016年发射，是一个小卫星星座的例子。CYGNSS由8颗小卫星（最大尺寸约60 cm）组成，它们之间的距离很近，利用海洋反射的GPS信号来推断包括热带气旋在内的所有降水条件下的海洋表面风速。CYGNSS利用了海洋散射测量的悠久历史，包括QuikSCAT（1999）和ISS-RapidScat（2014）。总的来说，8颗卫星组成的星座提供每秒32次同步风力测量。

b 非协同星座

在更广泛的背景下，星座飞行也可以用来描述观测的非时间协同作用。由于在全球范围内获取有用的降水统计数据所固有的采样挑战，分布式卫星系统对降水研究特别有用。正如本文所描述的，国

际GPM任务由10个星座组成。这些合作伙伴共同实现了高采样频率的被动微波观测。另一个分配星座的例子是长期存在的国际气象和空间气象卫星观测协调工作。这包括运行中的太阳同步极轨卫星（包括Suomi-NPP以及新的JPSS系列、DMSP、MetOp、Meteor、FY，提供上午或下午的联合覆盖）和地球同步卫星（目前GOES、Meteosat、Himawari、COMS、INSAT、FY）。技术进步通常是通过使用通用传感器来协调的。例如，最新一代的地球同步卫星现在在GOES-16、GOES-17和未来GOES-R系列卫星上搭载ABI，类似的还有搭载于Himawari-8+的先进Himawari成像仪（AHI），搭载于GEO-KOMPSAT-2A的先进气象成像仪（AMI）（计划于2018年发射）。大气化学和空气质量研究也受益于协同地球同步观测。NASA TEMPO、KARI（韩国航空航天研究所）GEO-KOMPSAT-2B和ESA Sentinel-4将开创一个用于研究气溶胶和微量气体排放及过程的全球地球同步星座。这将为亚洲、北美和欧洲之间的空气质量和大规模运输研究提供独特支持。

c 平台的创新

技术进步使有意义的地球科学观测能够在小卫星上完成，小卫星通常被认为质量小于几百千克。子类别包括微型卫星（10~100 kg）和纳米卫星（1~10 kg）。随着能力和可靠性的迅速提高，这些小型平台是现有测量需求的低成本替代品，它们提供了传统卫星无法提供的新观测技术。CubeSat最初是作为学术和技术演示平台，始于Robert Twiggs（斯坦福大学）领导的CubeSat项目（1999）标准化工作，以及Jordi Puig-Suari（加州理工大学）的改进（NASEM 2016）。纳米卫星单体（1U）的标准定义为体积10 cm×10 cm×10 cm，质量小于1.33 kg，可堆叠成多种组合（2U、3U、6U、12U）。这些卫星通常作为二次有效载荷被送入轨道，或者运送到国际空间站，并使用专门的CubeSat部署设备发射。

近年来，立方体卫星因其科学和业务潜力而受到关注。2016年美国国家科学院报告综述了立方体卫星的科学价值（NASEM 2016）。它建议联邦机构和基金会（特别是NASA和美国国家科学基金会）应该“考虑审查和发展CubeSat所涉及的政策，以使立方体卫星作为科学工具潜力最大化”。NASA的报告特别指出，对地球进行观测的狮子座立方体卫星星座可以提供太阳同步观测不可能提供的全球日变化观测。到2015年，已经发射了425颗立方体卫星；在2013—2015年，分别有55%、21%和24%的立方体卫星来自

商业、大学和政府机构，尽管商业机构的增长速度明显快于其他机构。在报告发表时，NASA和NSF已经发射了19颗具有科学目标的立方体卫星（表1）。几个立方体卫星技术示范项目在NASA非常活跃。

表1 早期和最近的一些卫星仪器以及两颗小卫星的数据速率、质量和功率（Ruf et al. 2018）。

	数据速率/Mbps	质量/kg	功率/W
光学传感器			
AVHRR (original)	0.621	33	27
MODIS	10.6 (peak daytime)	228	162
探空仪			
HIRS (original)	0.011	14	10
HIRS/4	0.003	35	24
AIRS	1.27	156	220
CrIS	1.5	165	123
主动传感器			
CALIPSO (CALIPSO)	0.332	156	124
CPR (CloudSat)	0.015	230	270
小卫星			
CYGNSS (single microsatellite)	4	25	38
IceCube (1.3 U CubeSat)	0.001	1.0	5.6

8 总结

从太空的视角监测和研究大气成为可能。自1958年首次推出地球观测平台，卫星遥感经历了快速的进展，本文只对用于大气观测的广泛时间和空间尺度上的各种传感器、平台和轨道提供了一个简要的概述。而这一概述的范围主要限于美国的卫星观测工作。

卫星观测是日益相互依赖的国际地球观测系统的关键支柱，它增进了我们对地球系统科学的了解，从而改进了对天气、气候和自然灾害的预测。持续进步的最重要手段之一是不断发展的航天器系列，致力于观察我们的天空。然而，地球科学面临的一个持续挑战是需要平衡持续数十年的连续性测量，这是监测气候变化和评估气候模式所必需的，而对新测量方法的渴望将提供对地球系统科学过程的新见解（NASEM 2015）。实现可持续测量的机构间资助和机制一直存在问题（NASEM, Earth Science Decadal Survey 2018）；NASEM（2018）充分讨论了在美国规划和实施连续性的战略困难。正如上面的ISS例子所指出的，新的平台能力可以在获得连续性测量的某些方面发挥成本效益。

与连续性同样重要的是利用新技术观测地球的

新项目。被动传感器通过图像的时间序列来获取风，在天气预报中得到了广泛的应用。未来将看到来自太空平台的多普勒风雷达，它将跟踪分子和气溶胶后向散射显示的运动，并测量水平风矢量的垂直廓线。例如，ESA的新Aeolus任务已于2018年发射，它搭载了激光多普勒仪器来测量风（Reitebuch 2012）。未来的激光雷达任务很可能包括高光谱分辨率激光雷达（HSRL）技术（如Grund and Elor-anta 1991），这些技术可以独立反演气溶胶或云消光和后向散射，而无需预先假设激光雷达的比率或气溶胶类型。星载雷达系统（如TRMM和GPM）正在对降水和云的垂直结构（如CloudSat）进行估计，并将继续成为未来卫星对地球观测的一部分。与星载云和降水测量雷达相关的雷达技术有了显著进步。降水过程从根本上将垂直速度与多普勒雷达观测数据、被动辐射计测量数据和云的解析模型结合起来，将产生面向过程的测量数据，用于研究云和降水过程，从而改进天气预报和气候预测。其中许多技术都是地球云、气溶胶和辐射探测卫星（EarthCARE）的一部分。

今天的卫星观测（图10）正在不断促进大气研究。为有效和高效地提供未来研究所需的观测进行规划是至关重要的。继续利用卫星，专注于观察我们的天空，仍然是研究和理解地球大气层的最重要手段之一。

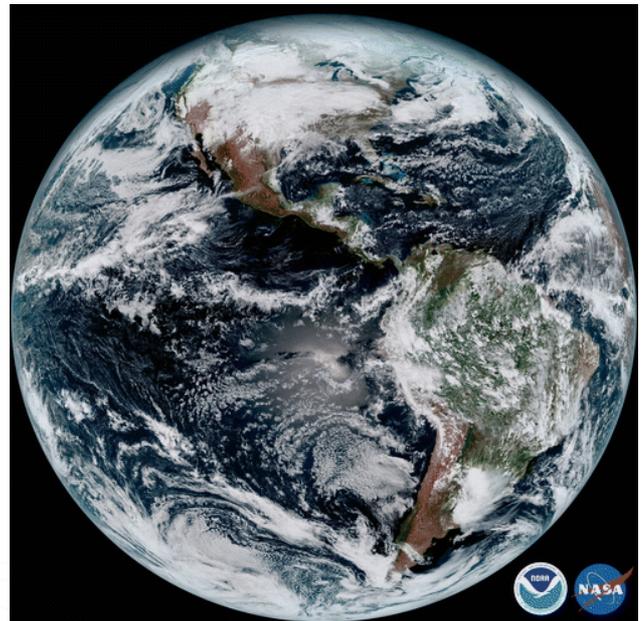


图10 2017年1月15日美国东部标准时间1307，由GOES-16 ABI仪器的光谱测量结果创建的复合彩色全盘可见光图像