

世界各国静止气象卫星发展综述

何兴伟 冯小虎 韩琦 康宁 郭强 彭艺

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 首先阐述了美国、欧洲气象卫星组织 (EUMETSAT)、日本静止气象卫星的发展历史, 从自旋稳定到三轴稳定, 从单一载荷到多载荷并行工作, 新一代的静止气象卫星的时间、空间和光谱分辨率都大幅提高, 然后重点介绍了我国静止气象卫星风云二号和风云四号, 相比于自旋稳定的风云二号气象卫星, 风云四号卫星的功能和性能实现了跨越式的发展, 接着简单介绍了俄罗斯、印度和韩国等其他国家静止气象卫星的发展状况, 最后总结了不同时期各国静止气象卫星的发展特点, 这对我国后续静止气象卫星的规划和研制有重要参考意义。

关键词: 静止气象卫星, GOES, Meteosat, 向日葵-8/9, 风云气象卫星

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.01.005

Advances of the Geostationary Meteorological Satellite in the World: A Review

He Xingwei, Feng Xiaohu, Han Qi, Kang Ning, Guo Qiang, Peng Yi

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The development history of geostationary meteorological satellite in the United States, EUMETSAT, and Japan is reviewed first in this paper. The time, space, and spectral resolution of the new generation of geostationary meteorological satellite have been greatly improved. China's geostationary meteorological satellites FY-2 and FY-4 are then mainly introduced. Compared with the spin-stabilized FY-2 meteorological satellite, FY-4 has achieved a great development in function and performance. Subsequently, the development status of Russia, India and South Korea are briefly introduced, and the advantages and disadvantages of the stationary meteorological satellites development in different periods are finally discussed. This is significant for planning and developing China's geostationary meteorological satellites in the future.

Keywords: stationary meteorological satellite, GOES, Himawari-8/9, FY meteorological satellite

0 引言

自美国1975年10月17日成功发射第一颗地球静止环境业务卫星GOES-A开始, 世界各国陆续开始研制自己的静止气象卫星。从欧洲的Meteosat-1、日本的GMS-1、中国的FY-2A等第一代静止气象卫星发展到美国的GOES-R系列、欧洲的MTG、日本的Himawari-8/9、中国的FY-4A等新一代静止气象卫星, 静止气象卫星发展了三代, 卫星平台从自旋稳定发展到三轴稳定姿态控制方式, 卫星载荷也从搭载单一的成像仪到多载荷并行工作^[1], 静止气象卫星事业取得了巨大的进步。

随着技术的迅速发展, 卫星的设计寿命、时空分辨率、提供的数据量等大幅度提升, 静止气象卫星在全球的天气预报、自然灾害监测与防护服务中发挥越

来越重要的作用。本文从气象卫星发展概述出发, 分别重点介绍了美国、欧洲、日本、中国等国家静止气象卫星的发展历史, 对不同地区不同时期的静止卫星发展状况进行综合对比分析, 通过比较观测模式、卫星设计寿命、载荷性能等方面差异, 能够客观认识我国静止气象卫星发展的优势和不足, 在后继卫星的研制中, 巩固自己的优势技术, 借鉴他国的先进理念, 在满足业务需求的同时, 努力寻求新的技术突破, 提高卫星性能和应用。

1 美国

“地球静止环境业务卫星”(GOES)是美国国家海洋和大气局与美国航空航天局(NASA)共同发展的民用静止轨道气象卫星系列。从1975年10月17日发射第一颗地球静止环境业务卫星GOES-A到现在的GOES-S已经历三代, 图1详细列出了GOES卫星的发展历史。

1.1 第一代 GOES 卫星 (GOES1-7)

1975年10月17日成功发射第一颗地球静止环境业

收稿日期: 2018年12月21日; 修回日期: 2019年7月25日
第一作者: 何兴伟(1986—), Email: hexingwei@gov.cma.cn
资助信息: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507803)

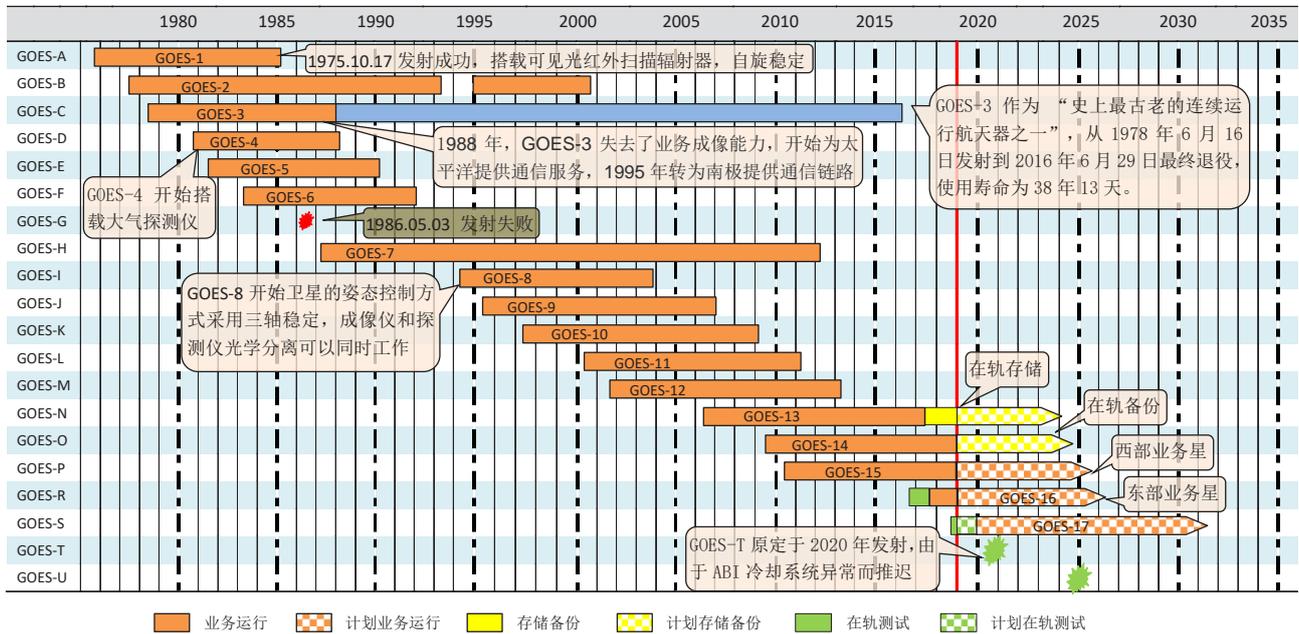


图 1 美国静止气象卫星的发展

Fig. 1 The development of the geostationary meteorological satellite in the United States

务卫星GOES-A，卫星搭载了可见光红外扫描辐射器（VISSR），早期的GOES卫星是自旋稳定的，只在10%的时间内观察地球^[2]。从GOES-4开始增加了大气探测仪，用于获得大气的温湿度垂直分布^[3]，使气象预报员更加准确地预测雾、雪、沙尘暴等异常天气。然而，与20世纪70年代一样，成像仪和探测仪仍然使用相同的光学系统，两个仪器必须轮流使用。

GOES-3作为“史上最古老的连续运行航天器之一”，从1978年6月16日发射到2016年6月29日最终退役，使用寿命为38年13天。从发射到20世纪80年代后期，GOES-3作为西部业务星观测美国西部和北半球，1988年，GOES-3失去了业务成像能力，虽然不再捕捉有用的天气观测数据，但仍然可以与地面系统通信，成为太平洋的通信生命线。1995年，这颗卫星再次易手，开始成为南极的关键通信链路。

1.2 第二代 GOES 卫星 (GOES8-15)

从1994年4月13日发射第二代地球静止环境业务卫星GOES-I开始，卫星的姿态控制方式采用三轴稳定，可以实现区域的灵活观测，成像仪和探测仪光学分离同时工作，可以暂时停止对北半球的例行扫描，专注于天气事件的区域扫描，以改善短期天气预报。在数据的分辨率、数量和连续性方面带来了真正的改进。气象预报员拥有更精确的数据，可以更好地定位风暴、闪电和龙卷等具有潜在危险的天气事件。

第二代GOES卫星搭载有5通道的成像辐射计和19通道的大气垂直探测仪，目前三颗卫星在轨。GOES-

13（75°W，2017年12月8日起被GOES-16取代，由东部业务星转为在轨存储）；GOES-14（105°W，在轨备份）：主要观测美国及周边地区；GOES-15（2018年11月7日由西部业务星位置135°W漂移到128°W）：主要观测美国西部和北半球。

1.3 第三代 GOES 卫星

地球静止环境业务卫星GOES-R系列是美国最先进的地球同步气象卫星机群，包括GOES-R/S/T/U卫星，它们将GOES卫星系列持续运行到2036年。GOES-R系列提供了先进的成像技术，提高了空间分辨率和时间分辨率，以进行更准确的预报，改进了对太阳活动和空间天气的监测，提高了对直接影响公共安全、财产保护以及经济健康的环境现象的检测和观察。

GOES-R也就是现在的GOES-16于2016年11月19日美国东部时间18时42分从卡纳维拉尔角空军基地发射升空。GOES-16自2017年12月8日起取代GOES-13成为美国国家海洋和大气管理局运行中的西部业务星，观测范围从75.2°W开始，包括南北美洲和大西洋，一直到非洲西海岸。

作为4颗第三代GOES卫星的首颗星，GOES-R卫星将仪器成像的时间分辨率提高5倍，空间分辨率提高4倍，光谱通道提高3倍，每30 s提供一次高分辨率卫星图像。GOES-R数据有助于改善飓风跟踪和强度预报，包括龙卷和雷暴等恶劣天气的预报和预警，改进降雨量估计及洪水预警。在航空领域，GOES-R卫星提供不同大气水平云层的图像，更好地估计风速和

风向, 改善航空预报和航线规划。

GOES-R卫星设计寿命为15年, 包括10年在轨运行和5年在轨备份, 搭载的有效载荷包括: 先进基线成像仪 (ABI)、地球静止轨道闪电绘图仪 (GLM)、太阳紫外成像仪 (SUVI)、远紫外与X射线辐照度探测器 (EXIS), 以及空间环境原位测量装置 (SEISS)^[4]。先进基线成像仪是卫星的主要载荷, 有16个探测通道, 包括2个可见光、4个近红外和10个红外通道^[5], 可见光空间分辨率为0.5 km, 红外分辨率为1~2 km。具有多种扫描模式, 地球全盘扫描时间为5~15 min, 美国本土 (3000 km×5000 km) 扫描时间达到5 min, 中尺度区域 (1000 km×1000 km) 扫描时间达到30 s。

GOES-S也就是现在的GOES-17于2018年3月1日发射升空, 作为新一代地球同步气象卫星中的第二颗, GOES-S将提供更快、更准、更详细的数据, 几乎实时地跟踪风暴、闪电、野火以及其他影响美国西部的自然灾害。2018年11月13日GOES-17从89.5°W漂移到西部业务星卫星位置137.2°W, 由于GOES-17先进基线成像仪存在技术问题, NOAA计划将GOES-15和GOES-17同时运行至少6个月。GOES-17一旦投入使用将取代GOES-15成为美国国家海洋和大气管理局运行中的西部业务星, 与GOES-16协同工作。GOES-17利用GOES-16上革命性的新技术, 将卫星覆盖范围扩大到西半球大部分地区, 从非洲西海岸到新西兰, 从

北极圈附近到南极圈附近。

GOES-T原定于2020年发射, 由于GOES-17先进基线成像仪冷却系统异常而推迟。NOAA正在对GOES-T和GOES-U的ABI散热器进行更改, 以降低冷却系统再次出现异常的风险。NOAA预计将在2019年初为GOES-T确定新的发射日期, GOES-U计划在2024年发射。

2 欧洲

欧洲气象卫星组织 (EUMETSAT) 从1977年发射第一颗静止气象卫星开始, 已经发展了两代, 共成功发射11颗卫星, 第三代正在研制当中 (图2)。

2.1 第一代静止气象卫星 (Meteosat First Generation, MFG)

欧洲气象卫星组织于1977年11月发射了第一颗静止气象卫星Meteosat-1, 到1997年9月2日Meteosat-7成功发射, 共发射了7颗卫星, 提供了近30年的气象数据。为了填补1991—1995年大西洋区域的数据空白, Meteosat-3先被西移到50°W, 后又被移到75°W, 这项临时服务被称为大西洋数据覆盖 (ADC) 和Extended-ADC (XADC), 主要对飓风等极端天气进行监控。

快速成像服务 (The Rapid Scanning Service, RSS) 成立于2001年9月, Meteosat-6为其提供服务到2007年后转移到第二代静止气象卫星。为了支持国际气候试验INDOEX, 备用气象卫星自1998年开始承担印度洋数据服务 (The Indian Ocean Data Coverage,

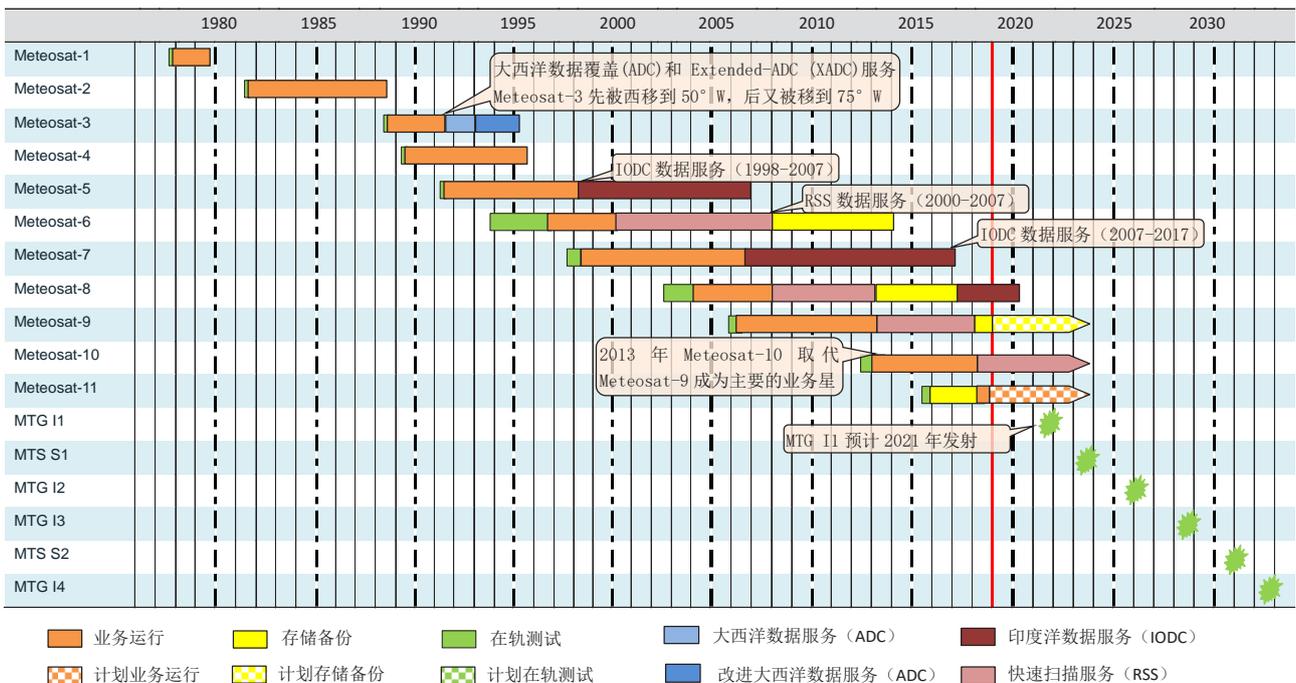


图2 欧洲静止气象卫星的发展
Fig. 2 The development of geostationary meteorological satellite in the EUMETSAT

IODC), 最初由Meteosat-5成像仪提供数据服务, Meteosat-7从2007年开始接替Meteosat-5为印度洋地区提供气象数据, 2017年以后IODC从Meteosat-7过渡到Meteosat-8。

2.2 第二代静止气象卫星 (Meteosat Second Generation, MSG)

欧洲目前正在使用的是第二代静止气象卫星 (MSG), 包括4颗卫星, 分别是Meteosat-8、Meteosat-9、Meteosat-10、Meteosat-11, 卫星设计寿命为7年, 与MFG相比, MSG提供的数据量更大, 时空分辨率更高, 可用于欧洲和非洲地区的天气预报和气候监测^[6-8]。

Meteosat-8在印度洋上空进行全圆盘观测, 提供搜救监测和数据采集平台中继服务 (包括海啸预警转播); Meteosat-9为Meteosat-11全圆盘扫描提供备份服务, 以及为Meteosat-10快速扫描提供填缝服务; Meteosat-10于2012年7月5日发射, 2013年开始定位在0°成为主要的业务气象卫星。2018年3月漂移至9.5°E开始提供快速扫描服务, 每5 min为欧洲、非洲及邻近海域提供一次图像; Meteosat-11是目前最主要的地球同步卫星, 定位于0°, 每15 min进行一次全圆盘扫描, 同时提供搜救监测和数据采集平台中继服务。

MSG卫星携带四种仪器: 改进型自旋可见和红外成像仪 (SEVIRI)、辐射收支平衡探测器 (GERB)、数据收集平台转发器 (DCS) 和静止卫星搜索救援转发器 (GEOS&R)^[9]。MSG仍为自旋稳定姿态控制, 但是其性能有了很大提高, 扫描辐射器的通道由3个增加到12个, 可见光通道的分辨率为1 km, 红外和水汽波段从5 km提高到3 km, 时间分辨率从30 min提高到15 min^[10]。

2.3 第三代静止气象卫星 (Meteosat Third Generation, MTG)

MTG是欧洲新一代静止气象卫星, 由欧洲气象卫星组织和欧洲空间局 (ESA) 联合提出, 以MTG-I (成像卫星) 和MTG-S (探测卫星) 双星运行, 各自搭载不同的探测仪器。计划发射6颗 (4颗MTG-I和2颗MTG-S), 设计寿命8年, 采用三轴稳定, 定位于0°。

首颗MTG-I卫星将于2021年发射, 主要载荷包括组合成像仪 (FCI)、闪电成像仪 (LI)、数据采集系统以及搜救系统。MTG-I组合成像仪10 min完成一次地球全圆盘扫描, 对欧洲区域扫描需要2.5 min。FCI有16个通道, 可见光空间分辨率为0.5~1 km, 红外分辨率为1~2 km。MTG-S的主要载荷包括红外探测器 (IRS) 和紫外可见光近红外探测器 (UVN), MTG-S红外探测器能够提供大气水汽和温度的立体分

布和瞬时分布信息。

3 日本

自1977年发射第一颗GMS-1以来, 日本的静止气象卫星系列经历了三代, 共成功发射9颗卫星, 其中2016年11月2日最新发射了“向日葵9号”气象卫星, 图3为日本静止气象卫星的发展历史。

3.1 地球静止轨道气象卫星 (The Geostationary Meteorological Satellite, GMS)

日本第一代静止气象卫星GMS系列是全球气象卫星系统的一部分, 第一颗GMS-1卫星于1977年7月发射, 1978年4月6日开始提供卫星数据产品。后继又发射了GMS-2/3/4和5, GMS系列卫星主要为西太平洋和东亚区域提供数据服务^[11]。

3.2 多用途运输卫星 (Multi-functional Transport Satellite, MTSAT)

MTSAT是日本的第二代静止气象卫星, 共发射两颗MTSAT-1R和MTSAT-2, 采用三轴稳定姿态控制, 卫星设计寿命为15年, 包括5年气象服务和10年航空导航服务。MTSAT向30多个国家和地区提供云图、海面温度、水汽分布等数据, 每30 min提供一次北半球的云图, 共有5个光谱通道, 可见光分辨率为1 km, 红外波段分辨率为4 km, 在探测低空云雾和估算夜间海面温度方面比GMS-5更有效。MTSAT-1R和MTSAT-2分别于2015年12月23日和2017年3月10日停止气象服务。

3.3 向日葵-8/9 (Himawari-8/9)

向日葵-8/9是日本最新一代静止气象卫星, 采用三轴稳定姿态控制。“向日葵8号”气象卫星是日本宇宙航空研究开发机构设计制造的向日葵系列卫星之一, 重约3500 kg, 设计寿命为15年以上。该卫星于2014年10月7日由H2A火箭搭载发射成功^[12], 位于140°E的地球静止轨道, 主要用于监测暴雨云团、台风动向以及火山喷发等防灾领域。

“向日葵8号”携带三台有效载荷: 高级“向日葵”成像仪 (AHI), 空间环境数据获取监控器 (SEDA) 和数据采集子系统 (DCS)。“向日葵”成像仪是卫星的主要仪器, 有16个通道, 可见光空间分辨率为0.5~1 km, 红外分辨率为1~2 km, 卫星能够收集云量、气温、风、降水和气溶胶分布数据。空间环境数据获取监控器收集空间辐射数据, 研究入射质子和电子数据。数据采集子系统是一种通信载荷, 用于收集和传递来自地面气象站的分析数据。

“向日葵8号”观测频率从“向日葵7号”卫星的每30 min一次缩短至10 min一次, 在日本周边缩短至

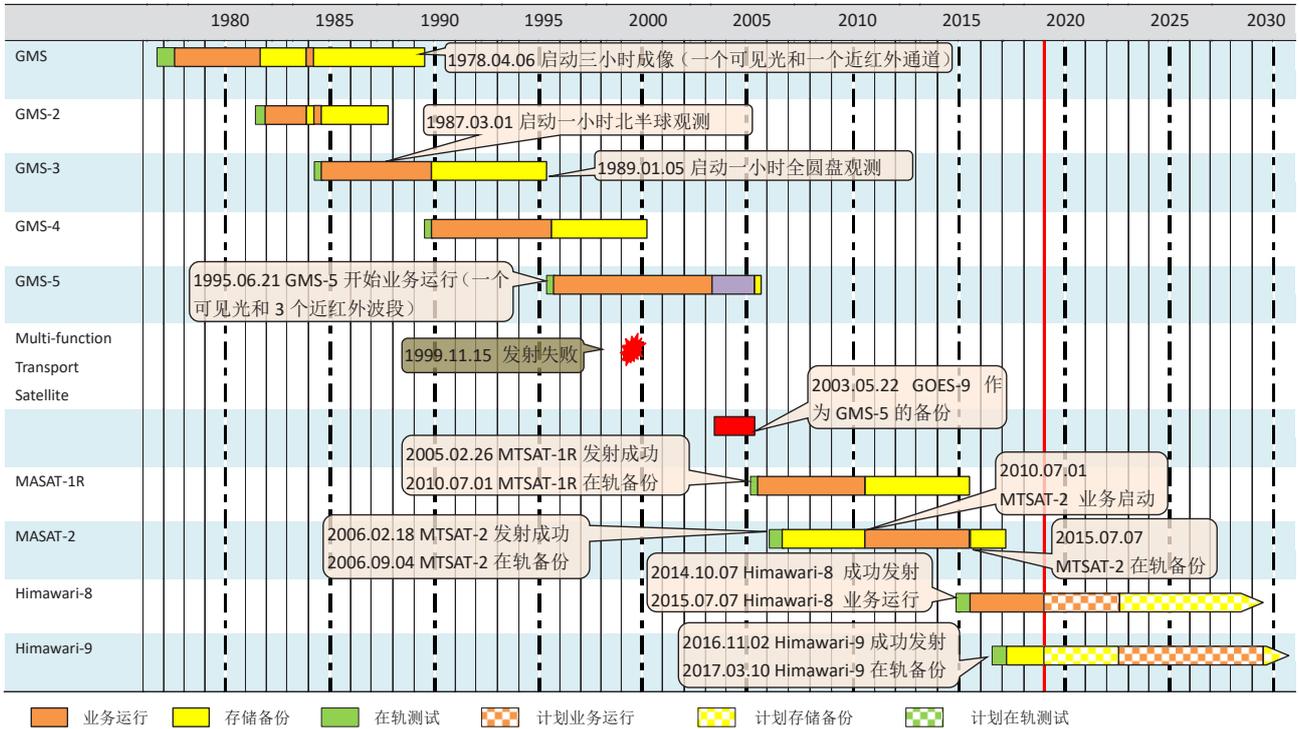


图3 日本静止气象卫星的发展

Fig. 3 The development of geostationary meteorological satellite in Japan

2.5 min一次。通过“向日葵8号”能及时观测到迅速变化的云层，详细掌握海面水温分布和火山灰的扩散情况，并有望提高对台风、暴雨等灾害的预报精度。与“向日葵”系列之前的气象卫星相比，“向日葵8号”性能大幅提高，有助提高天气预报的精确度。

“向日葵9号”于2016年11月2日在日本种子岛发射升空，定位于145.2°E的地球静止轨道，发射初期作为备用卫星待机，计划在2022年投入使用。

4 中国

中国从20世纪80年代开始地球静止气象卫星和地面应用系统的设计与建设，第一颗地球静止气象卫星FY-2A于1997年6月10日，利用长征三号火箭在西昌卫星发射中心发射成功，6月17日定点于105°E赤道上空，由此开始了我国地球静止气象卫星在轨运行的时代（图4）。

4.1 第一代风云静止气象卫星

我国第一代地球静止气象卫星分为三个批次：01批卫星包括2颗星——FY-2A和FY-2B，属于试验型地球静止气象卫星；02批有3颗星——FY-2C、FY-2D和FY-2E，为业务型地球静止气象卫星，相对01批卫星，02批卫星技术性能有较大改进，主要包括星载扫描辐射计由01批的3通道增加到5通道，增加了星上蓄电池供电能力等；03批有3颗星——FY-2F、FY-2G

和FY-2H，增加03批卫星的主要目的是确保在轨运行的第一代地球静止气象卫星向第二代静止气象卫星连续、稳定地过渡。

2018年6月5日，FY-2H气象卫星在西昌卫星发射中心由长征三号甲运载火箭发射升空，这是我国第一代静止轨道气象卫星风云二号的最后一颗。FY-2H星继承了风云二号系列卫星技术成熟、运行稳定的特点，定点于79°E，与之前定点于86.5°E的FY-2E星实现业务接替并往西布局，使得风云卫星在轨布局更好地覆盖我国天气系统上游地区和“一带一路”沿线国家和地区，2018年11月30日FY-2H星交付给中国气象局，并于2019年1月1日正式投入业务运行。

到2018年为止中国已成功发射9颗地球静止气象卫星，目前在轨运行的第一代静止气象卫星有4颗，其中风云二号02批的FY-2E在2019年1月11日正式退出业务运行，开始承担在轨备份任务。风云二号03批卫星均为业务星，FY-2G每天28副全圆盘观测（包括4次测风观测），即每小时观测1次。FY-2F日常和FY-2G相同的观测模式，应急观测时用于安排6 min区域加密观测任务^[13]。FY-2H在28副全圆盘观测的基础上，增加20次北半球观测，等效于每小时观测我国及周边2次。

4.2 第二代风云静止气象卫星

FY-4A是我国第二代静止气象卫星的首发星^[14]，

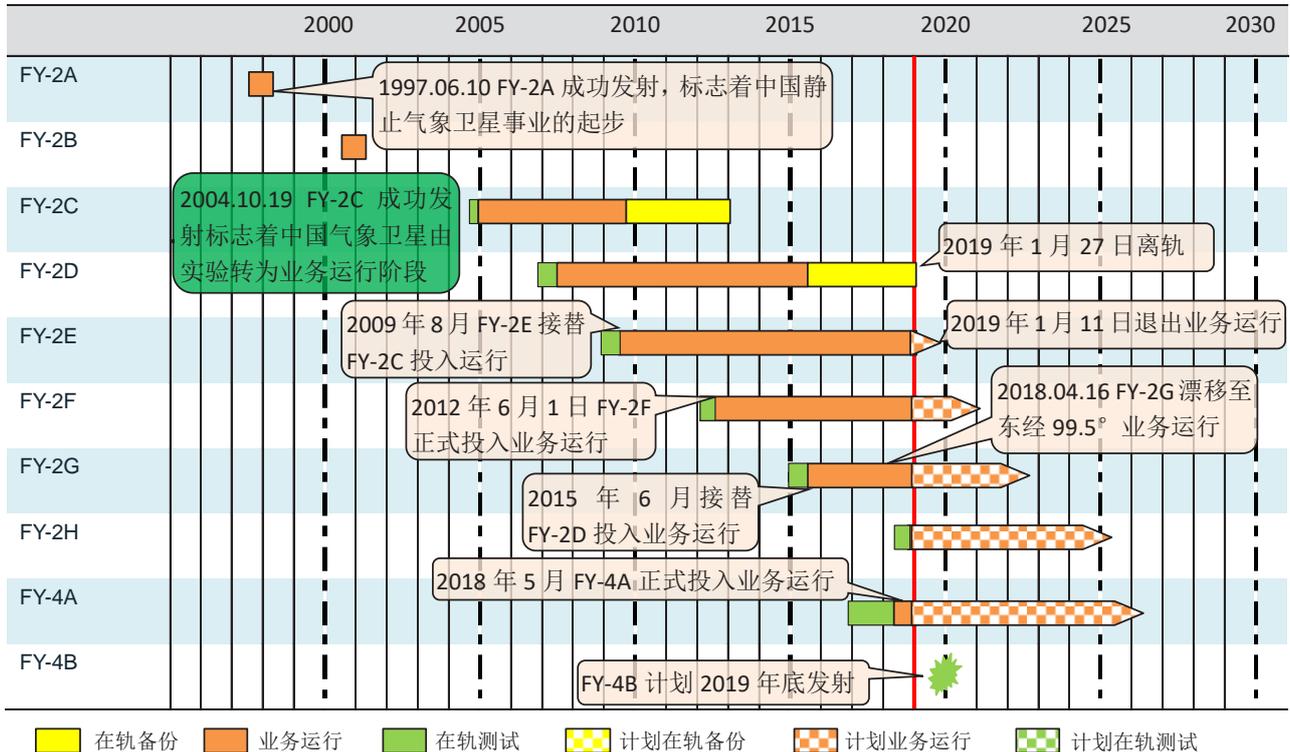


图 4 中国静止气象卫星的发展
Fig. 4 The development of geostationary meteorological satellite in China

采用三轴稳定姿态控制，装载多通道扫描成像辐射计（AGRI）、干涉式大气垂直探测仪（GIIRS）、闪电成像仪（LMI）、空间环境监测仪器组（SEP）等4个有效载荷^[15]，相比自旋稳定的风云二号气象卫星，FY-4A卫星的功能和性能实现了跨越式的发展（表1），除新增大气垂直探测和闪电观测功能外^[16]，装载的多通道扫描成像辐射计和空间天气仪器的性能也显著提高，AGRI观测通道由5个扩展到14个，全圆盘观测时间由30 min提高到15 min，最高空间分辨率从1.25 km提高到0.5 km，极大提升了云图观测能力，进一步提高中小尺度的天气监测和预报水平^[17-18]，空间环境检测仪监测太阳活动和空间环境，为空间天气预报业务和研究提供数据^[19]。

FY-4A在国际静止轨道气象卫星中首次装载了干涉式大气垂直探测仪，光谱探测通道达1648个，可在垂直方向上对大气结构实现高精度定量探测，如同对大气进行CT扫描，进一步提高天气预报的准确性^[20]。

FY-4A自2018年5月1日正式投入业务运行以来，提供了云、辐射、温湿度、大气、云导风、闪电等34种数据产品，可更加精确地开展天气监测与预报、数值预报和气候监测。闪电仪每秒可拍500张闪电图，在国内首次提供闪电预警。FY-4A可每3 min对台风区域进行一次观测^[21]，弥补目前在轨卫星云图时间分辨

表1 风云四号与风云二号卫星性能的对比

Table 1 Comparison of the performance of FY-4A and FY-2

	FY-4科研试验星	FY-2业务卫星
卫星平台稳定方式	三轴稳定	自旋稳定
卫星在轨工作寿命	设计寿命7年	设计寿命4年（03批）
对地观测效率	优于85%	约5%
对地观测方式	成像探测+垂直探测	成像探测
主要有效载荷	14通道成像辐射计： 波段覆盖：0.45~13.8 μm 空间分辨率：0.5~4 km 全圆盘观测时间：15 min 观测区域：灵活可调	5通道辐射计： 波段覆盖：0.55~12.5 μm 空间分辨率：1.25~5 km 全圆盘观测时间：30 min 观测区域：相对固定
	静止轨道干涉式红外探测仪	无
	闪电成像仪	无
	空间环境监测仪器包： 空间粒子探测+磁场探测	空间环境监测仪器包： 空间粒子探测

率不够高的缺点，还将对灾害及环境监测、人工影响天气、空间天气研究等提供有力支撑。风云四号02星（FY-2B）预计2019年底发射。

第一颗地球静止气象卫星FY-2A于1997年6月10日发射升空，经过20多年的发展，先后发射了第三批共8颗第一代静止气象卫星，2016年12月11日，新一代静止气象卫星FY-4A成功发射，FY-4A在载荷数量、波段数目、时空分辨率、卫星寿命等方面实现跨越式提升，FY-4A兼具高频次、高分辨率、垂直探测和机动加密观测能力，提供的原始数据是风云二号卫星的80

倍，处理生成的产品数据则是其160倍^[18]，反演生成的辐射、大气、云、地表等多种定量遥感产品可用于天气分析、数值预报、气象服务以及空间天气预报预警服务，提高天气监测和预报水平，为减少人民生命财产损失和社会发展做出了巨大的贡献。

5 其他国家

5.1 俄罗斯

GOMS-1，也被称为Electro1，是俄罗斯第一颗试验性地球同步静止气象卫星，于1994年11月发射成功，采用三轴稳定姿态控制，设计寿命3年，搭载两波段的扫描辐射计，最后于2000年退役，GOMS-1由于技术问题从未全面投入运行。

Electro-L是俄罗斯第二代静止气象卫星，计划发射五颗（Electro-L.N1~N5），Electro-L.N1/N2分别于2011年1月、2015年11月发射成功，卫星设计寿命为10年，主要载荷有成像仪（MSU-GS）、光电地球物理仪器组（GGAK-E）、数据采集系统（ODSS）和搜救系统（GEOSAR）。MSU-GS有10个光谱通道，包括3个可见光和7个红外通道、15 min完成一次全圆盘扫描，可见光空间分辨率为1 km，红外分辨率为1~4 km。

5.2 印度

1982年，印度首颗通信、气象卫星INSAT-1A成功发射，INSAT-1系列主要用于印度和印度洋的气象观测和通信服务，由美国研制和发射。该系列卫星共发射了4颗（1982—1990年），有效载荷包括高分辨率辐射计（VHRR）和数据收集系统（DCS），可见光分辨率为2.7 km，红外波段为11 km。INSAT-2系列共发射5颗（1992—1999年），INSAT-2A、2B为多用途卫星，INSAT-2C和2D为专用通信卫星，INSAT-2E是第二代INSAT-2系列的最后一颗，也是INSAT-3系列的先导，搭载高分辨率辐射计和1 km分辨率的3通道CCD摄像机^[22]。

INSAT-3系列是一种多用途卫星，支持通信、电视广播、气象和卫星辅助搜救。目前业务运行的有2颗：INSAT-3D和INSAT-3DR，搭载的仪器包括VHRR/2、CCD相机、DCS和卫星辅助搜救系统（SAS&R）。VHRR/2是搭载在INSAT-2系列上的VHRR传统成像仪的改进型，可见光波段的空间分辨率为2 km，其余波段为8 km。

5.3 韩国

2010年6月，韩国第一颗静止气象卫星GEO-KOMPSAT-1发射成功，该卫星具备通信、海洋监测和气象等多种功能^[3]。

GEO-KOMPSAT-2是韩国新一代静止气象卫星，继承GEO-KOMPSAT-1观测天气和海洋环境的任务，增强监测朝鲜半岛周围环境的能力。计划发射两颗多用途卫星：GEO-KOMPSAT-2A用于气象任务，GEO-KOMPSAT-2B用于海洋和环境监测。GEO-KOMPSAT-2A于2018年12月4日发射升空，卫星设计寿命10年，主要载荷有成像仪（AMI）和空间环境探测仪（KSEM）。成像仪AMI有16个光谱通道，全圆盘扫描需要10 min，可见光空间分辨率为0.5 km，红外分辨率为1~2 km，GEO-KOMPSAT-2B计划于2019年发射。

6 总结与展望

静止气象卫星已经发展了四十多年，新一代静止气象卫星在观测模式、卫星设计寿命、载荷性能等方面都有显著提高，表2总结了不同时期各国静止气象卫星的发展。

相比美国、欧洲和日本，我国的静止气象卫星起步较晚，经过气象工作者多年的不懈努力，我国静止气象卫星的技术水平已经从追赶发展到水平相当甚至领先的阶段。FY-4A搭载的仪器数量和种类在同期新一代静止气象卫星当中是最多的。多通道扫描成像辐射计是静止气象卫星的主要载荷，表3总结了中国、美国、欧洲和日本新一代静止气象卫星多通道扫描成像辐射计波段特性，在波段设置方面，FY-4A共有14个通道，波段设置和数量上各国比较接近^[23]；在空间分辨率方面，可见光波段分辨率为0.5~1 km，中波红外波段为2 km，长波红外波段达到4 km，与ABI和AHI长波红外波段的2 km相比，FY-4A的空间分辨率较低，主要受限于制冷器和探测仪的研制水平。FY-4A全圆盘成像时间为15 min，和ABI和AHI的10 min全圆盘成像相比略有差距；干涉式大气探测仪在世界上首次实现了在静止轨道的大气垂直探测，可获取大气温湿度廓线，处于国际领先水平；闪电成像仪首次实现了对亚洲、大洋洲区域的静止轨道闪电持续观测，国外仅美国新一代静止轨道气象卫星GOES-R系列卫星搭载了静止轨道闪电成像仪对西半球美洲区域进行观测^[24]。展望未来，随着卫星技术性能的全面升级，新一代静止卫星实现变革性飞跃，利用三轴稳定姿态控制的大型遥感平台，避免自旋稳定姿态工作平台的局限性，卫星搭载多种载荷同时工作，多种环境探测能力集成发展，在FY-4后继卫星的建设中，继续保持我国大气垂直探测仪的优势，提升多通道扫描成像辐射计的时空分辨率，努力达到甚至超越国际先进水平。

表2 不同时期各国静止气象卫星的性能对比
Table 2 Performance comparison of geostationary meteorological satellite of different countries in different periods

国别		中国	美国	欧洲	日本	俄罗斯	印度	韩国	
第一代	卫星 (发射时间) 状态稳定方式	FY-2A (1997) 自旋稳定	GOES-1 (1975) 自旋稳定	METEOSAT-1 (1977) 自旋稳定	GMS-1 (1977) 自旋稳定	GOMS-1 (1994) 三轴稳定	INSAT-1 (1982) 三轴稳定		
第二代	卫星 (发射时间) 状态稳定方式		GOES-8 (1994) 三轴稳定	METEOSAT-8 (2002) 三轴稳定	MTSAT-1R (2005) 三轴稳定		INSAT-2 (1999) 三轴稳定	GEO-KOMSAT-1 (2010) 三轴稳定	
新一代	卫星 (发射时间) 状态稳定方式	FY-4A (2016) 三轴稳定	GOES-17 (2018) 三轴稳定	MTG-1 (2021) 三轴稳定	Himawari-9 (2016) 三轴稳定	Electro-L.N1 (2011) 三轴稳定	INSAT-3DR (2016) 三轴稳定	GEO-KOMSAT-2A (2018) 三轴稳定	
	设计寿命/年	7	15	8	10	10	10	10	
	成像仪	空间分辨率/km	0.5	0.5	0.5	0.5	1	2	0.5
		可见 红外	2~4	1~2	1~2	2	4	4~8	2
		通道/个	14	16	16	16	10	6	16
		时间分辨率/min	15	10	10	10	15	30	10
探测仪	分光方式 通道个数/个 空间分辨率/km 成像时间/min	干涉式分光 1648 16 区域60	无	干涉式分光 1737 4 全圆盘60	无	无	无	无	
闪电仪	中心波长/nm 时间分辨率/min	777.4 7.8	777.4 8	777.4 8	无	无	无	无	

表3 新一代静止气象卫星成像仪波段特性
Table 3 Channel characteristics of the new generation geostationary meteorological satellite imager

中国 FY-4A			美国 GOES-R ABI			欧洲 MTG			日本 Himawari-8 AHI		
通道号	中心波长/ μm	分辨率/km	通道号	中心波长/ μm	分辨率/km	通道号	中心波长/ μm	分辨率/km	通道号	中心波长/ μm	分辨率/km
1	0.47	1.0	1	0.47	1.0	1	0.44	1.0	1	0.46	1.0
						2	0.51	1.0	2	0.51	1.0
2	0.65	0.5	2	0.64	0.5	3	0.64	1.0	3	0.64	0.5
3	0.825	1.0	3	0.86	1.0	4	0.86	1.0	4	0.86	1.0
						5	0.91	1.0			
4	1.375	2.0	4	1.37	2.0	6	1.38	1.0			
5	1.61	2.0	5	1.6	1.0	7	1.61	1.0	5	1.6	2.0
6	2.25	2.0	6	2.2	2.0	8	2.25	1.0	6	2.3	2.0
7	3.75H	2.0	7	3.9	2.0	9	3.8	2.0	7	3.9	2.0
8	3.75L	4.0									
9	6.25	4.0	8	6.2	2.0	10	6.3	2.0	8	6.2	2.0
			9	6.9	2.0				9	7.0	2.0
10	7.1	4.0	10	7.3	2.0	11	7.3	2.0	10	7.3	2.0
11	8.5	4.0	11	8.4	2.0	12	8.7	2.0	11	8.6	2.0
			12	9.6	2.0	13	9.6	2.0	12	9.6	2.0
12	10.7	4.0	13	10.3	2.0	14	10.5	2.0	13	10.4	2.0
			14	11.2	2.0				14	11.2	2.0
13	12.0	4.0	15	12.3	2.0	15	12.3	2.0	15	12.3	2.0
14	13.5	4.0	16	13.3	2.0	16	13.3	2.0	16	13.3	2.0

参考文献

[1] 张如意,李卿,董瑶海,等.静止气象卫星观测系统发展设想.上海航天,2012,29(5):7-13.
 [2] 徐建平,张志清.各国静止气象卫星的发展.气象科技,2001,(2):11-20.
 [3] 朱珺.国内外静止气象卫星的发展综述.中国科技成果,2018,19(8):6-9.
 [4] 龚燃.地球静止环境业务卫星-R(GOES-R).卫星应用,2016,(12):82.
 [5] 龚燃.美国下一代静止气象卫星.国际太空,2013,(9):20-26.
 [6] 徐清.欧洲静止气象卫星一瞥.国际太空,2013,(9):29-32.
 [7] Veith W.The MSG Satellite and Its Subsystems//Proceedings of the EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference, 2000:15-32.
 [8] Rota S.The METEOSAT Second Generation//Proceedings of the EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference, 1999:25-32.
 [9] 刘洪伟,王金秀,胡晓华,等.欧洲第二代静止轨道气象卫星.遥测遥控,2017,38(5):19-24.
 [10] 岳帧干.欧洲MSG-4卫星获得首批图像——欧洲气象卫星应用组织卫星规划简介(上).红外,2015,36(10):37-40.

(下转41页)

我国中东部地区长时间尺度的高时空分辨率的生物质露天焚烧(包括森林、灌丛、草类及作物秸秆)排放清单。在上述研究建立的卫星反演数据方法,融合多卫星产品、课题组野外调查、高分辨率植被数据、更新的薪柴数据及更新的历年详细的排放参数,课题组近期建立了中国2003—2016年度的高时空分辨率的生物质露天焚烧及室内燃烧的综合排放清单。

项目针对黑碳排放及其气候环境效应模拟相关的几个关键问题,包括获得了对气候和环境效应评估中亟需的黑碳在大气中老化后的混合状态、光学性质等参数,研究结果可为识别黑碳的高浓度排放特征及其在高浓度排放条件下的老化机制、环境气候效应提供理论依据。此外,黑碳气溶胶对边界层产生作用,进而对地面臭氧浓度产生影响。对其中机理的认识,有助于减少黑碳对大气环境的负面作用。以上对黑碳的环境和气候效应的研究,可提升我国科学家在黑碳领域的话语权。研发的欧拉型大气水成物在线源追踪方法,更加适用于大气水分传输的物理机制研究,将其与黑碳气溶胶的辐射效应相结合可以加深理解黑碳影响水循环的物理机制。基于WRF-Chem和CESM模式研发的黑碳源追踪方法将为我国的黑碳减排提供科学参考。黑碳气溶胶光学性质的研究,有利于改进当前模式中黑碳辐射的参数化方案,进一步提升对黑碳的环境、气候效应的理解。

开展黑碳和人群健康相关资料的补充收集和物质质控,融合地面黑碳浓度观测、卫星资料以及再分析资料,建立全国BC浓度数据集,分析其时空分布特征。结合人口分布等信息,建立黑碳的人口暴露水平评估方法。建立典型城市黑碳—健康暴露反应关系,

开展黑碳对人体肺部细胞的毒理作用实验。开展了黑碳、细颗粒物浓度和气温等因子对人体健康影响的协同效应研究。系统开展不同减排方案和气候情景下黑碳造成的居民健康经济损失评估。根据黑碳气候—健康效应评估及减排策略,与健康损失的经济成本进行综合分析,建立了黑碳气溶胶气候—健康效应评估平台,提出优化的减排方案,未来进一步形成科学咨询报告。

参考文献

- [1] Hua Y, Wang S, Wang J, et al. Investigating the impact of regional transport on PM_{2.5} formation using vertical observation during APEC 2014 Summit in Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16: 15451-15460.
- [2] Zhang Q, Ma X, Tie X, et al. Vertical distributions of aerosols under different weather conditions: analysis of in-situ aircraft measurements in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 5526-5535.
- [3] Klimont Z, Cofala J, Xing J, et al. Projections of SO₂, NO_x and carbonaceous aerosols emissions in Asia. *Tellus Series B-Chemical and Physical*, 2009, 61(4): 602-617.
- [4] Cao G, Zhang X, Zheng F, et al. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(34): 6516-6527.
- [5] Zhang L, Zhu B, Gao J, et al. Impact of Taihu Lake on city ozone in the Yangtze River Delta. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(2): 226-234.
- [6] Jiang L, Zhang Z, Zhu B, et al. Comparison of parameterizations for the atmospheric extinction coefficient in Lin'an, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 507-515.
- [7] Gao J, Zhu B, Xiao H, et al. Effects of black carbon and boundary layer interaction on surface ozone in Nanjing, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18: 7081-7094.
- [8] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 221-227.
- [9] Bond T, Doherty S, Fahey D, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2013, 118(11): 5380-5552.
- [10] Dominici F, Mc Dermott A, Zeger S, et al. On the use of generalized additive models in time-series studies of air pollution and health. *American Journal of Epidemiology*, 2002, 56: 193-203.
- [11] 寒松. 日本静止气象卫星概览. *国际太空*, 2013, (9): 37-39.
- [12] 姜珊,任湘湘,夏冬冬. 国外海洋预报动态. *海洋预报*, 2014, 31(12):86-88.
- [13] 张晓虎,陆风,窦芳丽,等. 国外地球同步轨道气象卫星成像观测模式发展分析. *气象科技进展*, 2016, 6 (1): 124-128.
- [14] Yang J, Zhang Z Q, Wei C, et al. Introducing the New Generation of Chinese Geostationary Weather Satellites, Fengyun-4. *Bull Amer Meteor*, 2017, 98: 1637-1658.
- [15] Lu F, Shou Y. Channel simulation for FY-4 AGRI//Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2011: 3265-3268.
- [16] 杨军. 气象卫星及其应用. 北京: 气象出版社, 2012.
- [17] 张鹏,郭强,陈博洋,等. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9卫星比较分析. *气象科技进展*, 2016, 6 (1): 72-75.
- [18] 张志清,陆风,方翔,等. FY-4卫星应用和发展. *上海航天*, 2017, 34(4): 8-19.
- [19] 张志清,董瑶海,丁雷,等. 我国首颗第二代静止气象卫星风云-4 升空. *国际太空*, 2016, (12): 6-12.
- [20] 李卿. 中国静止气象卫星进展. *航天返回与遥感*, 2001, 22(1): 13-19.
- [21] 王淦泉,陈桂林. 地球同步轨道二维扫描红外成像技术. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 429-433.
- [22] 董瑶海. 风云四号气象卫星及其应用展望. *上海航天*, 2016, 22(2): 1-8.
- [23] 周润松,葛榜军. 美国新一代气象卫星系统发展综述. *航天器工程*, 2008, 17(4): 91-98.
- [24] 杨军,许健民,董超华. 风云气象卫星40年: 国际背景下的发展足迹. *气象科技进展*, 2011, 1(1): 6-13.

(上接29页)