中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析

孙伟伟1,杨刚1,陈超2,常明会1,黄可1,孟祥珍1,刘良云3

1. 宁波大学 地理与空间信息技术系, 宁波 315211;

浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 舟山 316000;
 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100044

摘要: 近40年来,中国的地球观测遥感卫星技术发展取得了卓越的成就,已经形成了陆地、气象和海洋3大卫 星系统,正在广泛服务于中国的自然资源调查、海洋环境保护、气象灾害预测和国家重大工程等诸多领域。本 文回顾了3大卫星系统的发展历程,剖析中国地球观测遥感卫星的发展现状与内在特点,归纳总结在轨卫星的文 献研究热点。研究发现,中国3大遥感卫星系统的发展并不均衡,气象卫星业务较为成熟,陆地卫星发展最为迅 速。遥感卫星的文献研究数量总体偏少,应用研究亟待提升。后续规划和发展应考虑陆地卫星的轨道高度差异 性和波谱范围的互补性,同时增加气象和海洋卫星数量,提升卫星传感器的探测能力和时空分辨率,尤其是加 快海洋卫星的业务应用能力。此外,学者们需要进一步加大国产遥感卫星数据的使用力度,加强卫星遥感数据 的应用研究以进一步提升中国地球观测遥感卫星的业务能力与国际影响力。

关键词:中国地球观测,遥感,陆地卫星,气象卫星,海洋卫星,文献分析

引用格式: 孙伟伟,杨刚,陈超,常明会,黄可,孟祥珍,刘良云.2020.中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析.遥感学 报,24(5):479-510

Sun W W, Yang G, Chen C, Chang M H, Huang K, Meng X Z and Liu L Y. 2020. Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites. Journal of Remote Sensing (Chinese), 24 (5): 479–510[DOI:10.11834/jrs.20209464]

1 引 言

作为全球发展最为迅猛的高科技技术之一, 地球观测卫星遥感是利用卫星上搭载的可见光、 红外和微波等传感器,收集地球表面和近地空间 的电磁辐射数据,探测和识别地球资源和环境信 息的空间观测技术(Gu和Tong, 2015; Guo, 2012;Guo等,2014)。中国的地球遥感卫星技术 起源于20世纪80年代,晚于欧美发达国家。经过 30多年的迅速发展,遥感卫星技术取得了较大的 进步,已经广泛应用于陆地自然资源调查、海洋 生态环境保护、气象灾害预测和国家重大工程等 诸多领域(徐冠华等,2016;Guo等,2019)。

截止2019年11月,中国已经发射了200余颗 地球遥感卫星,主要分为3大系统:陆地卫星、气 象卫星和海洋卫星(Hou和Liu, 2015)。陆地遥感 卫星始于1999年,技术发展迅速,时空分辨率和 图像质量提升明显。陆地遥感卫星已经具备全色、 多光谱、红外、合成孔径雷达、视频和夜光等多 种手段的观测能力,构建了包括资源、高分、环 境/实践和小卫星在内的4个对地遥感观测卫星系 列,正在应用于国土资源调查、环境保护、灾害 监测和城市建设等领域(王桥和刘思含,2016; Xu等,2014)。同时,中国十分重视气象遥感卫星 的发展,目前是世界上同时具有极轨和静止轨道 两个系列业务气象卫星的少数国家之一。气象遥 感卫星从1977年开始研发到现在经历了42年,卫 星遥感器性能逐步提高,卫星运行寿命不断增加, 探测的大气要素更加细致全面。气象遥感卫星目 前已经形成以风云卫星为主体的较为成熟的大气

基金项目:国家自然科学基金(编号:41971296,41671342,41801256);浙江省自然科学基金(编号:LR19D010001,LQ18D010001)

收稿日期: 2019-12-10; 预印本: 2020-01-20

第一作者简介:孙伟伟,1985年生,男,教授,研究方向为地理信息系统、遥感理论和方法及"3S"技术在海岸带资源管理与环境变化监测中的应用。E-mail: sunweiwei@nbu.edu.cn

遥感观测体系,能够基本满足大气科学研究、天 气分析和数字天气预报应用需求(卢乃锰和谷松 岩,2016)。相比而言,海洋遥感卫星起步最晚, 首颗海洋遥感卫星HY-1A发射于2002年。经过近 20年的发展,海洋卫星的时间和空间分辨率已得 到较大提升,初步形成海洋水色、海洋动力环境 和海洋监视监测3大卫星系列,能够实现海洋水色 和关键海洋参数的大面积同步观测,并逐步从试 验型到业务型应用转化,逐渐用于海洋权益维护、 海域管理使用和海洋生态环境保护等领域(蒋兴 伟等,2019;林明森等,2015)。

同时,学者们也开始梳理中国地球观测遥感 卫星系统的发展成就和问题所在,如分析陆地卫 星系统的技术发展、服务现状及几何与辐射能力 (王海燕等,2019;陈卫荣等,2019;曹海翊 等,2018),归纳商业小卫星的发展成就和应用特 点(白照广,2019),总结风云气象卫星的发展进 程和产品应用情况(卢乃锰和谷松岩,2016;卢 乃锰等,2017),和阐述海洋卫星系统的发展和未 来规划等(蒋兴伟等,2016,2019;林明森等, 2019)。然而,当前研究大多集中在展示单个遥感 卫星系统的发展成就,较少梳理目前在轨遥感卫 星的传感器关键参数、技术内在特点及卫星应用 的文献研究热点等。

针对上述问题,本文回顾了中国陆地、气象 和海洋3大地球观测遥感卫星系统的发展历程,梳 理了目前在轨遥感卫星传感器的关键参数和应用 领域,剖析了中国地球观测遥感卫星的发展现状 和技术内在特点。在此基础上,利用CiteSpace文 献分析方法,归纳总结在轨遥感卫星的文献研究 热点,以期为中国后续地球观测遥感卫星发展规 划和技术应用研究提供细致的科学参考。

2 陆地遥感卫星

陆地遥感卫星主要探测地球表面的各种资源、 环境、灾害和人类活动信息及变化情况,为自然 资源调查、生态环境保护、农作物估产、灾害监 测和城市规划等提供数据服务。从20世纪80年代 起,中国已经将陆地遥感卫星列为国家科技攻关 重大项目。1999年,中国成功发射的首颗陆地卫 星资源一号,填补了自主遥感卫星数据的空白。 经过20年的发展,已经发射近100颗民用陆地观 测卫星,传感器的时间、空间和光谱分辨率大幅 度提升,基本形成了从一颗星到多颗星、从一个 卫星系列到多个卫星系列、从科研试验到业务运 行的陆地卫星格局。

2.1 资源系列卫星

资源系列卫星是中国的地球资源探测卫星, 从20世纪80年代开始研制,相继发射了"资源一 号"至"资源三号"3个系列(Li和Cao,2010)。 "资源一号"系列逐渐形成两个分支,一个是中巴 合作的"资源一号"CBERS系列,另一个是国内 独立研制的ZY1业务卫星系列(张庆君,2018)。

"资源一号"01和02卫星(代号CBERS-01、02),以法国SPOT4卫星的设计指标为目标,由中国和巴西联合研制,是中国发射的第一颗民用国产陆地观测卫星(杨忠东等,2003;DeOliveira Lino等,2000)。星上有效载荷包括1台5波段的CCD相机、1台4波段的红外多光谱扫描仪和1台2波段的宽视场成像仪。资源一号卫星为中巴两国的农业、林业、地质、水文、测绘和环境等资源的调查、开发、管理和监测提供中分辨率的遥感信息服务。CBERS-01星于1999-10-14发射,2003-08-13寿命结束;CBERS-02星于2003-10-21发射,2009-01-15寿命结束。

"资源一号"02B卫星(代号 CBERS-02B), 于2007年9月发射升空,有效保证了资源系列卫 星遥感数据的连续性(周雨霁等,2008;何宇华 等,2007)。CBERS-02B首次搭载2.36 m高分辨率 相机,具备了全色多光谱同时成像的能力,在轨 运行两年7个月,于2010年4月寿命结束。"资源 一号"02C星(代号ZY1-02C)于2011-12-22发 射升空,是中国第一颗国土资源普查的业务卫星 (李宗仁等,2017;Jiang等,2014)。ZY1-02C 卫星搭载全色5 m的多光谱相机、全色2.36 m的 高分辨率相机和10 m的PMS多光谱相机,幅宽达 到54 km,主要用于土地资源监管、矿山开发监 测、地质灾害监测、地质隐患调查等国土资源微 观调查与监管业务应用,目前在轨运行。

"资源一号"04卫星(代号 CBERS-04)于 2014-12-07发射,由中巴合作完成,被誉为"南 南合作典范"。CBERS-04搭载5m全色、10m多 光谱相机、20m多光谱相机、40m/80m的红外相 机)和分辨率为67m的宽视场成像仪,卫星轨道 高度778 km,提供的中分辨率遥感数据主要用于 国土资源、林业、水利、农情、环境保护等领域 的监测、规划和管理,目前在轨运行。

"资源一号"02D卫星(代号ZY1-02D)于 2019-09-12发射升空,是中国首颗民用高光谱业务 卫星。ZY1-02D搭载9谱段的多光谱相机和166谱 段的高光谱相机,提供2.5m全色、10m多光谱和 30m高光谱影像数据,主要用于生态环境监测、 土壤质量评估、地矿填图、地表水和冰川监测等 领域,并可在应急管理、生态环境、住房与城乡 建设、交通运输、农业农村、林业草原等方面发 挥重要作用。

"资源二号"卫星(代号ZY-2),是中国新一 代传输型遥感卫星,其包含的01、02和03星分别 于2000年9月、2002年10月和2004年11月成功 发射,并实现了三星组网。ZY-2卫星搭载红外和 可见光相机、多光谱扫描仪、微波辐射计、多功 能雷达、重力及磁力遥感等多种遥感设备,用于 国土资源勘查、环境监测与保护、城市规划、农 作物估产、防灾减灾和空间科学试验等领域,目 前已停止工作。

"资源三号"卫星(代号ZY-3),01星于 2012-01-09发射升空,是中国第一颗民用高分辨 率光学传输型立体测图卫星(李德仁,2012;唐 新明和胡芬,2018; Wang等,2014)。星上搭载 的前、后、正视相机和多光谱相机,提供长期、 连续、稳定、快速地获取覆盖全国的2.1 m的高分 辨率立体影像和6 m的多光谱影像。ZY-3 02 星于 2016年5月成功发射,与01 星组网运行,共同服 务于国土资源调查与监测、防灾减灾、农林水利、 生态环境、城市规划与建设、交通、国家重大工 程等领域,目前在轨运行。

2.2 高分系列卫星

高分系列卫星来源于中国高分辨率对地观测 重大专项计划(简称"高分"专项)。"高分专项" 计划于2010年5月启动,在2020年建成中国自主 研发的高分辨率对地观测系统。高分系列卫星覆 盖从全色、多光谱到高光谱、从光学到雷达、从 太阳同步轨道到地球同步轨道等多种类型,最终 建设成为一个具有高时空分辨率、高光谱分辨率、 高精度观测能力的对地观测系统(童旭东,2016; Tong等,2016)。高分系列卫星编号从"高分一 号"(简称GF-1)开始,目前全部完成发射任务, 主要服务于国家综合防灾减灾、国家安全、资源 调查与监测、环境监测与评价、城市化精细管理、 国家战略规划支撑及重大工程监测等国家级综合 应用领域。

系列	二 名	〕星 G称	代号	发射 时间	轨道高 度/km	传感器	重访 周期	波段 数	波谱或频率范围	空间分 辨率/m	幅宽/ km	工作 模式	用途	获取 途径
						全色			1:0.51—0.85 μm	5			土地资源监	
		02C星	ZY1-02C	2011– 12–22	780.099	多光谱	3 d	4	2:0.52—0.59 μm 3:0.63—0.69 μm 4:0.77—0.89 μm	10	60	推扫 成像	管、矿山开发 监测、地质灾 害监测、地质 隐患调查等国 土资源的微观	
						全色		1	1:0.50—0.80 μm	2.36	54		调查与监管	
资 系列						全色			1:0.51—0.85 μm	5				中国
	资源 1号					多光谱	3 d	4	2:0.52—0.59 μm 3:0.63—0.69 μm 4:0.77—0.89 μm	10	60		国土资源、林	资源 卫星 应用
		04星	CBERS-04	2014– 12–07	778	多光谱	26 d	4	5:0.45—0.52 μm 6:0.52—0.59 μm 7:0.63—0.69 μm 8:0.77—0.89 μm	20	120	推扫 成像	业、水利、农情、 环境保护等领 域的监测、规 划和管理	1.0
						多光谱	26 d	4	1:0.50—0.90 μm 2:1.55—1.75 μm 3:2.08—2.35 μm	40	120			

表1 在轨运行的中国陆地遥感卫星主要参数一览表

Table 1 Main parameters of China in-orbit terrestrial observation satellites

		卫星		发射	轨道高		重访	波段		空间分	幅宽/	工作		表表 获取
系列	-	名称	代号	时间	度/km	传感器	周期	数	波谱或频率范围	並內第 辦率/m	km	模式	用途	途径
						热红外多光谱	3 d	4	4:10.40—12.50 μm 1:0.45—0.52 μm 2:0.52—0.59 μm 3:0.63—0.69 μm 4:0.77—0.89 μm	80	866	-		
						全色			1:0.452—0.902 μm	2.5				-
		02D星	ZY-1 02D	2019- 09-12	778	多光谱	3 d	9	2:0.452—0.521 μm 3:0.522—0.607 μm 4:0.635—0.694 μm 5:0.776—0.895 μm 6:0.416—0.452 μm 7:0.591—0.633 μm 8:0.708—0.752 μm 9:0.871—1.047 μm	10	115	推扫成像	生态环境监测、土壤质量 评估、地质重 物填图、地表 水和冰川监测 等领域	
						高光谱	-	166	166:0.40—2.5 μm (可 见光:10 nm; 短波红外:20 nm)	30	60			_
						前 视 立 体 祖	-	1	1:0.50—0.80 μm	3.5	52			
		_	ZY-3	2012- 01-09	505.984	机 正 视	5 d			2.1		立体 成像		
	资源					多光谱	-	4	1:0.45—0.52 µm 2:0.52—0.59 µm 3:0.63—0.69 µm 4:0.77—0.89 µm	6	51		国土资源调查 与监测、测绘、 防灾减灾、农 林水利、生态	
	3号					前 辺 体 相 祝	3— 5 d	1	1:0.50—0.80 μm	2.5	_		环境、城市规 划与建设、交 通、国家重大 工程	
		02星	ZY-3 02	2016- 05-30	505	机 正 视				2.1	51	立体 成像		
						多光谱	3 d	4	1:0.45—0.52 µm 2:0.52—0.59 µm 3:0.63—0.69 µm 4:0.77—0.89 µm	5.8	-			
						全色	_		1:0.45—0.90 μm	2	_		矿产资源调查与	-
高分系列	高人	分一号	GF-1	2013– 04–26	645	多光谱	4 d	5	2:0.45—0.52 μm 3:0.52—0.59 μm 4:0.63—0.69 μm 5:0.77—0.89 μm	8	60	推扫成像	监测、土地利用 动态监测、地利用 灾害监测、水环 境、大气环境监测、 农作物长势监测、 句估产、城乡规 划、水资源和林 业资源调查、防 灾减灾等	

												约	卖表
系列	卫星 名称	代号	发射 时间	轨道高 度/km	传感器	重访 周期	波段 数	波谱或频率范围	空间分 辨率/m	幅宽/ km	工作 模式	用途	获取 途径
					多光谱	2 d	4	6:0.45—0.52 μm 7:0.52—0.59 μm 8:0.63—0.69 μm 9:0.77—0.89 μm	16	800			
					全色			1:0.45—0.90 μm	1			地质解译、地	-
	高分 二号	GF-2	2014- 08-19	631	多光谱	5 d	5	2:0.45—0.52 μm 3:0.52—0.59 μm 4:0.63—0.69 μm 5:0.77—0.89 μm	4	45	推扫 成像	质 灾 害 研 、 測 近 生 空 建 四 、 城 、 双 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	_
_	高分 三号	GF-3	2016- 08-10	755	合成 孔雷达	单 视:< 3 d; 双 视:< 1.5 d	1	C频段:4—8GHZ	1—500	5— 650	单化极和极双化全化	土 测预域地洪和 化 微子 " 如 预 域 地 洪 地 预 察 、 测 水 表 游 利 和 策 、 测 水 表 求 范 用 , 网 汤 水 市 制 海 、 米 、 海 断 和 面 浅 、 次 形 、 海 雨 秋 不 面 海 而 利 和 和 和 和 和 和 和 和 和 和 和 和 和 和 和 和 和 和	_
_	高分 四号	GF-4	2015- 12-29	36000	多光谱	20 s	5	1:0.45—0.90 μm 2:0.45—0.52 μm 3:0.52—0.60 μm 4:0.63—0.69 μm 5:0.76—0.90 μm	50	400	面阵 凝视	防灾减灾、气 象、地震、林业 和环保等	-
_					红外		1	1:3.50—4.10 μm	400				_
					高光谱		330	0.40—2.50 μm (可见光:5 nm; 短波红外:10 nm)	30				
	高分 五号	GF-5	2018– 05–09	705	多光谱	5 d	12	1:0.45—0.52 μm 2:0.52—0.60 μm 3:0.62—0.68 μm 4:0.76—0.86 μm 5:1.55—1.75 μm 6:2.08—2.35 μm 7:3.50—3.90 μm 8:4.85—5.05 μm 9:8.01—8.39 μm 10:8.42—8.83 μm 11:10.3—11.3 μm	20	60	推扫成像	水体和生态环 境 废弃 如 、	

													经	表
系列	卫 名	星称	代号	发射 时间	轨道高 度/km	传感器	重访 周期	波段 数	波谱或频率范围	空间分 辨率/m	幅宽/ km	工作 模式	用途	获取 途径
						全色			1:0.45—0.90 μm	2				
						多光谱	4 d	5	1:0.45—0.52 µm 2:0.52—0.60 µm 3:0.63—0.69 µm 4:0.76—0.90 µm	8	90		広业 広村 白	
	高六	分 :号	GF-6	2018– 06–02	645	多光谱	2 d	8	1:0.45—0.52 µm 2:0.52—0.59 µm 3:0.63—0.69 µm 4:0.77—0.89 µm 5:0.69—0.73 µm 6:0.73—0.77 µm 7:0.40—0.45 µm 8:0.59—0.63 µm	16	800	推扫成像	农业农村、日 然资源、应急 管理、生态环 境等	
									1:0.45—0.90 μm	0.8				
	高七	分 :号	GF-7	2019- 11-03	505	全色/多 光谱立 体相机	5	5	2:0.45—0.52 μm 3:0.52—0.59 μm 4:0.63—0.69 μm 5:0.77—0.89 μm	3.2	20	推扫 成像	民用 1:10000 卫星立体测图, 基础测绘、全 球地理信息保 障、城乡建设	
						激光测 高仪	_	_	_	_	_	_	监测评价、农业调查统计等	
		A星	HJ-1A	2008-	649.093	多光谱		4	1:0.43—0.52 μm 2:0.52—0.60 μm 3:0.63—0.69 μm 4:0.76—0.90 μm	30	700			
				09-06		高光谱		110 — 128	110—128:0.45—0.95 μm	100	50		大苏围、全天	
	- 环境 1号			2000		多光谱	4 d	4	1:0.43—0.52 μm 2:0.52—0.60 μm 3:0.63—0.69 μm 4:0.76—0.90 μm	30	700	推扫成像	候、全天时动 态监测环境污 染、生态破坏 和自然灾害监	中国
环境/ 实践 系列		B 星	HJ-1B	2008– 09–06	649.093	多光谱		4	1:0.75—1.10 μm 2:1.55—1.75 μm 3:3.50—3.90 μm	150	720		测及评估	资 卫 星 用 中 心
						热红外			4:10.50—12.50 μm	300				
		C星	HJ-1C	2012- 11-19	499.26	合成孔 径雷达		1	S频段: 2—4 GHZ	单视:5; 4视:20	100	VV 极化		
						全色			1:0.45—0.89 μm	2.5			国土资源调查	
	实践 九号	A星	SJ9-A	2012- 10-14	645	多光谱	4 d	5	2:0.45—0.52 μm 3:0.52—0.59 μm 4:0.63—0.69 μm 5:0.77—0.89 μm	10	30	推扫 成像	与监测、农业、 林业、水利、城 乡建设、环境 保护和防灾减	
		B星	SJ9-B			近红外	8 d	1	1:0.80—1.20 μm	73	18		火	

													经	读表
系列] 名	卫星 公称	代号	发射 时间	轨道高 度/km	传感器	重访 周期	波段 数	波谱或频率范围	空间分 辨率/m	幅宽/ km	工作 模式	用途	获取 途径
	北方	了一号	DMC3	2015- 07-11	651	全色/ 多光谱	1 d	5	1:0.44—0.51μm 2:0.51—0.59 μm 3:0.60—0.67 μm	3.2	24	多模沿立跨立条槽景式,轨体,轨体带,	全球资源环境 调查、城市规 划和智能管理 及灾害监测	中二一纪间术用公国十世空技应股方
									4:0.45—0.65 μm	0.8		医域		限公
									5:0.76—0.91 μm	3.2		成像		司
		01星	TH-1 01	2010– 08–24		全 色		1	0.51—0.69 μm	2			本町へ球革田	
	天绘	02星	TH-1 02	2012- 05-06	500	多 光 谙 有	组网 1 d	4	1:0.43—0.52 μm 2:0.52—0.61 μm 3:0.61—0.69 μm 4:0.76—0.90 μm	10	60	立 体 成像	内立体、多光 谱和高分辨率 影像信息,测 制全球地区	中国 天绘 卫星
小卫系 列		03星	TH-1 03	2015- 10-26		立 体 相 机		1	0.51—0.69 μm	5			图,修测1:2.5 万比例尺地图	1.26
		01/02 星	_	2016– 12–28		全 色	_	1	1:0.45—0.89 µm	0.5		星 下 成像、		
	高景 一号	03/04 星	Super- View-1	2018- 01-09	530	全 有 光 谱	组网 1 d	4	1:0.45—0.52 μm 2:0.52—0.59 μm 3:0.63—0.69 μm 4:0.77—0.89 μm	2	12	侧成连条多带接立和目成摆像续带条拼、体多标像	提供通感数据 派解和 决 了 资 、 》 、 资 、 》 、 、 》 、 》 、 、 》 、 》 、 、 》 、 》	北航世信技有公京天景息术限司
		01组	OVS-1A/ 1B	2017- 06-15	530	RGB 视频		1	RGB: 0.43—0.76 µm	1.98	6.1	凝视、 推扫		
			OHS-01/ 02/03/04			高光谱	-	256	选32个: 0.4—1.0 µm	10	150		海洋监测、农 业生态环境监	
	珠海 一号	02组	OVS-2	2018– 04–26	500	RGB 视频	组网 1 d	1	RGB: 0.43—0.76 μm	0.9	视频: 2.7; 图像: 22.5	凝视、 推扫	测、土地荒漠 化监测、林业 监测、资源分 布与调查、水 资源环境动态 应测	珠欧特航技公海比字科股右
			OHS-3A/ 3B/3C/3D			高光谱	-	256	选32个: 0.4—1.0 µm	10	150		急、环境综合 监测管理、智	限公司
		03组	OVS-3	2019– 09–19	500	视频	-	1	RGB: 0.43—0.76 μm	0.9	视频: 2.7; 图像: 22.5	凝视、 推扫	慧城市和金融 保险等领域	

续	表

系列	卫星 名称	代号	发射 时间	轨道高 度/km	传感器	重访 周期	波段 数	波谱或频率范围	空间分 辨率/m	幅宽/ km	工作 模式	用途	获取 途径
	光学 A 星	_		650	全色	-	1	1:0.612—0.794 µm 1: 0.457—0.526 µm 2: 0.54—0.595 µm 3: 0.628—0.688 µm	0.72	11.6	常規 推扫、 大角 度侧 摆		
	视频 01/02 星	_	2015-	656	RGB 视频	_	1	RGB: 0.43—0.76 μm	1.13	4.6× 3.4	凝视 视频		
	灵巧 验证 星		- 10-07	650	全色	_	1	1:0.612—0.794 μm	4.7	9.6	推凝视灵成立成、现象、现象、现象、现象、现象、		
	视频 03星	_	2017- 01-09	535	RGB 视频	_	1	RGB: 0.41—0.69 μm	0.92	11× 4.5	凝视夜立空目成、、		
						- 单星 3.3d.	1	RGB视频: 0.437—0.723 µm		11× 4.5	凝视 视频、	国土资源监测、 林业普查 环境	长光 11星
吉 7 	林 号 视频 04-06 星	_	2017- 11-21	535	RGB 视频	3.5d; 组网 1— 1.5 d	6	1:0.45—0.80 μm 2:0.45—0.51 μm 3:0.51—0.58 μm 4:0.63—0.69 μm 5:0.705—0.745 μm 6:0.77—0.895 μm	0.92	19	推夜立空目成	保护、交通运输和防灾救灾等领域	上 技 很 司
						-	1	RGB视频: 0.437—0.723 μm		11× 4.5	凝视视频、		
	视频 07/08 星	_	2018– 01–19	535	RGB 视频		6	1:0.45—0.80 μm 2:0.45—0.51 μm 3:0.51—0.58 μm 4:0.63—0.69 μm 5:0.705—0.745 μm 6:0.77—0.895 μm	0.92	19	推夜立空目成		
	光谱 01/02 星		2019- 01-21	528	多光谱	_	26	1:0.45—0.80 μm 2:0.403—0.423 μm 3:0.433—0.453 μm 4:0.45—0.515 μm 5:0.525—0.600 μm 6:0.63—0.68 μm 7:0.7845—0.8995 μm 8:0.485—0.495 μm 9:0.615—0.625 μm 10:0.650—0.680 μm 11:0.69875—0.71875 μm 12:0.7325—0.7475 μm	可见 近红 外:5; 短如外: 100; 长波 150	110	推扫、 夜光 三日 标 歳		

												约	奏表
系列	已星 名称	代号	发射 时间	轨道高 度/km	传感器	重访 周期	波段 数	波谱或频率范围	空间分 辨率/m	幅宽/ km	工作 模式	用途	获取 途径
								13:0.773—0.793 μm 14:0.855—0.875 μm 15:0.66—0.67 μm 16:0.6775—0.685 μm 17:0.75—0.7575 μm 18:0.75875—0.76275 μm 19:0.935—0.955 μm 20:1.0—1.04 μm 21:1.195—1.225 μm 22:1.36—1.39 μm 23:1.55—1.59 μm 24:1.61—1.69 μm 25:3.7—4.95 μm 26:7.5—13.5 μm					
	高分 03A星	_	2019- 06-05	572	全色 多光谱	_	4	1:0.45—0.70 μm 1:0.45—0.51 μm 2:0.51—0.58 μm 3:0.63—0.69 μm 4:0.77—0.895 μm	4.24	18.5	推成多标扫像空目成扫像目推成、间标像		
	高分 02A星	_	2019- 11-13	535	全色 多光谱	-	4	1:0.45—0.70 μm 1:0.45—0.51 μm 2:0.51—0.58 μm 3:0.63—0.69 μm 4:0.77—0.895 μm	0.75 3.0	40	推扫 成像		
珞珈 —号	01卫 星	_	2018- 06-02	645	夜光	3— 5 d	1	0.48—0.80 μm	130	260	夜 光 模式、 日 ズ	社会经济参数估算、区域 发展研究、重 大事件评估 和渔业监测 等领域	高湖数与用心
京师 一号	冰路 卫星	BNU-1	2019- 09-12	739	多光谱	2 d	5	1:0.527—0.769 µm 2:0.471—0.506 µm 3:0.560—0.599 µm 4:0.638—0.676 µm 5:0.751—0.773 µm	80	745	推扫成像	极地气候与环 境观测	京一数 引系
					全巴		1	0.45—0.70 μm	8	25			

GF-1是中国高分专项首颗卫星,于2013-04-26 发射升空(白照广,2013)。卫星搭载4个4谱段 多光谱相机、2个2m全色和8m多光谱相机,分 别提供幅宽800km、16m分辨率的多光谱影像数 据,和幅宽60km、2m的全色和8m的多光谱影 像数据。GF-1卫星突破了高空间分辨率、多光谱 与高时间分辨率结合的光学遥感关键技术(陆春 玲等,2014),主要应用于矿产资源调查与监测、 土地利用动态监测、地质灾害监测、水环境、大 气环境和生态环境监测、农作物长势监测与估产、 城乡规划、水资源和林业资源调查、防灾减灾等 领域(Lu和Bai,2015)。

GF-2是中国第一颗亚米级高分辨率民用光学 遥感卫星,于2014-08-19发射升空,标志着中国 遥感卫星进入亚米级"高分时代"(潘腾,2015; Huang等,2018)。卫星搭载有两台1m全色和4m 多光谱相机,空间分辨率可达到0.8m,主要用于 地质解译、地质灾害调查、矿山开发监测、土地 利用监测与变更调查、城乡建设管理、路网规划 与灾害应急、道路基础设施监测、森林资源调查、 林业生态工程与灾害监测等领域。

GF-3是中国首颗空间分辨率达到1m的C频 段多极化合成孔径雷达成像卫星,于2016-08-10 发射升空(Sun等,2017)。GF-3也是世界上成像 模式最多的雷达卫星,不仅涵盖条带、扫描成像 模式,而且可以自由切换至聚束、全球观测、高 低入射角等12种成像模式,实现"一星多用"的 效果(张庆君,2017)。GF-3获取的微波遥感信 息可用于地表土壤水分监测、地质灾害预测预警、 流域水系特征、地表水分布、洪涝范围、土地利 用、植被覆盖等重要领域,同时可以服务于海洋 应用如海浪、海面风场、海洋内波、浅海水下地 形、海面溢油、海冰和海面目标等(刘杰和张庆 君,2018)。

GF-4是中国首颗、世界上分辨率最高的地球 同步轨道高分辨率遥感卫星,于2015-12-29发射 升空。GF-4卫星上搭载1台50m的全色/多光谱相 机和1台400m的中波红外面阵相机,地球同步轨 道高度为36000km,能够实现对同一区域的持续 观测(练敏隆等,2016)。GF-4卫星获取的影像 数据能够实现水体、堰塞湖、云系、林地、森林 火点和气溶胶厚度等识别与变化信息提取,主要 用于防灾减灾、气象、地震、林业和环保等领域 (王殿中和何红艳,2017)。

GF-5是中国首颗高光谱卫星,于2018-05-09 发射升空,搭载包括可见短波红外高光谱相机 和全谱段光谱成像仪在内的6台载荷(孙允珠 等,2018)。GF-5卫星运行于太阳同步轨道, 其中可见短波红外高光谱相机获取330个谱段 (400—2500 nm)、30m分辨率、60 km幅宽的高光 谱影像数据,主要应用于水体和生态环境监测、 固体废弃物遥感、重大工程和环境事故遥感监测、 油气资源调查和地质填图等领域(刘银年, 2018)。

GF-6是中国首颗精准农业观测的低轨光学遥 感卫星,又称"高分陆地应急监测卫星",于 2018-06-02 日发射升空。GF-6 卫星搭载1台2m 全色/8m多光谱高分辨率相机和1台16m多光谱中 分辨率宽幅相机,并且首次增加"红边"波段以 反映作物特有光谱特性。GF-6与GF-1卫星组网运 行,主要服务于农业农村、自然资源、应急管理、 生态环境等行业领域应用(刘晋阳等, 2019)。

GF-7是中国高分系列卫星中测图精度要求最高的科研型卫星,于2019-11-03发射升空(Tang等,2020)。GF-7搭载双线阵立体相机和激光测高仪等有效载荷,突破了亚米级立体测绘相机技术,能够获取高空间分辨率光学立体观测数据和高精度激光测高数据(刘建军等,2018)。GF-7卫星能够实现民用1:10000比例尺卫星立体测图,满足中国基础测绘、全球地理信息保障、城乡建设监测评价、农业调查统计等高精度立体测绘的数据需求。

2.3 环境/实践系列卫星

环境/实践系列卫星包括环境系列卫星和实践 九号卫星。环境系列卫星是中国专门针对环境和 灾害监测的对地观测系统。

"环境一号 A/B 卫星"(代号 HJ-1A/B),于 2008-09-06发射升空(王桥等, 2010)。HJ-1A 卫星搭载一台30m宽幅CCD相机与的中国首个 100 m分辨率的高光谱相机,幅宽分别为700 km和 50 km。HJ-1B卫星搭载一台30 m CCD 相机与150 m 的红外多光谱相机,幅宽分别为700 km和720 km。 "环境一号C星"(代号HJ-1C)于2012-11-19发 射升空。星上搭载S波段合成孔径雷达,具有条带 和扫描两种工作模式,成像宽度分别达到40km和 100 km (张润宁和姜秀鹏, 2014)。HJ-1卫星的主 要任务是大范围、全天候、全天时动态监测环境 污染、生态破坏和自然灾害,预测发展变化趋势 并做到快速科学评估,为紧急救援、灾后救助与 重建工作提供强有力的数据支撑(Wang等, 2010)。HJ-1A/B/C卫星设计寿命3年,目前仍在 运行。

"实践九号 A/B 卫星"(代号 SJ-9A/B) 是民 用新技术试验卫星系列规划中的首发星,于 2012-10-14在太原发射中心成功发射(文强等, 2013)。SJ-9A 卫星搭载一个 2.5 m 全色多光谱相机 和 10 m 的红外相机,幅宽为 30 km。SJ-9A/B 卫星 主要用于卫星长寿命高可靠、高精度高性能,国 产核心元器件和卫星编队及星间测星与链路等试 验,获取的遥感影像数据可用于国土资源调查与 监测、农业、林业、水利、城乡建设、环境保护 和防灾减灾等领域。

2.4 小卫星系列

中国的小卫星系列主要包括"北京"系列、 "天绘一号"系列、"高景一号"卫星星座、"珠海 一号"卫星星座、"吉林一号"卫星星座、"珞珈 一号"和"三极遥感星座观测系统"。

"北京一号"(代号BJ-1)小卫星及运营系统 是国家发展计划支持的科研成果,于2005-10-27 成功发射(冉琼等,2009)。卫星搭载4m全色相 机与32m多光谱相机,可以实现600km幅宽的大 幅成像。BJ-1卫星主要用于灾害监测与评估、植 被调查、农业和测图等领域。卫星设计寿命5年, 于2010-10-27圆满完成预定任务,2012年退役。 2015-07-11,"北京二号"(代号DMC3)小卫星发 射,包括3颗1m全色、4m多光谱的光学遥感卫 星,设计寿命7年(唐尧等,2019)。中国二十一 世纪空间技术应用股份有限公司承担卫星星座在 轨任务测控、卫星数据接收等运行管理,并组织 数据产品生产和提供对地观测服务。DMC3的卫星 遥感数据是中国民用遥感卫星体系和自主数据源 的有益补充,主要用于全球资源环境调查、城市 规划和智能管理及灾害监测等领域。

"天绘一号"(代号TH-1)系列卫星是中国第 一代光学遥感立体测绘卫星,由3颗卫星组成。天 绘一号01星、02星和03星分别发射于2010-08-24、 2012-05-06和2015-10-26,并成功组网运行(李 岩等,2012;Wang等,2017)。该星由航天东方 红卫星有限公司研制,星上搭载三线阵CCD相机、 2m全色相机、10m多光谱相机和5m三线阵全色 立体相机。中国天绘卫星中心负责天绘系列卫星 及地面应用系统的运行控制、数据接收处理和应 用服务。天绘一号卫星的主要任务为获取全球范 围内立体、多光谱和高分辨率影像信息,测制全 球地区1:5万比例尺地图,修测1:2.5万比例尺地 图,为中国国土资源调查、地图测绘等应用提供 科学数据(王蓉等,2014)。

"高景一号"(代号SuperView-1)系列卫星是

中国首个商业化运营的 0.5 m 高分辨率遥感卫星 星座。SuperView-1的 01/02 卫星于 2016-12-28 成 功发射,03/04 星于 2018-01-09 发射至同一轨道, 4颗卫星已成功组网运行,具备全球范围内任意目 标1d内重访的能力(Wang等,2018)。4颗卫星 的设计技术指标和配置状态基本一致,每颗卫星 承载1台高分辨率全色多光谱相机,可提供 0.5 m 全色和2 m多光谱,拼接幅宽大于 60 km 的高分辨 率影像。Superview-1 卫星由航天东方红卫星有限 公司制造,由北京航天世景信息技术有限公司负 责全球商业运营,为全球用户提供遥感数据服务 和应用系统解决方案,以及针对国土资源调查、 测绘、环境监测、金融保险和互联网行业的增值 服务。

"珠海一号"是由珠海欧比特宇航科技股份有 限公司发射并运营的商业遥感微纳卫星星座 (Jiang等, 2019)。整个星座由 34 颗卫星组成, 包括视频卫星、高光谱卫星、雷达卫星、高分光 学卫星和红外卫星,将实现全天时、全天候、无 障碍地获取遥感数据,形成全天候对地观测能力, 目前已发射12颗卫星。01组于2017-06-15发射升 空,包含2颗视频卫星(代号为OVS-1A和1B), 光学分辨率为1.98 m,具有凝视成像和条带成像两 种工作模式。02组卫星于2018-04-26发射升空, 包含4颗高光谱卫星OHS-01/02/03/04和1颗高分 辦率视频卫星OVS-2; OHS高光谱卫星的波段可 达256个,覆盖范围400—1000 nm,幅宽150 km。 03 组卫星于 2019-09-19 发射升空, 包含 4 颗高光 谱卫星和1颗0.9m分辨率的视频卫星,联合02组 卫星实现国内首次高光谱卫星组网运行,能够实 现2d半覆盖全球、对特定区域1d重访,大幅度 提高采集高光谱遥感数据的能力。"珠海一号"星 座的高光谱遥感数据能够为海洋监测、农业生态 环境监测、土地荒漠化监测、林业监测、资源分 布与调查、水资源环境动态监测、减灾应急、环 境综合监测管理、智慧城市和金融保险等领域提 供数据支撑。

"吉林一号"(代号JL-1)是由长光卫星技术 有限公司发射并运营的光学遥感卫星星座,计划 通过两个阶段建设成为一个高时间分辨率、高空 间分辨率的包含近200颗卫星的遥感信息获取平台 (李贝贝等,2018)。目前在轨14颗遥感卫星,包

括8颗高分辨率视频卫星、2颗高分辨率光学卫星, 2颗光谱卫星和1颗技术验证卫星。2015-10-07 "吉林一号"一箭4星发射,包括1颗光学A星、2颗 灵巧视频星以及1颗灵巧验证星。光学A星搭载 0.72 m 全色和 2.88 m 多光谱相机,幅宽为 11.6 km; 灵巧视频星的空间分辨率为1.13 m, 具备获取4 K 高清彩色视频影像能力;灵巧验证星的空间分辨 率为4.7 m, 主要完成多重成像技术及国产高敏度 CMOS芯片验证:视频03星可以获取分辨率0.92m 的彩色视频。2017-01-09视频卫星03星(林业一 号)发射升空; 2017-11-21视频卫星04、05和06星 (佐丹力159吉林一号)发射升空; 2018-01-19, 视频07星(德清一号)和08星(林业二号)发射 升空。视频卫星兼具视频成像和光学推扫两类成 像模式,空间分辨率优于1m,幅宽大于11km, 还可获取亚米级静态图像,幅宽大于13 km (Xiao 等, 2018)。2019-01-21"吉林一号"光谱 01星(吉林林草一号)和02星(文昌超算一号) 发射升空,搭载多光谱成像仪、短波红外、中波、 长波红外相机等载荷,可以获取5m分辨率、26个 波段、幅宽110 km的遥感影像数据。2019-06-05 "吉林一号"高分03A卫星发射升空,获取分辨率 优于1.1 m、幅宽大于18 km的高分辨率影像数据。 2019-11-13"吉林一号"高分02A卫星发射升空, 获取0.75 m全色和3 m多光谱数据,与此前的13颗 卫星组网运行。"吉林一号"卫星星座将为国土资 源监测、林业普查、环境保护、交通运输和防灾 救灾等重要领域提供信息支持服务。

"武汉大学珞珈一号科学实验卫星"(代号 LJ-1)是由武汉大学牵头,联合长光卫星技术有 限公司研制的夜光遥感卫星(Li等,2019a)。珞 珈一号01卫星发射于2018-06-02,是世界上第一 颗兼具遥感和导航功能的"一星多用"低轨微纳 科学实验卫星,也是全球首颗专业夜光遥感卫星。 卫星提供130m分辨率、幅宽250km的夜光影像 数据,优于美国国防气象卫星和国家极轨环境卫 星系统预备计划卫星。夜光影像数据由高分辨率 对地观测系统湖北数据与应用中心负责数据管理 与分发,主要应用于社会经济参数估算、区域发 展研究、重大事件评估和渔业监测等领域(钟亮 和刘小生,2019; Jiang 等,2018)。

"京师一号卫星"(代号 BNU-1),又称"冰路 卫星",由北京师范大学发起,由中国科学技术部 和北京师范大学共同投资,由深圳航天东方红海 特卫星公司研制。BNU-1卫星于2019-09-12发射 升空,是中国"三极遥感星座观测系统"的第一 颗试验卫星,也是中国首颗极地观测遥感小卫星。 BNU-1卫星搭载一台分辨率80m、幅宽745 km的 多光谱相机和一台分辨率80m、幅宽25 km的光学 相机。卫星入轨后将由南方海洋科学与工程广东 省实验室(珠海)负责运行,数据将用于极地气 候与环境观测,包括航道海冰漂移和冰架崩解等, 能够有效弥补中国长期自主极地观测数据的短缺, 对于促进中国极地与全球变化研究具有重要意义。

其他小卫星包括灵鹊-1A、潇湘一号卫星、铜 川一号卫星和宁夏一号等。灵鹊-1A星是由北京零 重空间技术有限公司灵鹊星座规划的首发验证星, 具有对地观测和视频成像等功能。潇湘一号卫星 是由长沙天仪空间科技研究院有限公司研制的技 术试验卫星,其中03星主要用于验证无线电通信 及开展小型遥感试验。

3 气象遥感卫星

气象遥感卫星是地球观测卫星系统的重要组成部分,主要探测大气层要素变化,获取全球、 全天候、三维、定量、多光谱的大气、地表和海 表特性参数,服务于中国气象、水文、农业、自 然灾害、海洋等诸多领域(杨忠东等,2013; Zhang等,2019)。

中国气象遥感卫星的自主研发工作始于 1977年。1988年,中国成功发射风云一号(代号 FY-1)A星,揭开了中国气象卫星遥感的新篇章。 经过数十年的发展,中国先后成功发射了风云一号 (FY-1)、风云二号(FY-2)、风云三号(FY-3) 和风云四号(FY-4)系列的17颗气象卫星,包括 8颗极轨气象卫星和9颗静止轨道气象卫星,实现 了从试验应用型到业务型的成功转变(杨军等, 2018;卢乃锰和谷松岩,2016)。中国目前是世界 上少数同时具有极轨和静止轨道两个系列业务气 象卫星的国家之一,同时还在研发晨昏轨道气象 卫星,以进一步完善和丰富现有的气象卫星观测 体系(唐世浩等,2016)。

按照轨道类型和功能定位差异,中国气象遥 感卫星可以分为太阳同步极地轨道(简称"极 轨")卫星、地球静止轨道(简称"静轨")气 象卫星和其他气象卫星3大类。在轨运行的气象卫 星共有10颗,包括3颗极轨卫星、5颗静轨卫星, 2颗试验卫星GF-5卫星和碳卫星。中国"高分" 专项中的GF-5卫星搭载了4个大气传感器,能够 探测温室气体和气溶胶等大气成分(熊伟, 2019);碳卫星(代号Tansat)能够监测全球二氧 化碳浓度、反演植被叶绿素荧光等。在轨运行的 气象遥感卫星的具体参数如表2所示。

	表2	在轨运行的中国气象遥感卫星主要参数一览表
Table 2	Mai	n parameters of China in-orbit meteorological satellites

系列	卫星 名称	代号	发射 时间	轨道高 度/km	传感器	重访 周期	波段 数	波谱或 频率范围	空间分 辨率/m	幅宽/ km	工作 模式	用途	获取 途径
					可见光红外 扫描辐射计		10	0.43—12.5 μm	1100	1100	跨轨 扫描	云、可见光、雪、 地表温度、海表 温度、气溶胶、 叶面积指数等	
					中分辨率成 像光谱仪	-	20	0.402—12.5 μm	250— 1000	2800	绕轴 旋转	地表辐射、高分 辨率植被指数、 陆地覆盖类型、 海洋水色、气溶 胶、大气可降水	-
					红外分光计	-	26	0.69—14.95 μm	17000	2250	跨轨 扫描	大气温度资料、 湿度资料	-
					微波温度计		4	50—57 GHz	62000	2200	跨轨 扫描	大气温度	_
					微波湿度计		5	150—183 GHz	16000	2700	跨轨 扫描	大气湿度	
极轨 卫星	风云 二号 B星	FY- 3B	2010-	836	微波成像仪	- 5.5 d	10	10.65—89 GHz	9000— 85000	1400	圆锥 扫描	降水和云水、大 气可降水、海平 面温度和风速、 土壤湿度和温 度、雪盖	- 国家卫星 气象中心
系列	-				紫外臭氧垂 直探测仪	-	12	252—340 nm	50000	200	仅天线 视图	垂直臭氧资料	
					紫外臭氧总 量探测仪	-	6	308—360 nm	50000	3000	跨轨 扫描	臭氧总量	-
					太阳辐射监 测仪	-	1	0.2—50 μm	_	_	北极区 域观测 太阳 (非跟 踪)	太阳常数	-
					地球辐射探 测仪	-	2	0.2—4.3 μm 0.2—50 μm	28000	2300	视场观 测模式	反射太阳辐射 通量、OLR	-
					空间环境检 测器	-		电子:0.25-2.0 MeV;质子:6.4 -38 MeV; α粒子:15-60 MeV;电子温度: 0-1 eV; 电子密度:10- 10 ⁶ e/cm ³			跟随轨 道量测	高能粒子	-

	コ目		华卧	劫送宣		重法	油印	がおき	云同厶	恒守/	工作		续表
系列	卫星 名称	代号	反射时间	轨坦尚 度/km	传感器	里切周期	数	波谱或 频率范围	至间分 辨率/m	ా 帕 宂/ km	工作 模式	用途	获取 途径
					可见光红外 扫描辐射计	_	10	0.43—12.5 μm	1100	2800	跨轨 扫描	云图、植被、泥 沙、卷云及云相 态、雪、冰、地表 温度、海表温 度、水汽总量	
					红外分光计		26	0.69—14.95 μm	17000	2250	跨轨 扫描	大气温、湿度廓	
					微波温度计	_	13	50—60 GHz	32000	2200	跨轨 扫描	 - 线、O₃总含量、 CO₂浓度、气溶 胶、云参数 极 	
					微波湿度计	-	15	89—183 GHz	16000/ 32000	2700	跨轨 扫描	地冰雪、降水等	
	C 星				微波成像仪	-	10	10.65—89 GHz	9000— 85000	1400	圆锥 扫描	雨 率 、云 含 水 量 、水 汽 总 量 、 土 壤 湿 度 、海 冰 、海 温 、冰 雪 覆盖等	
		FY-	2013-	826	中分辨率光 谱成像仪	-	20	0.402—12.5 μm	250— 1000	2800	绕轴 旋转	海洋水色、气溶 胶、水汽总量、 云特性、植被、 地面特征、表面 温度、冰雪	
	し生	3C	09-23	830	紫外臭氧垂 直探测仪	- 5.5 d	12	252—340 nm	50000	200	天线 视图	03垂直分布	
					紫外臭氧总 量探测仪	_	6	308—360 nm	50000	3000	跨轨 扫描	0 ₃ 总含量	
					地球辐射探 测仪	_	2	0.2—50 μm 0.2—4.3 μm	28000	2300	跨轨 扫描	地球辐射	
					太阳辐射监 测仪	_	1	0.2—50 μm	—	—	—	太阳辐射	
					空间环境监 测器		_	电子:0.25—2.0 MeV;质子:6.4 —38 MeV; α粒子:15—60 MeV;电子温度: 0—1 eV; 电子密度:10— 10 ⁶ e/cm ³	_	_	_	卫星故障分析 所需空间环境 参数	
					全球导航 卫星掩星 探测仪	_	_	_	_	_		大气密度廓线、 大气温度廓线、 大气折射率廓 线、低层大气湿 度廓线、电子密 度廓线	
	D星	FY- 3D	2017- 11-15	836	中分辨率成 像光谱仪	5.5 d	25	0.402—12.5 μm	250— 1000	2800	跨轨 扫描	气溶胶、云和陆 地表面特性、海 表特性和低层 水汽	

														续表
系列	卫 名	星 称	代号	发射 时间	轨道高 度/km	传感器	重访 周期	波段 数	波谱或 频率范围	空间分 辨率/m	幅宽/ km	工作 模式	用途	获取 途径
						微波成像仪	_	10	10.65—89 GHz	9000— 85000	1400	圆锥 扫描	雨、云和大气中 水汽含量、植 被、土壤湿度、 海温、海冰、雪 覆盖及海面油 污分布	
						微波温度计	-	13	50—60 GHz	32000	2200	跨轨 扫描	大气温度	
						微波湿度计	-	15	89—183 GHZ	16000/ 32000	2700	跨轨 扫描	大气湿度垂直 分布、水汽含 量、云中液态水 含量、降水等	
						红外高光谱 大气探测仪	-	1370	3.92—15.39 μm	16000	2250	跨轨 扫描	大气温度、湿度 廓线分布	
					近红外高光 谱温室气体 监测仪	-	4	0.75—2.38 µm	10000	_	垂直观 测、指 向太阳	全球主要温室 气体CO ₂ ,CH ₄ 以 及CO等气体柱 总量		
					广角极光 成像仪	-	_	115—180 nm 427.8—630 nm	10000/ 300000	_	扫描 成像	极 光 椭 圆 区 域 的光强分布		
					电离层光 度计	-		3—100 keV	80000		跨轨 扫描	反 演 电 离 层 电 子总含量		
				空间环境监 测器	-		电子:0.25-2.0 MeV;质子:6.4 -38 MeV; α粒子:15-60 MeV;电子温度: 0-1 eV;电子密 度:10-10 ⁶ e/cm ³		_	现场 测量	卫星轨道空间 的高能电子、质 子和重离子			
					全球导航卫 星掩星探测 仪	-		_	300000 ×500	710	临边 扫描	大气折射率、温 度、压力、湿度等 大气物理量及 电离层电子密 度等物理参数		
		E星	FY-2E	2008- 12-23		扫描辐射计		5	1: 0.55—0.99 μm 2: 10.3—11.3 μm 3:11.5—12.5 μm 4: 6.3—7.6 μm 5: 3.5—4.0 μm	可见			白天可见光云图	
静轨 卫星	风云 二号	F星	FY-2F	2012- 01-13	35786		- 实时		电子:0.15—1.0 MeV;质子:0.85	1250; 其他: 5000		立体 成像	昼夜红外云图和水气分布图	
		G星	FY-2G	2014-12-31	-	空间环境监 测器		_	—400 MeV; α粒子:3.8—	5000	—			
	_	H星	FY–2H	2018- 06-05					500 MeV					

	卫星	/h 🛏	发射	轨道高	14	重访	波段	波谱或	空间分	幅宽/	工作		获取
系列	名称	代号	时间	度/km	传感器	周期	数	频率范围		km	模式	用途	途径
	风云四号 A 星	FY- 4A	2016- 12-11	35786	多通道扫描 成像辐射计	实时	14	1:0.45—0.49 μm 2:0.55—0.75 μm 3:0.75—0.90 μm 4:1.36—1.39 μm 5:1.58—1.64 μm 6:2.1—2.35 μm 7:3.5—4.0 μm (high) 8:3.5—4.0 μm (low) 9:5.8—6.7 μm 10:6.9—7.3 μm 11:8.0—9.0 μm 12:10.3—11.3 μm 13:11.5—12.5 μm 14:13.2—13.8 μm	可见 近红 外: 500— 1000; 红外: 2000 — 4000		成探垂探如像测直测电	地球云图	
					干涉式大气 垂直探测仪	ί. 	914	1:8.85—14.29 μm 16000/ 大气温度 4 2: 4.44—6.06 μm 2000 度垂直分布 3:0.55—0.75 μm	大 气 温 度 和 湿 度垂直分布				
					闪电成像仪			_	777.4 nm	7800			对云闪、云间 闪、云一地闪在 内的总闪电进 行凝视观测,实 现对雷暴系统 的实时、连续监 测和跟踪
					空间环境监 测仪器	-	_	_	_	_		空间环境和效 应探测	-
		_		_	大气环境红 外甚高光谱 分辨率探 测仪	_	1	2.4—13.3 μm	_		_	南极 8—100 km 内大气成分的 垂直分布和水 平分布、大气监 测和气候变化 研究	
其气 卫	GF-5 卫星	5 GF-5	2018- 05-09	705	大气主要温 室气体监测 仪	大气主要温 1-2 d 室气体监测 1-2 d 文气痕量气 4 大气痕量气 4 水谱仪 大气气溶胶 大气气溶胶 5 多角度偏振 探测仪	4	1:0.759—0.769 μm 2:1.568—1.583 μm 3:1.642—1.658 μm 4:2.043—2.058 μm	_	10.3	天底 穿打点、 海斑	CO ₂ 柱、CH ₄ 柱总 量探测,大气环 境和气候变化	高分辨率 对地观测 系统重大
					大气痕量气 体差分吸收 光谱仪			4	1:0.240-0.315 μm 2:0.311-0.403 μm 3:0.401-0.550 μm 4:0.545-0.710 μm	48000 × 13000	2600	面阵 推扫	平流层 O ₃ 、大 气痕量气体异 常波动和大气 污染
					大气气溶胶 多角度偏振 探测仪		8	1: 0.433—0.453 µm 2: 0.480—0.500 µm (偏振) 3: 0.555—0.575 µm	3.5	1850	沿轨 探测、 穿轨 探测	地表高反射率 下垫面、气溶胶 及云探测	-

													续表
系列	卫星 名称	代号	发射 时间	轨道高 度/km	传感器	重访 周期	波段 数	波谱或 频率范围	空间分 辨率/m	幅宽/ km	工作 模式	用途	获取 途径
								4: 0.660—0.680 µm (偏振) 5: 0.758—0.768 µm 6: 0.745—0.785 µm 7: 0.845—0.885 µm (偏振) 8: 0.900—0.920 µm					
							1024	0.758—0.776 μm	2000	20	天模耀模目#	些 测 今 球 一 氨	
					高光谱温室 气体探测仪		512	1.594—1.624 μm	2000			血肉 主 坏 二 氧 化碳浓度、反 演植被叶绿素	
	碳卫星	TanSat	2016- 12-22	712		16 d	512	2.041—2.081 μm	2000		検工、 掩星 模式	<u></u>	国家卫星 气象中心
					云和气溶胶 偏振成像仪	-	5	1: 0.359—0.402 μm 2: 0.645—0.695 μm 3: 0.855—0.885 μm 4: 1.360—1.390 μm 5: 1.630—1.650 μm	250/ 1000	400	极化观测	获取云、气溶胶 信息	

3.1 极轨卫星系列

极轨卫星是通过地球南北极且与太阳同步轨 道的气象卫星,轨道高度一般在650—1500 km, 能够实现长重访周期的全球观测,为中期数值天 气预报、气候诊断和预测、自然灾害和环境监测 等提供有效观测数据。中国的极轨卫星包括FY-1 系列的4颗卫星(FY-1A至D)和FY-3系列的 4颗卫星(FY-3A至D),其中FY-3B、C和D仍然 在轨运行。

FY-1A卫星于1988年9月发射升空,是FY-1 系列的第一颗试验卫星,更是中国首颗气象卫星 (许健民等,2010)。卫星搭载5通道的可见光— 红外扫描辐射仪,主要用于天气预报和植被、冰雪 覆盖、洪水、森林火灾等环境监测,于1988年10 月停止运行。FY-1B卫星于1990-09-03发射升 空,星上搭载了与FY-1A相同的5通道可见光 一红外扫描辐射仪,但获取的可见光云图质量 优于FY-1A,红外图像质量良好,提升了天气预 报等应用的时效性。FY-1B卫星于1991年8月停 止运行。FY-1C和FY-1D卫星分别于1999-05-10 和2002-05-15发射,卫星搭载两台互为备份的10 通道可见光—红外扫描辐射仪(胡秀清等, 2006)。FY-1C和FY-1D卫星提高了探测精度, 能够为天气预测提供高精度资料,二者分别于 2004-06-24和2011年5月停止运行。

作为中国新一代风云极轨气象卫星, 首颗试 验卫星 FY-3A 于 2008-05-07 发射。星上搭载可见 光一红外扫描辐射计、红外分光计、微波温度计、 微波湿度计、中分辨率成像光谱仪、微波成像 仪、地球辐射扫描仪、太阳辐射监测仪、紫外臭 氧垂直探测仪、紫外臭氧总量探测仪和空间环境 检测器,成功解决了3维大气探测难题,大幅度 提高了中国气象卫星的全球资料获取能力(Dong 等, 2009; 张兴赢等, 2015)。FY-3A卫星于 2018年3月停止运行。FY-3B卫星于2010-11-05 发射,搭载与FY-3A相同的大气探测器。FY-3C 于2013-09-23发射,是风云三号系列气象卫星的 首颗业务星,在FY-3A和FY-3B原有探测器的基 础上增加了全球导航卫星掩星探测。FY-3D卫星 于2017-11-15发射,星上共搭载了10个传感器 (Li 等, 2019b)。除微波温度计、微波湿度计、 微波成像仪、空间环境监测仪器包和全球导航卫 星掩星探测仪等5台继承性仪器之外, 红外高光谱 大气探测仪、近红外高光谱温室气体监测仪、广 角极光成像仪和电离层光度计为全新研制和首次 上星搭载,中分辨率光谱成像仪进行了大幅升级 改进,性能显著提升(Wang等,2019)。FY-3D 卫星实现与FY-3A、FY-3B、FY-3C组网运行, 使中国天气预报时效从6小时缩短至4小时。

3.2 静止卫星系列

静止卫星是在赤道上空地球同步轨道的气象 卫星,轨道高度约35000 km,能够实现对地球表 面三分之一的固定区域高频次的气象观测,快速 捕捉天气变化,为中尺度强对流天气的预警和预 报提供服务。中国的静止卫星包括FY-2系列的 8颗卫星(FY-2A至H)和FY-4系列的1颗卫星 (FY-4A)。

作为中国第一代静止气象卫星,第一颗试验 卫星 FY-2A 于 1997-06-10 发射升空。FY-2A 搭载 了三通道的扫描辐射计,于1998年4月停止运行。 FY-2B于2000-06-25发射,于2006年2月停止运 行。FY-2A和FY-2B为后续静止气象卫星的研制 积累了大量经验。FY-2C是中国第一代静止卫星 的首颗业务卫星,于2004-10-19发射。FY-2C 卫星搭载了5个通道的扫描辐射计和空间环境监 测器,其数据量化等级增加到10 bit,于2009年 11月停止运行。FY-2D于2006-12-08日发射,与 FY-2C星形成双星组网观测。卫星的单天获取云 图能力增加至96次,实现了15 min的高精度观测, 于2015年7月停止运行。FY-2E卫星于2008-12-23 发射升空,改进了云图杂散辐射,能够获取白天 可见光云图、昼夜红外云图和水气分布图,收集 其他平台的气象数据来监测太阳活动和轨道空间 环境,目前在轨运行。FY-2F卫星于2012-01-13 发射,星上搭载了扫描辐射计和空间环境监测器。 扫描辐射计包括1个1.25 km分辨率的可见光和4个 5 km分辨率的红外通道,目前在轨运行。FY-2G 卫星于2014-12-31发射,星上搭载了与FY-2F相 同的扫描辐射计和空间环境监测器,设计寿命从 3年增加到4年,同时也提高了观测精度,目前在 轨运行。FY-2H卫星于2018-06-05发射,星上搭 载了扫描辐射计和空间环境监测器。该卫星能够 提供实时云图及晴空大气辐射、云导风、沙尘等 数十种遥感产品,为全球数值天气预报、灾害预 警和环境监测等提供参考资料,目前在轨运行。

FY-4A 是中国第二代静止气象卫星,于 2016-12-11发射,搭载了多通道扫描成像辐射计、

干涉式大气垂直探测仪、闪电成像仪和空间环境 监测仪等多种探测仪(张志清等, 2017)。多通道 扫描成像辐射计包含14个通道(6个可见/近红外 波段、2个中波红外波段、2个水汽波段和4个长 波红外波段),能够实现分钟级的区域快速扫描 (Zhang等, 2018)。干涉式大气垂直探测仪是国 际上第一台在静止轨道上以红外高光谱干涉分光 方式探测3维大气垂直结构的精密遥感仪器,通道 数高达1650个,空间分辨率为16km,利用迈克尔 逊干涉分光方式观测不同谱段的红外辐射,获取 大气温度和湿度的垂直分布并服务于气象预(Di 等,2018)。闪电成像仪为中国首次研制,采用 CCD 面阵和光学成像技术,能够凝视观测区域内 的总闪电包括云闪、云间闪和云一地闪,实时连 续监测和跟踪雷暴系统,用于强对流天气监测、 民航、铁路和电力等行业领域(梁华等, 2017)。 空间环境监测仪包含高能粒子探测器、磁强计和 空间天气效应探测器。

3.3 其他气象卫星

其他用于大气环境监测和气象服务的遥感卫 星主要包括GF-5卫星和碳卫星。

GF-5卫星是中国"高分"专项的重要组成部分,搭载了4台大气载荷,包括大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪、大气主要温室气体监测仪、大气痕量气体差分吸收光谱仪、大气气溶胶多角度偏振探测仪(Zhou等,2019)。GF-5卫星能够探测CO₂、CH₄、O₃、NO₂、SO₂等大气成分的总量及其空间分布,满足大气环境监测和气候变化的研究需求(Zhao等,2017;赵敏杰等,2019)。

碳卫星(代号 TanSat)于 2016-12-22 发射, 是中国自主研制的首颗全球大气二氧化碳观测科学 实验卫星(Ran 和 Li, 2019; 王思恒等, 2019)。 TanSat 卫星搭载了高光谱二氧化碳探测仪和多谱段 云与气溶胶探测仪,监测精度优于4 ppm,能够提 供超高光谱分辨率数据,用于监测全球大气中 CO₂ 浓度和植被叶绿素荧光信号,进而估算全球植被 光合生产力,提升全球碳源汇观测能力(Du 等, 2018)。

4 海洋遥感卫星

海洋遥感卫星主要观测海面风场、浪高、海 流、海面高度、海面温度、盐度及海洋水色等环 境参数,为中国海洋权益维护、海域管理使用和 海洋生态环境保护等提供技术服务(Pan等, 2009;林明森等,2019)。

中国从1985年开始海洋遥感卫星的立项论证, 编制了《中国海洋卫星及卫星海洋应用发展规 划》,指出要发展海洋水色环境、海洋动力环境和 海洋监视监测3个系列的海洋遥感卫星系统(张庆 君和赵良波,2018;林明森等,2019)。海洋水色 环境系列卫星海洋一号(HY-1)获取中国近海和 全球海洋水色水温及海岸带变化信息。海洋动力 环境系列卫星海洋二号(HY-2)用以全天时、全 天候获取中国近海和全球海面风场、海面高度、有 效波高和海面温度等海洋动力环境信息。海洋监视 监测系列卫星海洋三号(HY-3)用以监视海岛、 海岸带和海上目标,获取海面浪场、风暴潮漫滩、 内波、海冰和溢油等信息(蒋兴伟等,2016)。

经过多年的发展,中国已经发射了海洋水色环

境卫星海洋一号(HY-1)系列中的A、B和C3颗 试验卫星,海洋动力环境卫星海洋二号(HY-2) 系列中的A和B两颗试验卫星,海洋监视监测卫星 海洋三号(HY-3)中的首颗试验卫星(林明森 等,2019)。HY-1和HY-2卫星数据由国家卫星海 洋应用中心负责管理和分发。同时,中国积极与 法国合作发射中法海洋卫星(CFOSAT),吸收法 国海洋波谱探测方法和工程实践的丰富经验,提 升中国海浪谱测量的技术水平(陈连增和雷波, 2019)。此外,2019年,中国发射了极地观测遥感 小卫星 BNU-1,也能用于极地区域的航道海冰漂 移和冰架崩解等。

在轨运行的海洋遥感卫星共7颗,包括2颗海 洋水色环境卫星HY-1B和C、2颗海洋动力环境卫 星HY-2A和B、海洋监视监测试验卫星GF-3(参数 见表1)、中法海洋卫星CFOSAT和小卫星BNU-1。 各个系列海洋卫星的具体参数见表3所示。

	Table 3 Main parameters of China in-orbit marine satellites													
系列	卫星	星名称 代号		发射 时间	轨道高 度/km	传感器	重访 周期	波段 数	波谱或频率范围	空间分 辨率/m	幅宽/ km	工作 模式	用途	获取途径
									1:0.402—0.422 μm					
									2:0.433—0.453 μm					
									3:0.48—0.50 μm					
									4:0.51—0.53 μm					
						水色	1 d	10	5:0.555—0.575 μm	1100	_			
			HY-1B			扫描仪			6:0.66—0.68 μm					
		B星		2007-	798				7:0.74—0.76 μm			推扫		
				04-11	,,,,,				8:0.845—0.885 μm			成像		
									9:10.30—11.40 μm					
					=				10:11.40—12.50 μm				获取中国䜣	
水色 环境	海洋 一号								1:0.433—0.453 μm				海和全球海	国家卫星
							多光谱	7 d	4	2:0.555—0.575 μm	250	500		洋水色水温
系列						成傢仪			3:0.655—0.675 μm				及海岸带动	中心
卫星									4:0.675—0.695 μm				态变化信息	
									1:0.402—0.422 μm					
									2:0.433—0.453 μm					
									3:0.48—0.50 μm					
				2010		したしに			4:0.51—0.53 μm			+8-+		
		C星	HY-1C	2018-	782	水巴水温	1 d	10	5:0.555—0.575 μm	1100	2900	推扫		
				09-07		扫抽仪			0:0.00-0.08 μm			风豚		
									/:0./3—0.//μm					
									9.10.30—11.30 μm					
									10.11.50—12.50 µm					
									10,11.00 12.00 µm					

表3 在轨运行的中国海洋遥感卫星主要参数一览表

														续表							
系列	卫星	名称	代号	发射 时间	轨道高 度/km	传感器	重访 周期	波段 数	波谱或频率范围	空间分 辨率/m	幅宽/ km	工作 模式	用途	获取途径							
						海岸带 多光谱 成像仪	3 d	4	1:0.42—0.50 µm 2:0.52—0.60 µm 3:0.61—0.69 µm 4:0.76—0.89 µm	50	950										
						紫外 成像仪	1 d	2	1:0.345-0.365 2:0.375-0.395	550	2900										
		▲目	▲星	▲星	A 足	A 早	НУ-24	2011-		雷达 高度计		2	1:13.58 GHz 2:5.25 GHz	2000	2		监测海洋动				
		11 1	111 221	08-16	_	微波 散射计		1	1:13.256 GHz	50000	1700		力环境,获得 包括海面风								
动力 环境 系 卫 星	动力 环境 海洋 系列 二号 卫星	B 星	B 星	B 星	B 星	B星	B星	B 星	B 星	HY-2B	2018- 10-25	971	扫描微波 辐射计	苗微波 14 d 射计	5	1:6.6 GHz 2:10.7 GHz 3:18.7 GHz 4:23.8 GHz 5:37.0 GHz	25000 100000	25000 — 1600 100000	推扫 成像	场、海面高度 场、有效波 高、海洋重力 场、大洋环流 和海表温度	
						校正微波 辐射计		3	1:18.7 GHz 2:23.8 GHz 3:37.0 GHz	25000 100000			场等重要海 况参数								
其他 海洋 卫星	中法注	每洋	050047	2018-	520	海浪 波谱仪	实时 -	1	13.575 GHz	50000 70000	_	扫描	监测海表面 波浪								
	<u>T</u>	里	CrUSAI	10-29		扇形波束 旋转扫描 散射计		1	13.256 GHz	25000/ 12500	1000	成像)	测 量 海 表 面 风浪								

4.1 海洋水色环境系列卫星

海洋水色环境系列卫星HY-1以在可见光、红 外谱段探测水温为主,遥感载荷为海洋水色扫描 仪和海岸带成像仪,实现中国海域海洋水色环境 要素的大尺度、周期性获取和业务化监测应用。

HY-1A卫星于2002-05-15发射,是中国第一 颗海洋水色探测的试验型业务卫星,主要用于探 测海洋水色环境要素,包括叶绿素浓度、悬浮泥 沙含量、可溶性有机物、水温、污染物以及浅海 水深和水下地形(Pan等,2003)。卫星搭载一台 10波段1100m分辨率的海洋水色扫描仪(2个红 外波段,8个可见光波段),一台是4波段250m分 辨率的CCD成像仪。该卫星成功完成了海洋水色 功能及试验验证,奠定了中国海洋卫星发展的技 术基础,于2004年4月停止工作。

HY-1B卫星于 2007-04-11 发射,是 HY-1A 的后续星。HY-1B 搭载的传感器与 HY-1A 相同,但观测能力和探测精度均有进一步提高。HY-1B

卫星获取海水光学特性、叶绿素浓度、悬浮泥沙 含量、海水温度及污染物,应用于赤潮监测、海 温预报和海岸带监测等领域应用。

HY-1C卫星于2018-09-07发射,星上搭载了 海洋水色水温扫描仪、海岸带成像仪、紫外成像 仪、星上定标光谱仪和船舶自动识别系统5种载荷 (Chen等,2019)。该卫星与后续的HY-1D卫星 组网运行,形成上下午双星组网,用于观测全球 海洋的叶绿素浓度、悬浮泥沙、可溶性有机物等 海洋水色信息,监测海表温度、海冰、海雾和赤 潮等海岸带变化信息。

4.2 海洋动力环境系列卫星

海洋动力环境系列卫星HY-2以主动微波探测 全天候获取面风场、海面高度和海温为主,搭载 微波散射计、雷达高度计和微波辐射计,用于台 风、灾害性海浪、风暴潮、全球海平面变化、海 啸等监测和大洋渔业等(Li等,2018;林明森和 张有广,2018)。 HY-2A是中国第一颗海洋动力环境卫星,于 2011-08-16发射,填补了中国海洋动力环境监测 的空白(Ye等,2015)。卫星集主、被动微波遥感 器于一体,搭载有微波散射计、雷达高度计、扫 描微波辐射计和校正微波辐射计4个微波遥感器和 多普勒测定轨系统、双频GPS和激光测距仪,能 够全天时、全天候、全球连续探测海面风场、海 面高度场、有效波高、海洋重力场、大洋环流和 海表温度场等重要海况参数,为灾害性海况预警 报和海洋科学研究提供实测数据(Liu等,2019)。

HY-2B卫星于2018-10-25发射,搭载有雷达 高度计、微波散射计、扫描微波辐射计、校正辐 射计、数据收集系统和船舶识别系统(Wang等, 2019)。雷达高度计测量海面高度、有效波高和重 力场等参数;微波散射计观测全球海面风场等; 扫描微波辐射计观测海面温度、海面水汽含量、 液态水和降雨强度等参数;校正辐射计为雷达高 度计提供大气湿对流层路径延迟校正服务;数据 收集系统接收中国近海及其他海域的浮标测量数 据;船舶识别系统为海洋防灾减灾和大洋渔业生 产活动等提供服务。HY-2B将与后续发射的海洋 二号C星、D星组网,形成全天候、全天时、高频 次全球大中尺度海洋动力环境卫星监测体系。

4.3 海洋监视监测系列卫星

相比HY-1和HY-2卫星,海洋监视监测系列 卫星HY-3是综合卫星,搭载载荷为多极化、多模 式合成孔径雷达,用以全天候全天时探测海上目 标、重要海洋灾害、全球变化等,满足海洋目标 和海洋环境的实时监测需求。

该系列首颗试验卫星 GF-3 于 2016-08-10 发 射升空,也是中国"高分"专项系统的重要成员 (袁新哲等,2018)。卫星搭载中国首颗1m分辨 率的C频段多极化合成孔径雷达,具备12种成像 模式,能够全方位获取海洋的4种极化信息,完成 典型海洋目标和海洋环境的实时详查任务。

4.4 其他海洋卫星

中法海洋卫星 CFOSAT 由中国和法国联合研制,于2018-10-29 发射(Hauser等,2016a)。卫 星搭载中国提供的扇形波束旋转扫描散射计和法 国提供的海浪波谱仪。扇形波束旋转扫描散射计 时采用扇形波束扫描方式来测量海洋风场的微波 散射计,海浪波谱仪采用六波束真实孔径雷达方 式连续测量全球海面波浪谱,可以与散射计实现 观测角的互补,帮助研究海洋动力环境作用过程 和表面散射特性(Grelier等,2016)。CFOSAT在 世界上首次实现对海洋表面风和浪的大面积、高 精度同步联合观测,能够加强中国对海洋动力环 境变化规律的科学认知,提高对巨浪、海洋热带 风暴、风暴潮等灾害性海况预报的精度与时效, 为海上船只航行安全、全球海洋防灾减灾和全球 海洋资源调查提供安全服务保障(Hauser等, 2016b;徐莹等,2019)。卫星获取的扫描散射计 和生成的数据归中国国家航天局所有,由国家海 洋卫星应用中心负责管理和分发;海浪波谱仪和 生成的数据归法国国家空间研究中心所有。

此外,中国 2019-09-12 发射了 BNU-1 卫星 (又称"冰路卫星"),搭载一台分辨率 80 m、幅 宽 745 km 的多光谱相机和一台分辨率 8 m、幅宽 25 km 的光学相机,用以极地气候与环境监测,包 括航道海冰漂移和冰架崩解等,帮助进一步提升 中国在极地地区的海洋监测能力。

5 地球遥感卫星的发展现状分析

经过数十年的发展,中国地球遥感卫星体系 逐渐走向成熟。陆地、气象和海洋3大遥感卫星系 统,能够为用户提供强有力的数据支撑,整体技 术已经达到了国际先进水平。

陆地遥感卫星系统发展最为迅速, 尤其商业小 卫星的发展突飞猛进。近十年来, 共发射了50多颗 陆地卫星,资源、高分、环境/实践和小卫星4个 系列共同形成较为完整的陆地遥感观测体系。对 比美国和欧洲的陆地遥感卫星系统、中国卫星传 感器数量及类型、空间分辨率和重访周期均处于 国际先进水平,尤其以GF-5和ZY1-02D高光谱遥 感卫星技术等已经处于国际领先。图1和图2为中 国陆地遥感卫星传感器类型、重访周期与空间分 辨率及对应的统计分析结果。目前在轨的陆地卫 星传感器包括全色相机、多光谱相机、红外相机、 高光谱相机、立体相机、合成孔径雷达、视频相 机、夜光相机和激光高度计9种,类型丰富但内部 发展不均衡。多光谱相机和全色相机占比最高, 两者合计超过63%的比例。高光谱相机占比达到 11%,这是由于近两年GF-5和ZY1-02D的成功发 射和欧比特公司的大量商业卫星投入导致该技术 发展迅速。视频相机占比12%,全部来自于商业 小卫星包括欧比特和吉林一号系列。立体相机越 发受到重视,占比5%左右,TH-1A/B/C、ZY-03 和GF-7卫星均有搭载。红外相机占也较低,仅 CBERS-04、GF-4、HJ-1B和SJ9-B共4颗卫星搭 载。合成孔径雷达、夜光相机和激光测高仪传感 器占比最少,合计不超过4%,缺少激光雷达等传 感器。目前仅GF-3和HJ-1C共2颗卫星搭载合成 孔径雷达传感器,LJ-1搭载夜光相机,激光测高 计仅有GF-7卫星搭载。卫星重访周期方面,超过 62.5%的卫星不超过1d(包含组网),其中GF-4卫 星的重访周期高达20s;重访周期小于5d(包含 组网)的陆地遥感卫星占比96.4%;仅SJ9-B和 CBERS-4卫星的重访周期超过5d,分别为8d和 26d。24%的卫星传感器能够获得优于1m的空间分 辨率,其中Superview-1卫星全色影像的空间分辨率 高达0.5m;空间分辨率优于5m的卫星传感器占比 高达60%,88%的陆地遥感卫星传感器具有优于 30m的空间分辨率,仅HJ-1B、LJ-1和GF-4的3颗 卫星传感器的空间分辨率超过100m。



图1 中国陆地遥感卫星传感器的重访周期与空间分辨率分布

Fig.1 Scatter plots of revisiting time and spatial resolutions of China terrestrial observation satellite sensors



Fig.2 Pan charts of sensor types, revisiting time and spatial resolution of China terrestrial observation satellites

进一步,图3展示了中国陆地遥感卫星传感器的波谱范围分布图。可以看出,多数传感器的波 谱范围集中在可见光至近红外波段,热红外波段 较少,且单一波段的光谱范围存在较大重叠。此 外,陆地遥感卫星的轨道高度较为接近,大多分 布在500—780 km,且较为集中,尤其在500 km和 650 km 附近。综上所述,中国在轨的陆地遥感卫 星具有传感器类型丰富、体系较为完整、时空分 辨率高的优点,但也存在传感器发展不均衡、轨 道高度较为接近、同类传感器波谱范围重叠明显 的现状不足。





相比陆地遥感卫星系统,中国气象遥感卫星 系统发展更早且更为成熟,目前已向全球90多个 国家和地区,以及2600多个用户提供风云气象卫 星的资料。目前,中国风云卫星已经形成包含极 轨和静止两大主要类型的气象遥感观测系统,能 够实现多数气象要素的全球范围探测。研发的气 象实验卫星包括 GF-5和碳卫星能够进行气溶胶、 温室气体和大气环境的垂直探测,进一步提升了 中国的大气遥感探测能力。然而,表2可以看出, 中国在轨的气象卫星数量较少,目前仅有8颗业务 卫星,其中3颗卫星 FY-2E/H和 FY-3D 为近两年 发射,部分卫星如 FY-3B和 FY-2E 存在超期服役 问题。相比国外气象卫星观测系统,中国在轨的 气象卫星的探测能力非常全面,能够探测大气温 度、湿度、气压、云、大气成分和空间天气等多 数大气要素,整体技术已经达到自主监测的国际 一流先进水平。然而中国气象卫星尚未具备全要 素探测能力,尤其缺乏大气风场等关键要素的探 测能力。同时,空间分辨率和时间分辨率方面, 在轨气象卫星较难做到同步做到高空间分辨率与 低重访周期(如静止轨道卫星FY-4A),目前无法 满足高时空分辨率的精细探测应用需求。

经过多年的建设,中国海洋遥感卫星系统也 取得了显著进展,已经初步建立海洋水色和海洋 动力环境卫星监测系统,海洋环境的大面积同步 观测逐步走向成熟。水色环境系列卫星HY-1A/B/C 和动力环境卫星HY-2A/B能够分别探测主要水色 参数(如叶绿素浓度、悬浮泥沙含量、海表温度) 和海洋动力环境参数(如海面风场、浪高、海 流)。GF-3卫星能够获取海洋浪场、风暴潮漫滩、

内波、海冰和溢油逆袭, BNU-1卫星能够获取极 地地区的海冰和环境信息。在卫星数量上,中国 海洋遥感卫星现阶段虽已经逐步完善,但由于其 发展起步较晚,目前在轨的海洋卫星共7颗(包含 GF-3和BNU-1)。相比最为全面的美国海洋遥感 卫星系统,中国海洋卫星搭载的微波传感器和主 动传感器偏少,成像光谱仪的光谱波段和光谱分 辨率有待提升。另一方面,在轨的海洋卫星的观 测要素不够全面,无法观测部分关键海洋要素如 海面地形测量、海洋盐度、海洋洋流、海洋冰盖 厚度、海洋重力场和海洋大地水准面等。进一步. 同系列卫星发射间隔时间较长,比如海洋水色环境 系列卫星中HY-1C和HY-1B的时间间隔为11年, 数据服务的连续性有待加强。此外,海洋卫星传 感器的时间和空间分辨率有待提升,目前较难实 现全天候、高精度的海洋环境的精细监测需求, 如海洋赤潮和溢油等的逐日监测。

6 地球遥感卫星的文献研究分析

为进一步分析中国地球遥感卫星的研究现状, 从WOS(Web of Science)收集了核心合集库以及 CNKI中的CSCD库的相关文献,并利用CiteSpace 软件进行数据去重及关键词分析。为尽量保证检 索范围的准确性,WOS的检索条件为(以GF-1卫 星为例):TS=Gaofen-1ORTS=(GF-1AND Satellite)ORTS=(GF1AND Satellite)ORTS= (GF-1AND Remote Sensing)ORTS=(GF1AND Remote Sensing),检索年限范围为1986年—2019年。 CNKI检索关键词选择为(以GF-1卫星为例):主 题=高分一号,检索年限范围不限。经筛选及去重

处理共获得英文SCI期刊文献1241篇,中文CSCD 期刊文献 736 篇。仅对比 2013 年发射的 Landsat-8 卫星(CNKI: 405篇和WOS: 2061篇)和2014年 发射的 Sentinel-1 卫星 (CNKI: 109 篇和 WOS: 559篇)的中英文发文量,发现中国地球遥感卫星 的中英文发文量整体较少,国产遥感卫星研究有 待加强。不同遥感卫星系统的发文量差异较大, 陆地遥感卫星最多,海洋遥感卫星最少。陆地遥 感卫星系统中,资源和高分系列卫星的期刊发文 量最大,尤其是高分系列卫星,占国外总发文SCI 数量的36.5%左右。各个卫星遥感系统(除小卫星 外)的国内外发文比例为1:2,高质量论文大多 发表在国外SCI期刊。气象遥感卫星的国内外期刊 论文失衡率最低, 高分和资源系列陆地卫星的论 文失衡最为严重,尤其ZY-1卫星的国内外论文失 衡比例超过1:7。

进一步,利用CiteSpace软件对收集的英文文献 进行关键词分析(图4),对结果进行聚类(图5), 其中Q=0.4202,S=0.7698,显示聚类结果较为合 理。在此基础上,从文献关键词中提取聚类名称, 结合关键词频次与聚类结果以提取卫星关键词, 总结研究热点。对于文献数量较少的遥感卫星, 直接根据文献提取关键词并总结其研究热点。

资源卫星系列中,资源一号研究热点为影像 分类、影像融合、数据预处理,主要应用于土地利 用情况、森林面积监测以及矿产资源调查。资源二 号的研究热点为与ASTER多光谱影像的融合方法, 主要应用于海岸带的监测管理。资源三号的研究热 点为区域网平差方法精度验证、纹理特征提取和 影像分类,主要应用于测绘以及土地利用分类。

系统	卫星 系列	卫星	WOS (核心合集)	英文关键词	CNKI (CSCD)	中文关键词
陆地遥 感卫星		资源 204 一号 资源 1		classification ; algorithm ; accuracy ; Landsat ; forest ; atmospheric correction ; vegetation	28	土地利用;分类算法;矿产调查;影像 融合;精度评价;归一化植被指数
	资源 系列			coastal reclamation; coastal wetlands; driving factors; coastal management	2	影像融合;小波变换;ASTER多光谱 影像;HIS变换;主成分变换
		资源 三号	164	block adjustment; rational function model; classifica- tion; land cover; built-up area detection	142	区域网平差;严格几何模型;DEM;纹 理特征;分类;建筑物高度
	高分	GF-1	220	classification; model; landsat; algorithm; time series; leaf area index; land cover; fusion	134	面向对象;植被指数;叶面积指数;几 何校正;冬小麦;居民地
	系列	列 GF-2 95		classification; image segmentation; extraction; convolutional neural network; land cover	54	面向对象;影像融合;多尺度分割;影 像分类;城市黑臭水体

表4 中国对地遥感卫星期刊论文数量与关键词的国内外对比分析 Table 4 The comparison between SCI and CKNI Journal papers for China earth observation satellites

						续表
系统	卫星 系列	卫星	WOS (核心合集)	英文关键词	CNKI (CSCD)	中文关键词
		GF-3 91		SAR; algorithm; validation; calibration; ENVISAT; ocean surface; C band; wind; ship detection	48	合成孔径雷达;总体设计;长寿命;海 水养殖;图像质量指标
		GF-4	24	algorithm;land;validation;Landsat 8;surface; cross-calibration;extraction	21	水体;校正精度;海岸带;光谱特征; 舰船运动特征
		GF-5	18	validation ; GOSAT ; XCO_2 retrieval ; retrieval algorithm ; land ; emissivity ; NO_2	25	短波红外;温室气体;气溶胶;大气环 境;遥感反演
		GF-6	1	wide field of view; parameters determination; sensor correction; virtual CMOS	0	_
	环境/	HJ-1	139	leaf area index; classification; land cover; atmospheric correction; MODIS data; time-series; vegetation index	61	太湖;叶绿素a;富营养化;内陆水体; 地表温度;环境指数
	实践 系列	SJ9	2	geometric accuracy improvement; geometric calibra- tion; single-frequency GPS; Kinematic relative posi- tioning; ambiguity fixing		严格成像模型;偏流角;四元数;P-H 算法
		BJ-1	15	vegetation; classification; land cover; wetland; spatial pattern	28	植被指数;土地利用;植被覆盖度;遥 感图像分类;景观格局;融合
		DMC3	2	classification; change detection; convolutional neural networks; SVM; accuracy evaluation	2	高位地灾;金沙江滑坡;灾情监测;白 格堰塞湖;城市人居环境;区域生长
	小卫	TH-1 4		satellite photogrammetry; on–orbit calibration; location accuracy; orbital maneuver detection; rational polynomial coefficients (RPCs)	57	卫星摄影测量;光束法平差;无地面 控制点定位;区域网平差;在轨标定
	星系列	Super- view-1 0		_	1	影像融合;定性评价;定量分析;对象 提取
		珠海 一号	3	hyperspectral; geometric calibration; band-to-band registration; interior orientation determination accuracy; block adjustment	0	—
		LJ-1 12		nighttime light imagery ; population ; light pollution ; human settlement ; geometric calibration	2	导航信号增强;信号质量;夜间灯光; SNPP-VIIRS;应用潜力
		FY-1	3	relativistic electron;solar wind;interplanetary magnetic field;geomagnetic storm;substorm;plasmapause		气象卫星;卫星应用;数据共享
		FY-2	63	63 intercalibration; cloud top height; hurricane; radiometric calibration; water vapor channel		辐射定标;太阳活动;可见光辐射;热 带气旋;云分类
气象遥 感卫星	气象 卫星	FY-3	80	calibration; backscatter ultraviolet; climate; cloud; earth atmosphere	61	微波湿度计;大气臭氧总量;沙尘识 别;秸秆焚烧;人工神经网络
		FY-4	26	sounding;cloudy sky;atmospheric temperature; algorithm	9	图像配准;气象预报;灾害性天气;卫 星平台
		Tansat 23		carbon dioxide; aerosol; retrievalalgorithm; calibration; sensitivity analysis	10	CO ₂ ;气溶胶;光谱分辨率;碳排放;森 林生态系统
		HY-1	6	chlorophyll-a concentration; suspended sediment con- centration; sea ice retrieval; ocean color remote sensing	4	水色水温扫描仪;海面温度;定标;海 洋观测;海洋防灾
海洋遥 感卫星	海洋 卫星	НҮ-2 36		ocean; significant wave height; wind speed; altimeter; brightness temperature	16	有效波高;海面风速;微波辐射计;台风;误差补偿
		CFO- SAT	9	rotating fan-beam scatterometer (RFSCAT); ocean wave spectrometer; wind; sea surface; revisiting orbit	0	_
ŕ	仑文数量			1241		736



图4 GF-1英文关键词(频次≥5) Fig.4 English keywords of GF-1 satellite



图 5 GF-1英文关键词聚类 Fig.5 English keywords clustering of GF-1 satellite

高分系列卫星中,GF-1卫星的研究热点为数 据预处理、数据融合、影像分类、目标识别信息 提取等,主要应用于土地利用动态监测、地质灾 害监测、水环境和大气环境监测、农作物长势监 测与估产、海岸带监测以及矿产资源调查监测等。 GF-2卫星的研究主要在土地利用动态监测、城市 精细化管理、交通路网规划、林业资源调查和建 筑物提取等方面。GF-3卫星的研究热点为图像质 量、目标识别信息提取,主要用于海域使用动态 监测、船只检测和有效波高检测。GF-4卫星的研 究热点为数据预处理与特征提取,集中在海岸带 和水体等区域。GF-5卫星的研究热点为大气气溶 胶、温室气体等环境要素监测。GF-6卫星的研究 集中在影像的预处理。

环境/实践系列卫星中,HJ-1卫星的研究热点 为水体富营养化、大气气溶胶、土地覆盖类型的 监测以及数据预处理。SJ9卫星的研究热点为数据 预处理,主要用于提高卫星的定位精度。

小卫星系列中,BJ-1卫星的研究热点为影像 分类及融合,主要用于重点地区的土地覆盖类型、 景观格局变化检测,包括北京建成区及周边地区、 黄河及淮河上游等流域、渤海海域等,用于反映 城市扩张和生态安全评价。DMC3卫星的研究热点 为影像分类与特征提取,应用于灾情监测、城市 景观格局分析。TH-1卫星的研究热点为定位、平 差方法及精度评价,主要用于地图测绘。 Superview-1卫星的研究热点为影像融合及精度评 价。珠海一号研究热点为数据预处理。LJ-1卫星 的研究热点为卫星导航信号增强技术,以及用夜 间灯光数据反映人类空间活动。

气象遥感卫星系统中,FY-1系列卫星的研究 热点为太阳活动的观测与中国气象卫星的发展及 应用。FY-2卫星的研究热点为数据预处理及信息 提取,主要用于观测气象及太阳活动。FY-3系列 卫星的研究热点为大气成分监测,用于气候变化 研究、沙尘识别、秸秆焚烧识别。FY-4系列卫星 的研究热点为卫星设计、数据预处理及气象信息 提取,主要用于气象预报。Tansat卫星的研究热点 为数据预处理和二氧化碳含量监测,主要用于生 态安全评价。

海洋遥感卫星系统中,HY-1系列卫星的研究 热点为叶绿素浓度、悬浮泥沙含量、海温和海冰 观测。HY-2系列卫星的研究热点为海面风速、有 效波高、海面温度等多种海洋动力环境参数观测, 主要用于海洋环境监测和灾害预报。CFOSAT卫星 的研究热点为旋转扇束散射仪的性能与标定,以 及卫星重访轨道算法。

7 结 语

本文梳理了中国3大地球遥感卫星系统的发展 历程,剖析了陆地卫星、气象卫星和海洋卫星的 发展现状及特点,归纳总结了在轨卫星的文献研 究热点。陆地遥感卫星系统的发展最为迅速,已 经形成资源、高分、环境/实践和小卫星4大系列,

卫星传感器类型丰富且时空分辨率高,但也面临 传感器类型发展不均衡、轨道高度较为接近、同 类传感器波谱范围重叠明显的现状不足。气象遥 感卫星系统发展最为成熟,极轨和静止两大系列 卫星能够探测大多数大气要素,然而卫星数量偏 少、传感器时空分辨率较低且缺乏关键要素如大 气风场的精细探测能力。海洋遥感卫星系统取得 了显著进展,初步形成海洋水色、海洋动力环境 卫星和海洋监视监测3大卫星格局,能够实现大面 积的海洋环境同步观测,然而面临海洋卫星数量 较少、传感器观测要素有限且时空分辨率较低等 问题。文献热点分析发现,中国3大卫星遥感系统 的研究论文总量偏少,国内外期刊论文失衡比例 较为严重,尤其高分和资源系列的陆地卫星,许 多卫星的研究集中在数据处理层面,卫星的应用 研究相对薄弱且彼此不均衡。论文偏少和失衡现 象的部分原因来自于国产遥感卫星的较短历史数 据积累难以满足长时序的遥感监测分析、遥感数 据分发和面向科研的免费共享机制不够完善、对 国产遥感卫星的辐射和几何定量指标不够自信、 和科研评价体系过分依赖SCI期刊论文发表等。

因此,陆地卫星的规划和发展需要考虑新型 传感器如激光雷达、轨道高度的差异性和波谱范 围的互补性,全面服务中国自然资源调查、生态 环境保护和国家重大工程监测等应用。气象卫星 系统需要发射更多的卫星来实现组网观测,优先 考虑研发新型的大气探测传感器,提升全要素的 探测能力与时空分辨率,满足天气预报和灾害监 测等精细化需求。海洋遥感卫星系统需要增加卫 星数量并缩短同类卫星的发射周期,提高传感器 的海洋要素的探测能力与时空分辨率,加快科研 试验型向业务型转变的进程,真正应用于海洋环 境监测和海域管理等事业。同时,针对中国3大遥 感卫星的巨大成就与应用研究不足的现状,建议 完善卫星遥感科研数据的免费共享机制并加大数 据的行业应用推广力度,提升中国地球观测遥感 卫星技术的业务能力与国际影响力。

参考文献(References)

Bai Z G. 2013. Technical characteristics of Gaofen-1 satellite. China Aerospace, (8): 5-9 (白照广. 2013. 高分一号卫星的技术特点.

中国航天, (8): 5-9)

- Bai Z G. 2019. Development achievements and prospects of China modern small satellite. Spacecraft Engineering, 28(2): 1-8 (白照 广. 2019. 中国现代小卫星发展成就与展望. 航天器工程, 28 (2): 1-8) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2019.02.001]
- Cao H Y, Gao H T and Zhao C G. 2018. Development of China land quantitative remote sensing satellite technology. Spacecraft Engineering, 27(4): 1-9 (曹海翊, 高洪涛, 赵晨光. 2018. 中国陆地定 量遥感卫星技术发展. 航天器工程, 27(4): 1-9) [DOI: 10.3969/j/ issn.1673-8748.2018.04.001]
- Chen X Y, Zhang J, Tong C, Liu R J, Mu B and Ding J. 2019. Retrieval algorithm of chlorophyll-a concentration in turbid waters from satellite HY-1C coastal zone imager data. Journal of Coastal Research, 90(sp1): 146-155 [DOI: 10.2112/SI90-018.1]
- Chen L Z and Lei B. 2019. Marine science and technology development over the past 70 years in China. Haiyang Xuebao, 41(10): 3-22 (陈连增, 雷波. 2019. 中国海洋科学技术发展 70 年. 海洋学 报, 41(10): 3-22) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2019.10.002]
- Chen W R, Zhang W H, Yuan Z and Su W B. 2019. Development of land observation satellite data services in China. Satellite Applications, (10): 20-23 (陈卫荣, 张文慧, 原征, 苏文博. 2019. 我国陆 地观测卫星数据服务发展. 卫星应用, (10): 20-23)
- De Oliveira Lino C, Lima M G R and Hubscher G L. 2000. CBERS— An international space cooperation program. Acta Astronautica, 47 (2/9): 559-564 [DOI: 10.1016/S0094-5765(00)00094-1]
- Di D, LI J, Han W, Bai W G, Wu C Q and Paul Menzel W. 2018. Enhancing the fast radiative transfer model for FengYun-4 GIIRS by using local training profiles. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123(22): 12583-12596 [DOI: 10.1029/2018JD029089]
- Dong C H, Yang J, Zhang W J, Yang Z D, Lu N M, Shi J M, Zhang P, Liu Y J and Cai B. 2009. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A. Bulletin of the American Meteorological Society, 90(10): 1531-1544 [DOI: 10.1175/2009BAMS2798.1]
- Du S S, Liu L Y, Liu X J, Zhang X, Zhang X Y, Bi Y M and Zhang L C. 2018. Retrieval of global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence from TanSat satellite. Science Bulletin, 63(22): 1502-1512 [DOI: 10.1016/j.scib.2018.10.003]
- Grelier T, Amiot T, Tison C, Delaye L, Hauser D and Castillan P. 2016. The SWIM instrument, a wave scatterometer on CFOSAT mission//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China: IEEE: 5793-5796 [DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730513]
- Gu X F and Tong X D. 2015. Overview of China earth observation satellite programs [space agencies]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 3(3): 113-129 [DOI: 10.1109/MGRS. 2015. 2467172]
- Guo H D. 2012. China's Earth observing satellites for building a Digital Earth. International Journal of Digital Earth, 5(3): 185-188 [DOI: 10.1080/17538947.2012.669960]
- Guo H D, Fu W X, Li X W, Chen P, Liu G, Li Z, Wang C, Dong Q, Lei

L P, Bai L Y and Liu Q J. 2014. Research on global change scientific satellites. Science China Earth Sciences, 57(2): 204-215 [DOI: 10.1007/s11430-013-4748-5]

- Guo H D, Fu W X and Liu G. 2019. Chinese earth observation satellites//Guo H D, Fu W X and Liu G, eds. Scientific Satellite and Moon-Based Earth Observation for Global Change. Singapore: Springer: 189-243 [DOI: 10.1007/978-981-13-8031-0_6]
- Hauser D, Tison C, Amiot T, Delaye L, Mouche A, Guitton G, Aouf L and Castillan P. 2016a. CFOSAT: a new Chinese-French satellite for joint observations of ocean wind vector and directional spectra of ocean waves//SPIE 9878, Remote Sensing of the Oceans and Inland Waters: Techniques, Applications, and Challenges. New Delhi, India: SPIE: 98780T [DOI: 10.1117/12.2225619]
- Hauser D, Dong X L, Aouf L, Tison C and Castillan P. 2016b. Overview of the CFOSAT mission//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China: IEEE: 5789-5792 [DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730512]
- He Y H, Shi L S, Zhang R H, Han Y, Sun Y, Zhao D L, Lin W J, Wu H P and Xin L X. 2007. Application research of CBERS-02 data in land-use survey. China Land Science, 21(2): 51-57 (何字华, 史良 树, 张荣慧, 韩毅, 孙毅, 赵冬玲, 林文娟, 吴海平, 辛丽璇. 2007. 中巴资源卫星数据(CBERS-02)在土地调查中的应用. 中国土 地 科 学, 21(2): 51-57) [DOI: 10.3969/j. issn. 1001-8158.2007. 02.008]
- Hou S Y and Liu H. 2015. Chinese satellite programs: an internal view//Schrogl K U, Hays P, Robinson J, Moura D and Giannopapa C, eds. Handbook of Space Security: Policies, Applications and Programs. Handbook of Space Security. New York: Springer: 885-898 [DOI: 10.1007/978-1-4614-2029-3_33]
- Hu X Q, Lu N M and Qiu H. 2006. Development of aerosol retrieval algorithm over global ocean using FY-1C/1D data. Acta Oceanologica Sinica, 28(2): 56-65 (胡秀清, 卢乃锰, 邱红. 2006. FY-1C/1D 全球海上气溶胶业务反演算法研究.海洋学报, 28(2): 56-65) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-4193.2006.02.008]
- Huang W, Sun S R, Jiang H B, Gao C and Zong X Y. 2018. GF-2 satellite 1m/4m camera design and in-orbit commissioning. Chinese Journal of Electronics, 27(6): 1316-1321 [DOI: 10.1049/cje.2018. 09.018]
- Jiang Y H, Zhang G, Tang X M, Li D R and Huang W C. 2014. Detection and correction of relative attitude errors for ZY1-02C. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(12): 7674-7683 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2316419]
- Jiang Y H, Wang J Y, Zhang L, Zhang G, Li X and Wu J Q. 2019. Geometric processing and accuracy verification of Zhuhai-1 hyperspectral satellites. Remote Sensing, 11(9): 996 [DOI: 10.3390/ rs11090996]
- Jiang W, He G J, Long T F, Guo H X, Yin R Y, Leng W C, Liu H C and Wang G Z. 2018. Potentiality of using Luojia 1-01 nighttime light imagery to investigate artificial light pollution. Sensors, 18 (9): 2900 [DOI: 10.3390/s18092900]

- Jiang X W, Lin M S and Zou Y R. 2016. Progress and application of China ocean satellites. Satellite Application, (6): 17-23 (蒋兴伟, 林明森, 邹亚荣. 2016. 我国海洋卫星发展与应用. 卫星应用, (6): 17-23)
- Jiang X W, He X Q, Lin M S, Gong F, Ye X M and Pan D L. 2019. Progresses on ocean satellite remote sensing application in China. Haiyang Xuebao, 41(10): 113-124 (蒋兴伟, 何贤强, 林明森, 龚 芳, 叶小敏, 潘德炉. 2019. 中国海洋卫星遥感应用进展. 海洋学报, 41(10): 113-124) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2019.10.007]
- Li B B, Han B, Tian T, Zhu R F and Bai Y. 2018. Application status and future development of Jilin-1 video satellite. Satellite Application, (3): 25-29 (李贝贝, 韩冰, 田甜, 朱瑞飞, 白杨. 2018. 吉林 一号视频卫星应用现状与未来发展. 卫星应用, (3): 25-29)
- Li D R. 2012. China's first civilian three-line-array stereo mapping satellite: ZY-3. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 41(3): 317-322 (李德仁. 2012. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星——资源三号测绘卫星. 测绘学报, 41(3): 317-322)
- Li G P and Cao C X. 2010. Development of environmental monitoring satellite systems in China. Science China Earth Sciences, 53(1): 1-7 [DOI: 10.1007/s11430-010-4140-7]
- Li S Q, Bi F, Hou Y J and Yang H W. 2018. Characterization of windsea and swell in the South China Sea based on HY-2 satellite data. Journal of Coastal Research, 84(sp1): 58-62 [DOI: 10.2112/ S184-008.1]
- Li X, Li X Y, Li D R, He X J and Jendryke M. 2019a. A preliminary investigation of Luojia-1 night-time light imagery. Remote Sensing Letters, 10(6): 526-535 [DOI: 10.1080/2150704X.2019.1577573]
- Li X X, Ma T Z, Xie W L, Zhang K K, Huang J X and Ren X D. 2019b. FY-3D and FY-3C onboard observations for differential code biases estimation. GPS Solutions, 23(2): 57 [DOI: 10.1007/ s10291-019-0850-2]
- Li Y, Tao Z G, Li S M, Guo Z S, Shi J and Gao C D. 2012. Mapping satellite-1 in-orbit performance evaluation. Journal of Remote Sensing, 16(S1): 40-47 (李岩, 陶志刚, 李松明, 郭志胜, 史简, 高 翠东. 2012. "天绘一号"卫星在轨性能评估. 遥感学报, 16(S1): 40-47) [DOI: 10.11834/jrs.20120008]
- Li Z R, Zhang K, Li D L and Li X M. 2017. Analysis of the characteristics of ZY-1-02C satellite PMS data. Geospatial Information, 15 (1): 29-31, 39 (李宗仁, 张焜, 李得林, 李晓民. 2017. 资源一号 02C 卫星 PMS 数据特性分析. 地理空间信息, 15(1): 29-31, 39) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2017.01.009]
- Lian M L, Shi Z C, Wang Y and Dong J. 2016. Design and verification of the staring camera on board GF-4 satellite. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 37(4): 32-39 (练敏隆, 石志城, 王跃, 董 杰. 2016. "高分四号"卫星凝视相机设计与验证. 航天返回与遥 感, 37(4): 32-39) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2016.04.005]
- Liang H, Bao S L, Chen Q, Zhao X M and Li Y F. 2017. Design and implementation of FY-4 geostationary lightning imager. Aerospace Shanghai, 34(4): 43-51 (梁华, 鲍书龙, 陈强, 赵学敏, 李云 飞. 2017. FY-4 卫星闪电成像仪设计与实现. 上海航天, 34(4):

43-51) [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.006]

- Lin M S, Zhang Y G and Yuan X Z. 2015. The development course and trend of ocean remote sensing satellite. Haiyang Xuebao, 37 (1): 1-10 (林明森,张有广,袁欣哲. 2015. 海洋遥感卫星发展历 程与趋势展望. 海洋学报, 37(1): 1-10) [DOI: 10.3969/j.issn. 0253-4193.2015.01.001]
- Lin M S and Zhang Y G. 2018. Application status and development prospects of marine dynamics environmental satellites in China. Satellite Application, (5): 19-23 (林明森,张有广. 2018. 我国海 洋动力环境卫星应用现状及发展展望. 卫星应用, (5): 19-23)
- Lin M S, He X Q, Jia Y J, Bai Y, Ye X M and Gong F. 2019. Advances in marine satellite remote sensing technology in China. Haiyang Xuebao, 41(10): 99-112 (林明森, 何贤强, 贾永君, 白雁, 叶小敏, 龚芳. 2019. 中国海洋卫星遥感技术进展. 海洋学报, 41(10): 99-112) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2019.10.006]
- Liu J J, Zhang J, Li Z, Zhang G, Du W, Zhao W H and Liu J W. 2018. Technical framework of 1: 10000 cartographic element extraction based on GF-7 satellite. Geomatics World, 25(6): 58-61 (刘建军, 张俊, 李曌, 张刚, 杜维, 赵文豪, 刘剑炜. 2018. 基于 GF-7 卫星 的 1: 10000 制图要素信息提取技术框架建设. 地理信息世界, 25(6): 58-61) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-1586.2018.06.011]
- Liu J and Zhang Q J. 2018. Gaofen-3 satellite and applications. Satellite Application, (6): 12-16 (刘杰,张庆君. 2018. 高分三号卫星及应用概况. 卫星应用, (6): 12-16)
- Liu J Y, Xin C L, Wu H G, Zeng Q W and Shi J J. 2019. Potential application of GF-6 WFV data in forest types monitoring. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 40(2): 107-116 (刘晋阳, 辛存林, 武红敢, 曾庆伟, 史京京. 2019. GF-6 卫星 WFV 数据在林 地类型监测中的应用潜力. 航天返回与遥感, 40(2): 107-116) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2019.02.012]
- Liu Y N. 2018. Visible-shortwave infrared hyperspectral imager of GF-5 satellite. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 39(3): 25-28 (刘银年. 2018. "高分五号"卫星可见短波红外高光谱相机的 研制. 航天返回与遥感, 39(3): 25-28) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.03.003]
- Liu Y, Liu Y X, Chen G X and Wu Z L. 2019. Evaluation of HY-2A satellite-borne water vapor radiometer with shipborne GPS and GLONASS observations over the Indian Ocean. GPS Solutions, 23(3): 87 [DOI: 10.1007/s10291-019-0876-5]
- Lu C L, Wang R and Yin H. 2014. GF-1 satellite remote sensing characters. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 35(4): 67-73 (陆 春玲, 王瑞, 尹欢. 2014. "高分一号"卫星遥感成像特性. 航天返 回 与遥感, 35(4): 67-73) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2014. 04.009]
- Lu C L and Bai Z G. 2015. Characteristics and typical applications of GF-1 satellite//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Milan, Italy: IEEE: 1246-1249 [DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7325999]
- Lu N M and Gu S Y. 2016. Review and prospect on the development of meteorological satellites. Journal of Remote Sensing, 20(5):

832-841 (卢乃锰,谷松岩. 2016. 气象卫星发展回顾与展望. 遥 感学报, 20(5): 832-841) [DOI: 10.11834/jrs320166194]

- Lu N M, Zheng W, Wang X, Gao L, Liu Q H, Wu S L, Jiang J Y, Gu S Y and Fang X. 2017. Overview of meteorological satellite and its data application in weather analysis, climate and environment disaster monitoring. Journal of Marine Meteorology, 37(1): 20-30 (卢乃锰, 郑伟, 王新, 高玲, 刘清华, 武胜利, 蒋建莹, 谷松岩, 方 翔. 2017. 气象卫星及其产品在天气气候分析和环境灾害监测 中的应用概述.海洋气象学报, 37(1): 20-30) [DOI: 10.19513/j. cnki.issn2096-3599.2017.01.003]
- Pan D L, He X Q, Li S J and Gong F. 2003. Study on application potentiality of the first China's ocean satellite HY-1A. Acta Oceanologica Sinica, 22(4): 503-510
- Pan D L, Gong F and Chen J Y. 2009. The Chinese environment satellite mission status and future plan//SPIE 7474, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIII. Berlin, Germany: SPIE: 747424 [DOI: 10.1117/12.830251]
- Pan T. 2015. GF-2 satellite charcteristic. Aerospace China, (1): 3-9 (潘 腾. 2015. 高分二号卫星的技术特点. 中国航天, (1): 3-9)
- Ran Q, Chi Y B, Wang Z Y and Chen Z C. 2009. Image-based nNoise estimation of BJ-1 small satellite image. Journal of Remote Sensing, 13(3): 554-558 (冉琼, 迟耀斌, 王智勇, 陈正超. 2009. 北京 1 号小卫星图像噪声评估. 遥感学报, 13(3): 554-558) [DOI: 10. 11834/jrs.20090316]
- Ran Y H and Li X. 2019. TanSat: a new star in global carbon monitoring from China. Science Bulletin, 64(5): 284-285 [DOI: 10.1016/j. scib.2019.01.019]
- Sun J L, Yu W D and Deng Y K. 2017. The SAR payload design and performance for the GF-3 mission. Sensors, 17(10): 2419 [DOI: 10.3390/s17102419]
- Sun Y Z, Jaing G W, Li Y D, Yang Y, Dai H S, He J, Ye Q H, Cao Q, Dong C Z, Zhao S H and Wang W H. 2018. GF-5 satellite: overview and application prospects. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 39(3): 1-13 (孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 杨勇, 代海山, 何 军, 叶擎昊, 曹琼, 董长哲, 赵少华, 王维和. 2018. "高分五号"卫 星概况及应用前景展望. 航天返回与遥感, 39(3): 1-13) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.03.001]
- Tang S H, Qiu H and Ma G. 2016. Review on progress of the Fengyun meteorological satellite. Journal of Remote sensing, 20(5): 842-849 (唐世浩, 邱红, 马刚. 2016. 风云气象卫星主要技术进展. 遥感学报, 20(5): 842-849) [DOI: 10.11834/jrs.20166232]
- Tang X M and Hu F. 2018. Development status and trend of satellite mapping. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 39(4): 26-35 (唐新明, 胡芬. 2018. 卫星测绘发展现状与趋势. 航天返回与遥 感, 39(4): 26-35) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.04.004]
- Tang X M, Xie J F, Liu R, Huang G H, Zhao C G, Zhen Y, Tang H Z and Dou X H. 2020. Overview of the GF-7 laser altimeter system mission. Earth and Space Science, 7(1): e2019EA000777 [DOI: 10.1029/2019EA000777]

Tang Y, Wang L J, Ma G C, Jia H J and Jin X. 2019. Emergency moni-

toring of high-level landslide disasters in Jinsha River using domestic remote sensing satellites. Journal of Remote Sensing, 23 (2): 252-261 (唐尧, 王立娟, 马国超, 贾虎军, 靳晓. 2019. 利用国 产遥感卫星进行金沙江高位滑坡灾害灾情应急监测. 遥感学 报, 23(2): 252-261) [DOI: 10.11834/jrs.20198405]

- Tong X D, Zhao W B, Xing J and Fu W. 2016. Status and development of China High-Resolution Earth Observation System and application//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China: IEEE: 3738-3741 [DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729969]
- Tong X D. 2016. Development of China high-resolution earth observation system. Journal of Remote Sensing, 20(5): 775-780 (童旭东. 2016. 中国高分辨率对地观测系统重大专项建设进展. 遥感学报, 20(5): 775-780) [DOI: 10.11834/jrs.20166302]
- Wang D Z and He H Y. 2017. Observation capability and application prospect of GF-4 satellite. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 38(1): 98-106 (王殿中,何红艳 2017. "高分四号"卫星观测能力与应用前景分析. 航天返回与遥感, 38(1): 98-106) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2017.01.013]
- Wang H, Zhu J H, Lin M S, Zhang Y G and Chang Y T. 2019. Evaluating Chinese HY-2B HSCAT ocean wind products using buoys and other scatterometers. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters [DOI: 10.1109/LGRS.2019.2940384]
- Wang H Y, He W and Feng C. 2019. Development of Land Observation Satellite Application Technology in China. Satellite Applications, (10): 24-26 (王海燕, 何伟, 冯春. 2019. 中国陆地观测卫星 应用技术发展. 卫星应用, (10): 24-26)
- Wang J R, Wang R X, Hu X and Su Z B. 2017. The on-orbit calibration of geometric parameters of the Tian-Hui 1 (TH-1) satellite. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 124: 144-151 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.01.003]
- Wang Q, Wu C Q, Li Q and Li J S. 2010. Chinese HJ-1A/B satellites and data characteristics. Science China Earth Sciences, 53(1): 51-57 [DOI: 10.1007/s11430-010-4139-0]
- Wang Q, Wu C Q and Li Q. 2010. Environment satellite 1 and its application in environmental monitoring. Journal of Remote Sensing, 14(1): 104-121 (王桥, 吴传庆, 厉青. 2010. 环境一号卫星及其在 环境监测中的应用. 遥感学报, 14(1): 104-121) [DOI: 10.11834/ jrs.20100109]
- Wang Q and Liu S H. 2016. Research and implementation of national environmental remote sensing monitoring system. Journal of Remote Sensing, 20(5): 1161-1169 (王桥, 刘思含. 2016. 国家环境 遥感监测体系研究与实现. 遥感学报, 20(5): 1161-1169) [DOI: 10.11834/jrs.20166201]
- Wang R, Li S L and Deng W. 2014. Tian Hui-1 satellite and its application. Satellite Application, (6): 21-23 (王蓉, 李胜利, 邓伟. 2014. 天绘一号卫星及其应用. 卫星应用, (6): 21-23)
- Wang S, Jin R and Zhu J D. 2018. Super View-1-China's first commercial remote sensing satellite constellation with a high resolution of 0.5 m Aerospace China, (1): 31-38

- Wang S H, Huang C P, Zhang L F, Gao X L and Fu A M. 2019. Designment and assessment of far-red solar-induced chlorophyll fluorescence retrieval method for the terrestrial ecosystem carbon inventory satellite. Remote Sensing Technology and Application, 34(3): 476-487 (王思恒, 黄长平, 张立福, 高显连, 付安民. 2019. 陆地 生态系统碳监测卫星远红波段叶绿素荧光反演算法设计. 遥感 技术 与应用, 34(3): 476-487) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323. 2019.3.0476]
- Wang T Y, Zhang G, Li D R, Tang X M, Jiang Y H, Pan H B, Zhu X Y and Fang C. 2014. Geometric accuracy validation for ZY-3 satellite imagery. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 11 (6): 1168-1171 [DOI: 10.1109/LGRS.2013.2288918]
- Wang Z Z, Li J Y, He J Y, Zhang S W, Gu S Y, Li Y, Guo Y and He B Y. 2019. Performance analysis of microwave humidity and temperature sounder onboard the FY-3D satellite from prelaunch multiangle calibration data in thermal/vacuum test. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(3): 1664-1683 [DOI: 10. 1109/TGRS.2018.2868324]
- Wen Q, Yan M, Yang B X, Wang Z Y, Wu F, He S S and Tong Q X. 2013. On-orbit imaging quality assessment of SJ-9A satellite high performance optical small camera. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 34(4): 1-9 (文强, 严明, 杨秉新, 王智勇, 伍菲, 贺 少帅, 童庆禧. 2013. "实践九号"A 卫星高性能光学小相机在轨 成像质量评价. 航天返回与遥感, 34(4): 1-9) [DOI: 10.3969/j. issn.1009-8518.2013.04.001]
- Xiao A R, Wang Z Y, Wang L and Ren Y X. 2018. Super-resolution for "Jilin-1" satellite video imagery via a convolutional network. Sensors, 18(4): 1194 [DOI: 10.3390/s18041194]
- Xiong W. 2019. Greenhouse gases monitoring instrument (GMI) on GF-5 satellite (invited). Infrared and Laser Engineering, 48(3): 16-22 (熊伟. 2019. "高分五号"卫星大气主要温室气体监测仪(特 邀). 红外与激光工程, 48(3): 16-22) [DOI: 10.3788/IRLA201948. 0303002]
- Xu G H, Liu Q H, Chen L F and Liu L Y. 2016. Remote sensing for China's sustainable development: opportunities and challenges. Journal of Remote Sensing, 20(5): 679-688 (徐冠华, 柳钦火, 陈 良富, 刘良云. 2016. 遥感与中国可持续发展: 机遇和挑战. 遥 感学报, 20(5): 679-688) [DOI: 10.11834/jrs.20166308]
- Xu J M, Yang J, Zhang Z Q and Sun A L. 2010. Chinese meteorological satellitas, achievements and applications. Meteorological Monthly, 36(7): 94-100 (许健民, 杨军, 张志清, 孙安来. 2010. 中 国气象卫星的发展与应用. 气象, 36(7): 94-100)
- Xu W, Gong J Y and Wang M. 2014. Development, application, and prospects for Chinese land observation satellites. Geo-spatial Information Science, 17(2): 102-109 [DOI: 10.1080/10095020. 2014.917454]
- Xu Y, Liu J Q, Xie L L, Sun C R, Liu J P and Li J Y. 2019. China-France Oceanography Satellite (CFOSAT) simultaneously observes the typhoon-induced wind and wave fields. Haiyang Xuebao, 38(11): 158-161 (徐莹, 刘建强, 谢玲玲, 孙从容, 刘金普, 李

君益. 2019. 中法海洋卫星(CFOSAT)同步观测台风引起的风场 和海浪. 海洋学报, 38(11): 158-161) [DOI: 10.1007/s13131-019-1506-3]

- Yang J, Xian D and Tang S H. 2018. The lateset progress and application of Fengyun series meteorological satellite. Satellite Application, (11): 8-14 (杨军, 咸迪, 唐世浩. 2018. 风云系列气象卫星 最新进展及应用. 卫星应用, (11): 8-14)
- Yang Z D, Gu S Y, Qiu H, Huang Q and Fan T X. 2003. Research on the algorithm of cross calibration about IRMSS aboard on CBERS-1. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 22(4): 281-285 (杨忠东, 谷松岩, 邱红, 黄签, 范天锡. 2003. 中巴地球资源 一号卫星红外多光谱扫描仪交叉定标方法研究. 红外与毫米波 学报, 22(4): 281-285) [DOI: 10.3321/j. issn: 1001-9014.2003. 04.010]
- Yang Z D, Lu N M, Shi J M, Zhang P, Dong C H and Yang J. 2013. Overview of Fy-3 payload and ground application system. Advances in Met S&T, 3(4): 6-12 (杨忠东, 卢乃锰, 施进明, 张鹏, 董超华, 杨军. 2013. 风云三号卫星有效载荷与地面应用系统概述. 气象科技进展, 3(4): 6-12) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973. 2013.04.001]
- Ye X M, Lin M S and Xu Y. 2015. Validation of Chinese HY-2 satellite radar altimeter significant wave height. Aata Oceanologica Sinica, 34(5): 60-67 [DOI: 10.1007/s13131-015-0667-y]
- Yuan X Z, Lin M S, Liu J Q, Xie C H, Zhao L B, Ye X M, Zou Y R, Zeng T, Zhu H T, An W T and Cui L M. 2018. Application of GF-3 satellite in marine field. Satellite Application, (6): 17-21 (袁新 哲,林明森,刘建强,谢春华,赵良波,叶小敏,邹亚荣,曾韬,朱 海天,安文韬,崔利民. 2018. 高分三号卫星在海洋领域的应用. 卫星应用, (6): 17-21)
- Zhang H P, Su Y, Shang J, Yang L, Cai B W, Liu C B, Wang J, Zhou S X and Zhang Z Q. 2018. Accurate star centroid detection for the advanced geosynchronous radiation imager of Fengyun-4A. IEEE Access, 6: 7987-7999 [DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2798625]
- Zhang P, Lu Q F, Hu X Q, Gu S Y, Yang L, Min M, Chen L, Xu N, Sun L, Bai W G, Ma G and Xian D. 2019. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies. Advances in Atmospheric Sciences, 36(9): 1027-1045 [DOI: 10.1007/s00376-019-8215-x]
- Zhang Q J. 2017. System design and key technologies of the GF-3 satellite. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 46(3): 269-277 (张庆君. 2017. 高分三号卫星总体设计与关键技术.测绘学报, 46(3): 269-277) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170049]
- Zhang Q J. 2018. Optical remote sensing technology progress promoted by ZY-1 Series satellites. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 39(4): 45-54 (张庆君. 2018. "资源一号"系列卫星推动 卫星光学遥感技术进步. 航天返回与遥感, 39(4): 45-54) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.04.006]
- Zhang Q J and Zhao L B. 2018. Review of China ocean satellite. Satel-

lite Application, (5): 28-31 (张庆君, 赵良波. 2018. 中国海洋卫 星发展综述. 卫星应用, (5): 28-31)

- Zhang R N and Jiang X P. 2014. System design and in-orbit verification of the HJ-1-C SAR satellite. Journal of Radars, 3(3): 249-255 (张润宁, 姜秀鹏. 2014. 环境一号C卫星系统总体设计及其在 轨验证. 雷达学报, 3(3): 249-255) [DOI: 10.3724/SP.J.1300. 2014.13135]
- Zhang X Y, Zhou M Q, Wang W H and Li X J. 2015. Progress of global satellite remote sensing of atmospheric compositions and its' applications. Science and Technology Review, 33(17): 13-22 (张 兴赢,周敏强,王维和,李晓静. 2015. 全球卫星大气成分遥感探 测应用进展及其展望. 科技导报, 33(17): 13-22) [DOI: 10.3981/ j.issn.1000-7857.2015.17.001]
- Zhang Z Q, Lu F, Fang X, Tang S H, Zhang X H, Xu Y L, Han W, Nie X P, Shen Y B and Zhou Y Q. 2017. Application and development of FY-4 Meteorological satellite. Aerospace Shanghai, 34(4): 8-19 (张志清, 陆风, 方翔, 唐世浩, 张晓虎, 许映龙, 韩威, 聂肃平, 申 彦波, 周毓荃. 2017. FY-4卫星应用和发展. 上海航天, 34(4): 8-19) [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.002]
- Zhao M J, Si F Q, Zhou H J, Wang S M and Jiang Y. 2019. Level 0~1 processor of spaceborne environmental trace gases monitoring instrument. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 14 (1): 66-73 (赵敏杰, 司福祺, 周海金, 汪世美, 江宇. 2019. 星载大 气痕量气体差分吸收光谱仪 0~1级数据处理研究. 大气与环境 光学学报, 14(1): 66-73) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019. 01.007]
- Zhao S H, Wang Q, Li Y, Liu S H, Wang Z T, Zhu L and Wang Z F. 2017. An overview of satellite remote sensing technology used in China's environmental protection. Earth Science Informatics, 10 (2): 137-148 [DOI: 10.1007/s12145-017-0286-6]
- Zhong L and Liu X S. 2019. Application potential analysis of LJ1-01 new nightime light data. Bulletin of Surveying and Mapping, (7): 132-137 (钟亮, 刘小生. 2019. 珞珈一号新型夜间灯光数据应用 潜力分析. 测绘通报, (7): 132-137) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0235]
- Zhou C Y, Li Q, Liu S H, Zhao S H, Cheng L X, Yu C, Chen L F, Wang Z T, Zhang L H, Bian Z J and He Y X. 2019. Introduction of GF-5 satellite and ability of monitoring NO₂ and O₃ column density from EMI//2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama, Japan: IEEE: 8796-8798 [DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898921]
- Zhou Y J, Tian Q J and Zhang X H. 2008. CBERS-02B CCD image data quality evaluation and application potential for vegetation classification. Remote Sensing Information, (6): 47-52 (周雨霁, 田庆 久, 张雪红. 2008. CBERS-02B 卫星 CCD 数据质量评价与植被 分类应用潜力. 遥感信息, (6): 47-52) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2008.06.011]

Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites

SUN Weiwei¹, YANG Gang¹, CHEN Chao², CHANG Minghui¹, HUANG Ke¹, MENG Xiangzhen¹, LIU Liangyun³

Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
 Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China;

3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China

Abstract: Over the past 40 years, China has attained remarkable achievements in the development of earth observation remote sensing satellite technology. At present, the country has established three main satellite systems, including terrestrial, meteorological, and marine systems, which have been widely used in numerous applications, such as natural resource investigation, marine environmental protection, weather disaster prediction, and other major national projects. This study reviews the development history of the three major satellite systems, analyzes the development status and inherent characteristics of China's Earth observation remote sensing satellites, and implements the CiteSpace software to summarize the research hotspot literature for all in-orbit remote sensing satellites. The terrestrial remote sensing satellite system has developed rapidly, especially in terms of small commercial satellites. Terrestrial remote sensing satellites comprise four series, including the ZiYuan, GaoFen, HuanJing/ShiJian, and other small satellites. Satellite sensors are rich, and their high spatiotemporal resolution can reach up to 0.5 m. However, they can encounter typical problems, such as uneven development, closeproximity orbital heights, and overlapping spectral ranges in similar sensors. The development of the meteorological remote sensing satellite system is the most mature among the three satellite systems. Two series of polar orbiting and stationary satellites can well detect most atmospheric elements. However, meteorological satellites are few, the spatiotemporal resolution of their sensors is relatively low, and current sensors cannot finely detect certain critical elements, such as the atmospheric wind field. The marine remote sensing satellite system has likewise made significant progress. It consists of three major satellite patterns, namely, marine water color, marine dynamic environment, and marine surveillance and monitoring satellites, which can achieve large-scale simultaneous observation of Chinese marine environments. However, this system also consists of few marine satellites, limited sensor observation elements, and low satellite sensor spatiotemporal resolution. Moreover, hotspot literature analysis shows that the total number of studies on China's Earth observation satellites is relatively small. The disproportional ratio of articles indexed by SCI and CNKI is serious, especially on the GaoFen and ZiYuan terrestrial satellites. Numerous studies on China's Earth satellites focus on data processing, but the application aspect is relatively weak and uneven.

Therefore, the future launching of terrestrial remote sensing satellites to develop new sensors, such as lidars, is suggested. Furthermore, different orbital heights as well as the complementarity of the spectral range of different sensors should be considered. The meteorological system should launch additional satellites to carry out networking observations, improve detection capabilities for all meteorological elements, and promote the spatiotemporal resolution of new sensors to meet the refined requirements of weather forecasting and disaster monitoring. The marine remote sensing satellite system should likewise launch more satellites and shorten the launching cycle of similar satellites, improve detection capabilities for marine elements, promote the spatiotemporal resolution of new sensors, and accelerate its transformation from scientific to business-oriented research. Finally, researchers should be encouraged to utilize domestic satellite data and explore relevant studies to promote the advanced techniques of China's Earth observation satellites.

Key words: China's earth observation, remote sensing, terrestrial satellite, meteorological satellite, marine satellite, literature analysis **Supported by** National Natural Science Foundation of China (No.41971296, 41671342, 41801256); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No.LR19D010001, LQ18D010001)