

引文格式:唐新明,王鸿燕.我国民用光学卫星测绘产品体系的建立与应用[J].测绘学报,2022,51(7):1386-1397. DOI:10.11947/j. AGCS.2022.20220181.  
TANG Xinming, WANG Hongyan. Establishment and application of China civil optical satellite surveying and mapping products[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1386-1397. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2022. 20220181.

## 我国民用光学卫星测绘产品体系的建立与应用

唐新明,王鸿燕

自然资源部国土卫星遥感应用中心,北京 100048

### Establishment and application of China civil optical satellite surveying and mapping products

TANG Xinming, WANG Hongyan

Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100048, China

**Abstract:** With more than a decade development, civil optical satellite surveying and mapping and its applications in China have made great progress. In this paper, we systematically summarizes the general situation of technical parameters and data acquisition of China's civil optical satellites in-orbit, especially stereo surveying and mapping satellites. Based on the introduction of satellite surveying and mapping product processing and system construction, we summarize the applications of satellite surveying and mapping technology and its products, and conclude with the forward to the development of surveying and mapping satellites and satellite surveying and mapping applications during the 14th Five Year Plan period. **Key words:** surveying and mapping satellite; ZY-3; GF-7; stereoscopic mapping; satellite application **Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (No. 41971426); Fund of National Key Laboratory of Science and Technology on Remote Sensing Information and imagery Analysis (No. 6142A01210301-2)

**摘 要:** 经过 10 多年的发展,我国民用光学卫星测绘及其应用取得了较大的发展。本文系统总结了我国民用光学卫星特别是立体测图卫星的在轨情况、技术参数及数据获取等总体情况。在介绍卫星测绘产品处理和体系构建等技术的基础上,对卫星测绘及其产品的应用情况进行了概况和总结,并对“十四五”期间我国测绘卫星及卫星测绘应用的发展进行了展望。

**关键词:** 卫星测绘;资源三号;高分七号;产品体系;卫星应用

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2022)07-1386-12

基金项目:国家自然科学基金(41971426);遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室基金(6142A01210301-2)

卫星测绘是有效获取地理空间信息的重要手段<sup>[1-2]</sup>,主要依靠测绘卫星和具备测绘功能的遥感卫星开展全球地理信息资源获取、测绘产品生产和应用服务。从广义上讲,具备立体测图或者高程测量能力的卫星都可以称为测绘卫星,主要包括高分分辨率光学测绘卫星(指具有平面或立体测图能力的光学遥感卫星<sup>[3]</sup>)、雷达测图卫星、激光测高卫星、重力卫星和导航定位卫星 5 种类型<sup>[4-7]</sup>。

中国长期以来一直十分重视测绘卫星的研

制<sup>[8]</sup>。经过 10 多年的发展,我国民用测绘卫星已实现由试验应用型向业务服务型转变<sup>[5]</sup>。特别是民用光学卫星测绘应用技术,已经实现了资源三号(ZY-3)、高分七号(GF-7)和资源一号(ZY-1)、高分系列其他卫星等多系列、多分辨率卫星的组网运行,空间分辨率、时间分辨率和测图精度不断提高;影像应用日益广泛,从单一的测绘产品生产扩展为多元遥感影像产品和服务,卫星测绘产品体系建立并不断完善;从限于中国陆域到全球地

理信息的获取、更新和共享,应用广度逐步拓宽。截至 2021 年底,在 10 年时间里面向国内外各应用领域 2000 余个单位或机构提供了光学卫星测绘产品和服务,在自然资源管理中发挥了不可或缺的作用,并广泛服务于经济社会和生态文明建设,为国民经济和社会的发展做出了重要贡献。

## 1 卫星在轨和数据获取情况

为满足国民经济、社会发展和国家安全对地理信息资源覆盖面、现势性和产品种类的要求,打破自主卫星数据源匮乏和过分依赖国外卫星数据的局面,自 20 世纪末以来,国家牵头组织开展了自主测绘卫星的一系列技术论证,科学规划、推进自主测绘卫星的立项、研制和发射,力争建设一套长期、稳定、连续的自主民用测绘卫星体系<sup>[9]</sup>,推进卫星测绘应用技术的深化。

经过 10 多年的努力和发展,目前,我国民用光学测绘卫星主要包括 ZY-3 卫星系列和 GF-7 卫星系列<sup>[10-12]</sup>。从 ZY-3 到 GF-7,在 10 年时间里实现了卫星测绘由 1:5 万比例尺到 1:1 万比例尺的进步,取得了我国民用光学立体测绘卫星“从无到有、从有到多、从多到精”的跨越式进步,使我国成为国际上少数几个掌握成套卫星测绘技术的国家之一<sup>[1]</sup>。

### 1.1 测绘卫星在轨情况

(1) ZY-3 卫星。ZY-3 卫星工程是“十一五”期间我国民用航天重点科研项目,旨在长期、连续、稳定、快速地获取覆盖全国的高分辨率全色立体影像和多光谱影像,生产全国 1:5 万基础地理信息产品,实现 1:2.5 万及更大比例尺地形图的修测和更新<sup>[2,13-14]</sup>。共有 4 颗资源三号卫星列入了研制计划,通过多星在轨组网运行提高对我国及全球各地区测绘影像的覆盖能力<sup>[15]</sup>。

资源三号 01 星(ZY-3 01)于 2012 年 1 月 9 日成功发射,是我国首颗民用高分辨率光学传输型立体测图卫星,集测绘和资源调查功能于一体。卫星采用三线阵测绘方式,可准确获取影像的三维地面坐标,用于生产 1:5 万测绘产品,以及开展 1:2.5 万及更大比例尺地形图的修测与更新。资源三号 02 星(ZY-3 02)于 2016 年 5 月 30 日成功发射,前后视相机分辨率由 3.5 m 提高到 2.5 m,较 01 星拥有更优异的影像融合能力和更高图像高程测量精度,并搭载了一套试验性激光测高载荷<sup>[16,17]</sup>。资源三号 03 星(ZY-3 03)于

2020 年 7 月 25 日成功发射,设计寿命延长至 8 a。ZY-3 03 与 ZY-3 01、ZY-3 02 星组成我国首个立体测图卫星星座,重访周期从双星 3 d 缩短到三星 1 d,可以保证我国高分辨率立体测图数据的长期稳定获取,形成全球领先的业务化立体观测能力。

ZY-3 卫星工程全面突破了国产卫星 1:5 万立体测图技术,建立了自主卫星的 1:5 万立体测图技术体系,填补了我国立体测图这一领域的空白<sup>[18-19]</sup>。在轨测试表明,ZY-3 01 星图像分辨率和定位精度指标优于其他第一代传输型测绘卫星,达到当时的世界领先水平<sup>[4-5,9,13,14,19-23]</sup>。ZY-3 02 星的测图精度与 ZY-3 01 星总体一致,生产出的数字表面模型(digital surface model,DSM)网格大小提高到 10 m<sup>[18]</sup>;其激光测高仪载荷的在轨试验探索,有效促进了我国空间激光载荷和激光数据处理等相关技术的发展<sup>[2]</sup>。ZY-3 03 星搭载的新型激光测高仪采用双边采样、多阈值可调、多回波鉴别的体制,实现了主动高程测量,星地测距精度提升为亚米级<sup>[15,24]</sup>。

ZY-3 卫星的成功发射,标志着我国民用立体测图卫星领域实现了零的突破<sup>[19]</sup>,完成了从“从无到有、从有到多”的跨越。卫星功能、性能指标优于同时期国际同类卫星,达到国际先进水平,不仅打破了我国航天立体测图长期依赖国外遥感数据的局面<sup>[9,18,23]</sup>,并在国际合作中贡献了中国智慧与中国方案,让“中国制造”的卫星测绘影像进军国际市场<sup>[15]</sup>,具有重大的意义。

(2) GF-7 卫星。GF-7 卫星是中国“十二五”期间“高分辨率对地观测系统重大专项”工程项目之一<sup>[2]</sup>,于 2019 年 11 月 3 日成功发射、2020 年 8 月 20 日投入使用。GF-7 卫星在 ZY-3 卫星平台基础上优化改进,设计寿命 8 a,搭载的两线阵立体相机可有效获取 20 km 幅宽、优于 0.8 m 分辨率的全色立体影像和 3.2 m 分辨率的多光谱影像。搭载的两波束激光测高仪以 3 Hz 的观测频率进行对地观测,地面足印直径小于 30 m,并以高于 1 GHz 的采样频率获取全波形数据。在轨测试结果表明,GF-7 卫星各项指标均满足或优于卫星研制总要求<sup>[1,25-27]</sup>,能够满足 1:1 万比例尺制图要求<sup>[2,28-29]</sup>,大幅增强我国独立获取地理空间信息的能力,提升国家测绘地理信息服务保障水平,在高精度立体测图、自然资源监测等领域具有独特的应用优势,可为城市建设、农业统计、生态环境、林草管理、防灾减灾等方面提供更好的数据保障<sup>[30]</sup>。

作为我国首颗民用亚米级光学传输型立体测绘卫星,GF-7 卫星采用“双线阵相机与激光测高仪主被动复合测绘”的模式<sup>[2,8,25,31]</sup>,突破了亚米级立体测绘相机技术<sup>[2,32]</sup>,实现了 1:1 万航天立体测图<sup>[25]</sup>,标志着我国在高精度测绘卫星领域又迈上了一个新台阶,航天测绘水平已经在国际上走到了排头兵的位置<sup>[13]</sup>,开启了我国自主大比例尺航天测绘新时代<sup>[8,31]</sup>。

(3) 其他主要民用光学卫星。除 ZY-3、GF-7 卫星已实现立体测图四星组网之外,截至 2021 年底,国产民用亚米级分辨率在轨光学卫星还有 GF-2、高分多模卫星,2 m 级分辨率在轨光学卫星中,高分一号(GF-1)及 2 m/8 m 光学卫星星座(GF-1B/C/D)、高分六号(GF-6)已实现 2 m 分辨率光学卫星五星组网,5 m 光学 01/02 星已实现高光谱卫星双星组网,也可为卫星测绘提供高空空间分辨率、高平面精度、高时间分辨率的地表平面信息来源。

### 1.2 数据获取

经过 10 年的在轨运行,国产民用光学卫星实

现了全球优于 2.5 m 分辨率的光学卫星影像获取覆盖面积超过 1.5 亿 km<sup>2</sup>,16 m 分辨率卫星影像数据已实现全球有效覆盖。全球范围(陆海)有效立体数据覆盖超过 1.28 亿 km<sup>2</sup>,其中陆地覆盖率达到 76%。ZY-3 卫星三星组网后,2 m 级立体影像覆盖能力显著增强(图 1),目前共获取原始数据 26213 轨、近 630 万景卫星影像数据,国内陆地地区年度有效立体数据覆盖率提升至 95%,累计覆盖率已达 100%,并于 2021 年底利用 ZY-3 卫星立体影像数据完成了全国实景三维一版图生产。GF-7 自发射以来,已在轨安全运行 2 年多,获取了大量亚米级高精度立体影像数据。截至 2021 年底,共获取原始数据 4075 轨,原始数据总量约 1.1 PB,形成立体影像 29.38 万景对(同景不同传感器的数据计为 1 景对)。基于 GF-7 卫星应用基本系统,已实现卫星数据当日拍摄当日处理,全球有效立体数据覆盖超 3800 万 km<sup>2</sup>,全国有效立体数据覆盖约 780 万 km<sup>2</sup>;获取全球 380 万个有效激光点、全国 80 万个有效激光点。

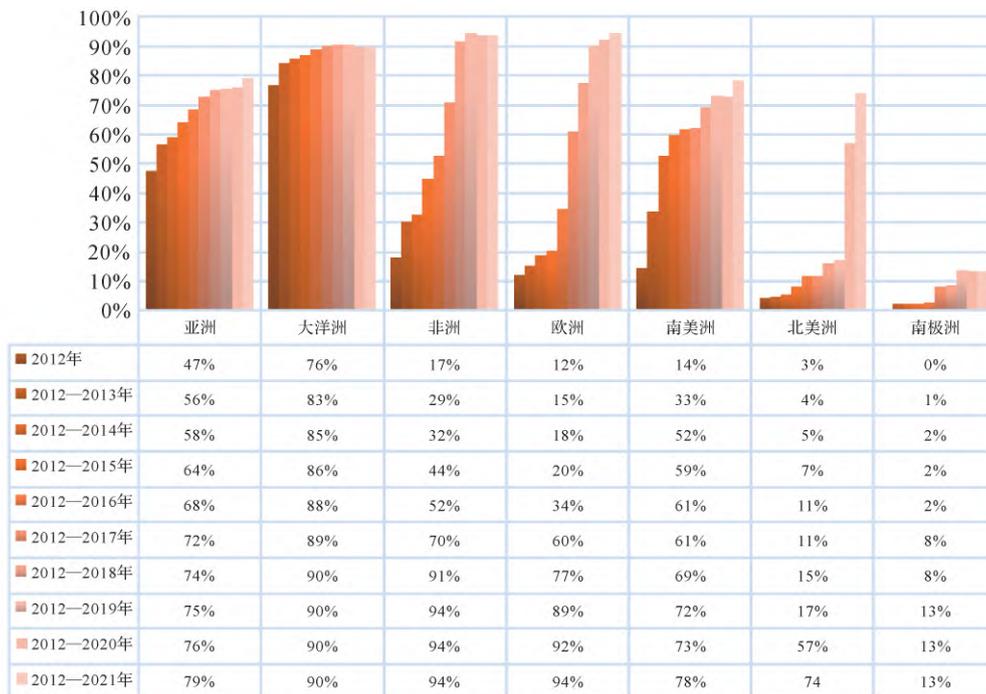


图 1 资源三号卫星各大洲获取数据覆盖统计情况(2012—2021 年)

Fig.1 Statistics of global data coverage obtained by ZY-3 Satellite (2012—2021)

## 2 卫星测绘产品体系

### 2.1 数据处理

光学测绘卫星持续获取的影像数据经地面接

收系统接收和解码后,传输到相应的卫星应用系统,进行数据预处理和生产,形成不同种类和用途的卫星遥感影像产品(图 2),一定程度上满足了国内外众多领域的旺盛需求。卫星应用系统经过

建设期,以及持续的技术攻关和适应性改造,逐步形成自动化、规模化、业务化、网络化的生产线<sup>[33]</sup>,保证各类影像产品的持续生产或按需定

制,不断促进卫星影像数据的精度和质量保持稳定甚至是得到进一步提升,产品种类日益丰富、体系日益完善。

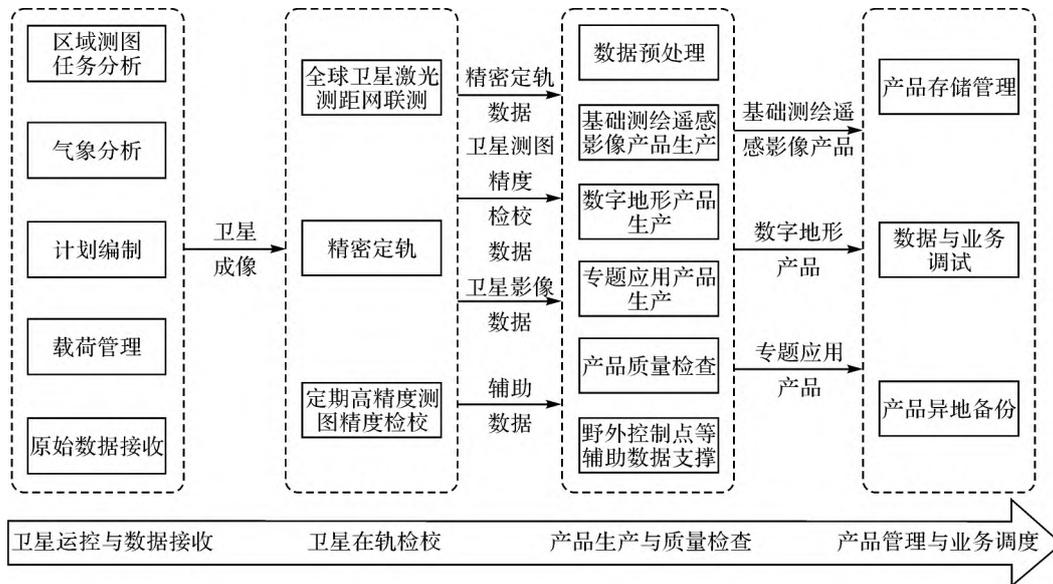


图 2 光学测绘卫星数据获取与处理流程

Fig.2 Flowchart of data acquisition and processing of optical surveying and mapping satellites

### 2.2 产品体系的建立

作为主要满足中大比例尺立体测图应用的光学卫星测绘影像产品,其体系划分为 3 大类:基础测绘遥感影像产品、数字地形产品和专题应用产品。各类产品相互关系如图 3 所示。

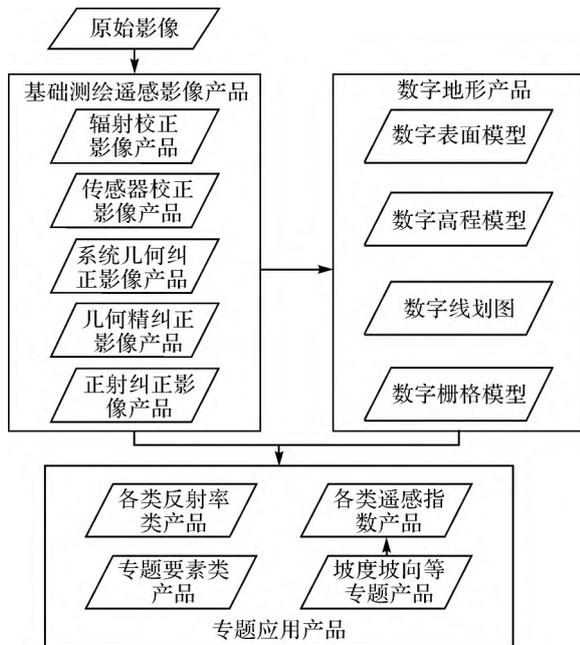


图 3 光学测绘卫星产品间相互关系

Fig.3 Diagram of data products of the optical surveying and mapping satellite

(1) 基础测绘遥感影像产品。基础测绘遥感影像产品根据影像的处理级别和地理定位精度可以分为原始影像(0级)、辐射校正影像产品(1级)、传感器校正影像产品(2级)、系统几何纠正影像产品(3级)、几何精纠正影像产品(4级)、正射纠正影像产品(5级)。

(2) 数字地形产品。数字地形产品包括数字表面模型(DSM)、数字高程模型(DEM)、数字线划图(DLG)和数字栅格图(DRG)等。目前,ZY-3 卫星已完成了全国正射影像产品(表 1)和全国数字表面模型产品(表 2)的制作和周期性更新。

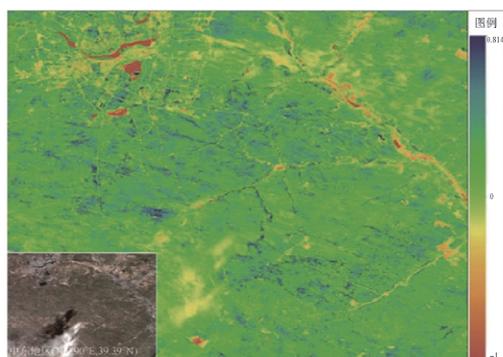
(3) 专题应用产品。以基础测绘影像产品和数字地形产品等为主要数据源,根据行业应用特点,利用专业技术和方法,进行信息增强、信息提取、自动分类和分析处理等,从而得到一系列服务于不同领域和不同需求的专题应用产品(图 4),主要包括:植被指数、叶面积指数、地表反射率、表观反射率、地表坡向、地表坡度、线状地物提取、海冰覆盖、叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度、气溶胶光学厚度等专题产品和多期专题变化专题产品等。

表 1 ZY-3 卫星全国数字正射影像产品技术参数  
Tab.1 Technical parameters of ZY-3 satellite digital orthophoto map product

项目	技术参数
数据源	资源三号等国产 2 米级卫星正射真彩色融合影像
空间分辨率/m	2
波段组合	红、绿、蓝三波段自然真彩色
位深/bit	8
影像时相	2013—2014 版、2015—2016 版、2017 版、2018 版、2019 版……
更新机制	每年更新一版
投影坐标系	WGS-84
定位精度	有控:5~10 m 无控:10~20 m
数据格式	GeoTIFF

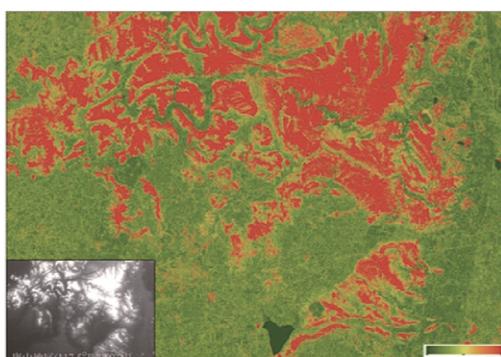
表 2 ZY-3 卫星全国数字表面模型产品技术参数  
Tab.2 Technical parameters of ZY-3 satellite DSM product

项目	技术参数
数据源	ZY-3 卫星 3.5 m 空间分辨率立体像对; ZY-3 卫星 2.5 m 空间分辨率立体像对(2016 年 5 月后)
空间分辨率	0.5 角度秒(约 15 m)/10 m
影像时相	2012 年 1 月—2015 年 6 月、2014 年 1 月—2017 年 10 月
更新机制	按需更新
投影坐标系	地理坐标
参考椭球系统	水平基准:WGS-84 高程基准:大地椭球面
定位精度	无控:平面中误差优于 6 m 高程中误差优于 9 m
分片尺寸	1°×1°
数据格式	GeoTIFF



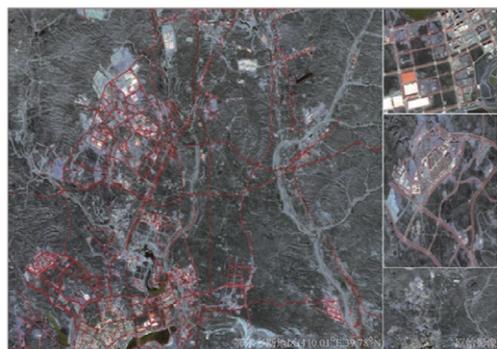
成像时间:2013年9月19日,分辨率:6 m

(a) 归一化植被指数专题产品成果



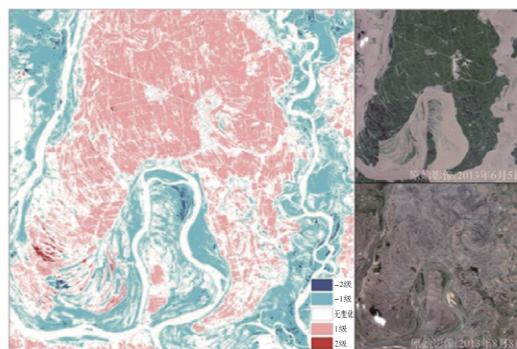
成像时间:2013年12月10日,分辨率:10 m

(b) 地表坡度专题产品成果



成像时间:2013年9月19日,分辨率:6 m

(c) 线状地物提取专题产品成果



成像时间:2013年9月1日,分辨率:6 m

(d) 多期专题变化专题产品成果

图 4 ZY-3 专题应用产品示意图

Fig.4 The matical application products of the optical surveying and mapping satellite of ZY-3

### 3 应用情况

经过 10 多年的努力,我国实现了自主卫星测绘“零的突破”和精度的不断提升,多元化的光学卫星测绘产品在资源调查、农业生产、水利建设、

生态环境保护、应急保障等方面全面替代国外同等分辨率卫星影像,成为高分辨率光学卫星业务化应用的典范。截至 2021 年底,面向全国各行业和全球 60 多个国家和地区,累计提供 210 万余景、16.6 亿多平方千米的数据和测绘产品服务,

应用成效显著,社会和经济效益明显。

### 3.1 空间地理信息数据快速获取和持续更新

(1) 基础时空信息数据库建设与更新。ZY-3 卫星自 2012 年发射以来,就成为我国 1:5 万基础地理信息数据库更新工作的基础核心数据源,有效缓解了长期以来困扰我国的基础地理信息数据库更新数据周期长的问题。以国产光学卫星影像为主体的自主数据源已经连续 6 年实现超过 97% 的有效覆盖保障,累计超过 12 万景的卫星影像成果应用于国家基础地理信息数据库更新,累计更新面积近 7600 万  $\text{km}^2$ ,为我国基础测绘工作提供了稳定、持续的数据保障,促进测绘产品的更新周期缩短 1/3,基础地理信息更新能力提高 2 倍以上<sup>[16]</sup>,大幅提升了我国光学遥感影像产品和测绘成果的现势性和精度。而以 GF-7 卫星为代表的亚米级高分辨率光学卫星为 2020 年珠峰高程测量、省级 1:1 万比例尺测图提供了独特的立体数据,逐步成为地方各级自然资源主管部门开展基础测绘、加强自然资源管理的重要手段。

(2) 天地图平台建设。自 2012 年以来,国家地理信息公共服务平台“天地图”平台即利用 ZY-3 卫星影像数据实现年度有效更新率持续提升,国内区域所用 2 m 级卫星影像国产化替代率连续 8 年达到 99% 以上,境外区域影像国产化替代率逐步提升。国产光学卫星持续保障“天地图”年度更新,累计提供了 9700 万  $\text{km}^2$  高质量卫星影像成果,其中国外影像 4900 万  $\text{km}^2$ 、国内影像 4800 万  $\text{km}^2$ ,实现了全国自主可控的公共影像服务年度业务化覆盖和更新,大大提升了社会公众对高清晰、高现势性影像服务的需求满足程度,产生了良好的社会效益。

(3) 全球地理信息资源建设与维护更新。遥感卫星具备全球数据获取能力,使得开展全球地理信息资源建设成为可能,可为“一带一路”倡议和“走出去”等国家战略实施提供自主、权威、统一、高效的全球高精度地理信息综合服务。2017 年,国家测绘地理信息局启动全球地理信息资源建设与维护更新项目,计划于 2025 年实现首次对全球 1:5 万基础地理信息框架要素的测绘。通过自主科技攻关,实现了无地面控制点条件下 ZY-3 卫星影像的处理和高精度绝对定向,优于 2.5 m 立体影像的平面中误差达到 2~4 m、高程中误差达到 1~2 m,满足影像几何定位精度优于 1:5 万比例尺测图要求,生产成本相对国内区域的传统

测绘生产降低了 70% 以上<sup>[34]</sup>。目前,累计保障实现全球约 1.1 亿  $\text{km}^2$  的优于 2.5 m 立体影像的获取,已完成任务区域超 8000 万  $\text{km}^2$  影像产品的生产和 233 个全球重点城市的测图,并有力地支持了“一带一路”倡议、国防建设、东盟信息港建设和多个部委及地方省份的相关应用;部分工程成果被东盟/上合组织环境保护合作中心以在线影像服务方式调用,支持跨国界水体环境综合管理决策。

(4) 卫星遥感应急保障。光学卫星测绘产品生产一般具备常规和应急两种影像获取和生产模式,其中,ZY-3 卫星应急测绘模式下最快 30 min 之内完成应急拍摄计划,应用系统保障 30 景数据处理时间小于 24 h<sup>[35]</sup>。2012 年以来,国产光学卫星积极参与干旱、洪涝、森林火灾以及滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害的应急保障工作,在一些群体性、社会性突发事件的应急响应、事故调查、事后评估中也发挥了支撑作用。通过建立灾害聚焦式连续观测、持续跟踪的保障机制,先后在四川汶川、雅安和青海玉树等特大地震灾害及新疆塔什库尔干、四川九寨沟县等地震灾害,舟曲特大滑坡泥石流灾害、金沙江和雅江滑坡导致堰塞湖等地质灾害,云南晋宁、四川木里及西昌、云南香格里拉多地、内蒙古大兴安岭等森林火灾中提供了及时有效的应急保障。紧急安排编程获取计划近千次,获取的灾前灾后影像产品均第一时间提供给救灾和支援单位,并向社会公众发布利用卫星影像三维立体可视化技术制作的灾害遥感解译图和三维可视化等监测成果(图 5),直观显示了灾前灾后对比、灾中发展态势。

### 3.2 自然资源管理

(1) 自然资源调查与监测。自然资源调查监测,是查清我国各类自然资源家底和变化情况的基础,而卫星遥感影像采集获取和全面覆盖,是开展各类自然资源调查监测的基础。

从 2017 年底开始,第三次全国国土调查工作就全面使用国产光学卫星影像数据。在时间紧、任务重、范围广的情况下,国产卫星影像实现了整体保障占比高达 96.22% 的重大突破,并在后续的统一时点更新工作和年度土地利用变更调查与遥感监测任务中持续发力。国产光学卫星影像的保障力度和数据质量逐步提升,使得国外商业卫星影像数据采购比例大幅下降,节约了大量国家财政经费。



图5 利用 ZY-3 立体数据生成三维仿真模拟 2020 年四川西昌森林火灾灾前灾后情况

Fig.5 Three dimensional simulation of the situation before and after the forest fire in Xichang in 2020 by stereoscopic image data of ZY-3 satellite

为满足第一次全国地理国情普查数据需求,ZY-3 卫星先后提供了 2.3 万余景、累计覆盖面积 1350 万  $\text{km}^2$  的影像数据,全面保障了地理国情普查标准时点核准工作的顺利开展。自 2016 年开始,国产光学卫星持续保障常态化、业务化的年度地理国情监测,累计提供卫星影像 17 万余景,每年均实现 2 m 以上任务区域 95% 以上面积的有效覆盖。

在各项自然资源调查工作中,光学卫星立体影像产品充分发挥优势,在地表覆盖要素的采集、调查、核实、分析工作中发挥了重要作用。在第一次全国地理国情普查试点工作中,利用 ZY-3 卫星立体影像快速生产了我国西部测图困难地区约 320 万  $\text{km}^2$ 、满足 1:2.5 万比例尺精度的 15 m 格网尺寸 DSM 产品,提升我国西部测图困难地区的数字地形产品精度和质量,及时解决了该区域面临的原有 DEM 产品精度无法满足高分辨率卫星影像正射纠正需求等问题。利用 ZY-3 卫星融合影像为地质、矿产调查应用提供底图参考,利用立体影像开展矿区高精度 DSM/DEM 制作,累计为地质调查工作提供卫星影像 1.5 万余景;连续 5 年向林业和草原系统提供全国卫星遥感影像与生产处理技术服务,利用 ZY-3 卫星立体影像生产并提供了 300 万  $\text{km}^2$  格网间隔 15 m 的 DSM 产品,同时将 2 m 数字正射影像制作成影像服务进行即时发布,辅助开展年度林地变更调查、森林

资源调查、湿地资源监测、林地卫片执法检查、森林资源管理“一张图”制作等相关工作,为林业部门开展全国林业应对气候变化碳汇计量和监测体系建设、境外森林资源调查等业务提供支撑<sup>[16-17]</sup>。

(2) 三维立体自然资源“一张图”和实景三维中国建设。利用 ZY-3 卫星影像数据,首次构建了覆盖全国的“2 m 分辨率卫星正射影像+10 m 分辨率地形格网”的三维立体测绘产品,并逐年进行更新,实现多时相产品的集成,已服务于基础测绘、资源管理、土地督察、交通设施建设、水利设施规划、自然保护区管理及国防等诸多领域。利用 GF-7 的高分辨率和立体测图的应用优势,面向省级自然资源管理部门提供 18.2 万景亚米级立体影像数据的服务,进一步为三维立体自然资源“一张图”和实景三维中国建设提供直接有力支撑。

(3) 地方自然资源管理应用。自然资源卫星遥感云服务平台融合了以 ZY-3 卫星为代表的多源、多分辨率、时效性强的自然资源卫星数据和主动及时的创新服务模式<sup>[36]</sup>,实现了光学卫星影像数据和产品在地方各级自然资源管理部门的充分应用。从 2012 年开始,ZY-3 卫星面向地方各级自然资源管理工作和任务提供 120 余万景影像数据;到 2019 年,数据资源逐步通达全国 31 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团的省级自然资源卫星应用技术中心,累计超 200 万景的卫

星影像数据直接服务地方自然资源管理业务。省级自然资源主管部门在近 10 年光学卫星影像应用实践的基础上,围绕自身业务发展需求和地方特色,形成了一批可推广、可落地的典型应用和示范服务,取得了良好的应用成效,推动 ZY-3 卫星数据在生态环境与矿山资源遥感监测、空间格局变化监测、永久基本农田占用与补划、城乡建设用地增减挂钩管理、领导干部自然资源资产离任(任中)审计等特色应用,支撑地方自然资源管理。

### 3.3 国家治理

(1) 服务于生态文明建设。利用 ZY-3 卫星等国产高分辨率卫星影像完成长江经济带非法码头专项整治卫星遥感监测(图 6),为长江经济带沿江非法码头专项整治工作提供了有力支撑。开展了安徽扬子鳄、湖北神农架等国家级自然保护区遥感监测,快速摸清了保护区的自然资源要素的变化情况,为保护区现场督察执法、生态恢复与治理提供了基础地理空间信息支持。

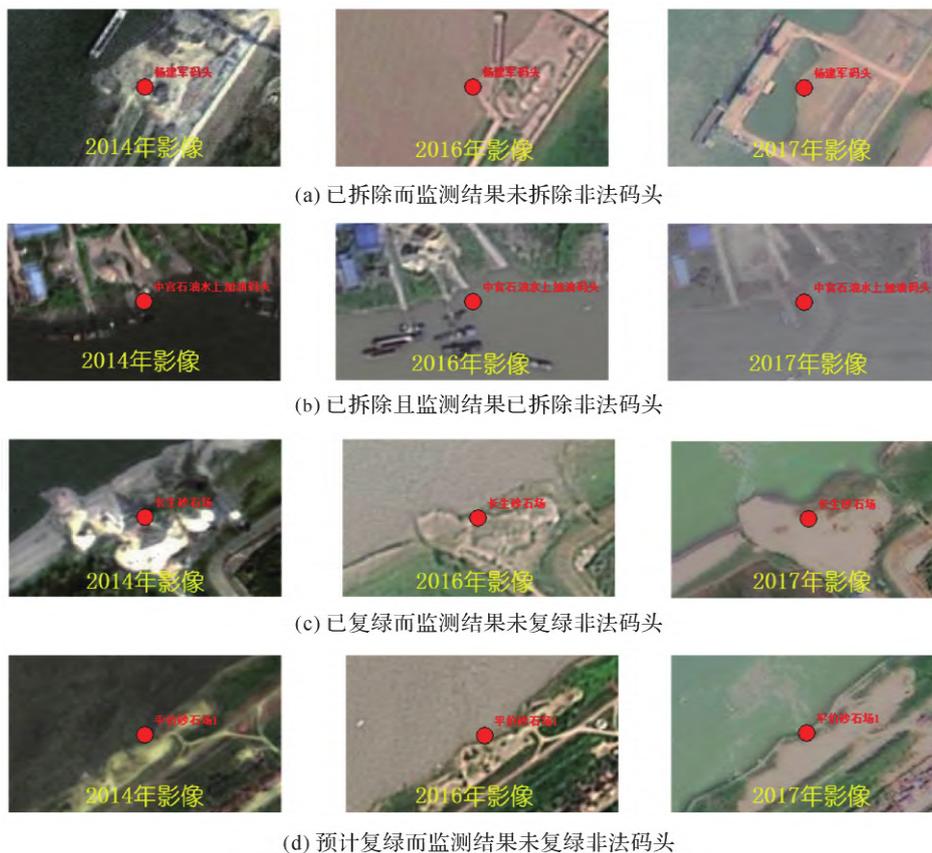


图 6 长江经济带沿江非法码头专项整治星遥感监测成果示例

Fig.6 Satellite remote sensing monitoring results of the special renovation of illegal wharves along the Yangtze River Economic Belt

(2) 服务于供给侧结构性改革。利用 ZY-3 卫星和其他民用高分辨率光学卫星影像,对钢铁企业空间分布信息进行收集、校准和分析,并结合热红外卫星等多源监测手段,对钢铁企业去产能情况进行定量评估和定性监测,推动了政府部门用“数据说话、数据决策、数据管理、数据创新”的新型监测监管手段。在后续实施的“基于遥感卫星应用构建政府监管服务平台建设项目”建设中,国产卫星持续发力,按季度编制全国钢铁去产能遥感监测分析报告,为相关行业协会、发展改革委地条钢举报案件提供数据支撑。

(3) 服务于“放管服”改革。党的十九届四中全会和中央经济工作会议提出“赋予省级人民政府更大用地自主权”后,国务院高度重视,进行专题研究,于 2020 年 3 月 12 日做出《关于授权和委托用地审批权的决定》,将新法规定可以授权的两项审批事项一次性授权给各省区市人民政府,同时,将国务院仍然保留的审批事项,通过试点的方式,委托给部分省级政府行使。为防止出现“一放就乱”的现象发生,自然资源部充分运用遥感监测手段作为技术保障(图 7)。



图7 通过卫星影像解译分析 2019 年度新增建(构)筑物图斑对比

Fig.7 Comparison and analysis of newly-built buildings through interpretation of satellite images

### 3.4 行业应用

(1) 环境保护。连续 6 年向中国环境监测总站提供全国陆域范围内的以 ZY-3 为主体的国产光学卫星数据及数字正射影像产品,为国家环境监测网提供预动态图斑生产和影像服务即时发布等生态遥感影像处理技术服务。

(2) 水利。连续多年利用 ZY-3 卫星制作正射融合影像和数字表面模型等产品,服务于长江、黄河、松辽、海河等 7 大流域和水利单位开展水利工程检测、灌溉面积调查、水利基础空间库建设与更新、灾情评估本底库建设等业务应用,利用 GF-7 开展水土保持监测与评价专题产品制作,有效提升了卫星测绘影像产品在水利部门的应用效能。今后,国产光学测绘卫星将针对支撑智慧水利建设、河道采砂与岸线管理、调水工程规划与管理、水文监测现代化、人为水土流失监管等高质量应用开展有益探索。

(3) 公益诉讼。受中华人民共和国最高人民检察院委托,依托卫星影像统筹获取、自动化数据处理、智能化信息提取和变化检测等技术手段,持续开展基于国产卫星遥感影像数据的自然资源公益诉讼调查取证工作(图 8),利用卫星遥感影像配合公益诉讼调查取证案件数十件,为我国智能检务系统的信息化建设提供了有力支撑。

(4) 导航服务。为拓展卫星测绘产品助力产业发展应用,与四维图新、高德软件等公司合作,开展路网变化发现与提取、道路变化率监测等技术研发,实现了基于 ZY-3 卫星影像机顶盒服务的快速路网更新模式创新,形成了基于 ZY-3 卫星立体

影像的三维导航地图产品。通过与导航厂商的多次交流与试验,目前已经取得重大突破,相关产品将为智能驾驶、无人驾驶提供重要数据支撑。

### 3.5 国际合作与交流

围绕国家“一带一路”倡议、政府间国际科技创新合作等,利用遥感卫星的全球获取能力,推进与境外政府部门、科研院所、应用机构之间多层次的合作共享,形成了以点带面、多点开花、持续辐射的国际合作应用服务模式,促进了一系列双边及多边国际合作的开展和项目落地<sup>[37]</sup>。全球已有 77 个国家和 18 个地区利用 ZY-3 卫星等国产高分辨率光学卫星影像数据和服务开展了政府公益、科学研究、资源监测、环境保护等方面的多项工作。与英国、奥地利、挪威、泰国、老挝、蒙古国、斯里兰卡、孟加拉国、肯尼亚、加纳、乌干达、尼泊尔、柬埔寨、委内瑞拉、约旦、赞比亚、印度尼西亚、埃及、卢旺达、秘鲁、阿根廷等 21 个国家深化 ZY-3 卫星等国产卫星在境外的应用和国际合作,签署合作谅解备忘录及有关数据协议,通过自然资源卫星遥感云服务平台持续推送属地数据,支撑当地政府和非营利性组织对于高分辨率卫星影像的应用需求<sup>[38]</sup>。截至 2021 年,云平台国际节点推送总量达 87 万余景 ZY-3 卫星等影像数据,半数以上国家已实现本土 90% 以上覆盖。老挝、尼泊尔、蒙古国、泰国、斯里兰卡等国家测绘地理信息专业部门,已将 ZY-3 卫星影像数据应用在其国家级工程和项目之中,奥地利等国的科研机构基于 ZY-3 卫星数据开展科研合作,并积极推广 ZY-3 卫星在本国的技术应用。



图 8 白沙洲非法违建案件调取 ZY-3 卫星影像资料

Fig.8 ZY-3 satellite image data for illegal construction cases(Bai sha sandbar in Wuhan City)

近年来,随着我国国产高分辨率卫星影像数据日益获得合作国家政府的认可,ZY-3 国际合作取得了突破性进展。面向亚太空间合作组织 (APSCO)、联合国粮农组织 (FAO)、联合国附属空间科技教育西亚区域中心 (RCSSTEWA) 等 3 个国际组织提供 5.2 万景 ZY-3 卫星数据,通过地球观测组织 (GEO) 向太平洋岛国和地区提供了 2600 余景高分辨率卫星影像和遥感影像图册,以卫星遥感视角贡献了中国智慧与中国方案,形成国产光学测绘卫星品牌影响力。

#### 4 结束语

资源三号、高分系列等国产民用光学卫星作为我国对地观测卫星体系的重要组成和典型代表,为社会经济各行业发展和国际交流合作提供了鲜活的卫星影像数据和产品服务,充分释放了卫星应用效能,提升了我国遥感卫星的影响力。ZY-3 卫星和 GF-7 卫星作为我国光学立体测绘卫星的代表,实现了“从无到精”的历史性跨越,已逐步构建起我国民用光学卫星测绘技术体系、产品体系和应用服务体系。但是也应看到,国产测绘卫星还存在卫星体系发展不平衡不充分、卫星平台及传感器的种类不够丰富、地面接收站与定标场网覆盖不足等短板<sup>[1,11]</sup>。

按照《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025 年)》,资源三号 04 星(ZY-3 04)、高分七号 02 星(GF-7 02)正在开展指标论证等工作,有望在“十四五”期间发射。随着空基规划的逐步落实、顶层设计的日益完善以及关键技术的不断突破,我国将构建更加完备的高分辨率对地观测卫星体系,将显著提升我国自然资源立体调查和监测监管能力,为国民经济建设和社会发展提供基础性数据保障,大幅提升测绘产品的应用水平和服务能力<sup>[30]</sup>。

致谢: 特别感谢欧阳斯达、高欣圆、莫凡、高小明、周平、王光辉等对本文所做的贡献。

#### 参考文献:

[1] 唐新明, 胡芬. 卫星测绘发展现状与趋势[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(4): 26-35.  
TANG Xinming, HU Fen. Development status and trend of satellite mapping[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(4): 26-35.

[2] 曹海翔, 戴君, 张新伟, 等. “高分七号”高精度光学立体测绘卫星实现途径研究[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(2): 17-28.  
CAO Haiyi, DAI Jun, ZHANG Xinwei, et al. Study on the development approach of GF-7 high precision optical stereo mapping satellite [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2020, 41(2): 17-28.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准

- 化管理委员会. GB/T 35642-2017 1 : 25 000 1 : 50 000 光学遥感测绘卫星影像产品[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 35642-2017 1:25 000 1 : 50 000 imagery products of optical remote sensing satellite for surveying and mapping[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [4] 唐新明, 高小明. 我国测绘卫星和卫星测绘“十二五”发展战略研究[J]. 测绘通报, 2012(10): 1-4.  
TANG Xinming, GAO Xiaoming. The Twelfth Five-year development strategy research of mapping satellite and satellite surveying of China[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(10): 1-4.
- [5] 唐新明, 丛楠. 我国测绘卫星现状与发展思考[J]. 地理信息世界, 2011, 9(2): 40-44.  
TANG Xinming, CONG Nan. Present situation and development of surveying and mapping satellites in China[J]. Geomatics World, 2011, 9(2): 40-44.
- [6] 孙承志, 唐新明, 翟亮. 我国测绘卫星的发展思路和应用展望[J]. 测绘科学, 2009, 34(2): 5-7.  
SUN Chengzhi, TANG Xinming, ZHAI Liang. Development ideas and application prospects of surveying and mapping satellite in China[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(2): 5-7.
- [7] 唐新明, 谢俊峰, 张过. 测绘卫星技术总体发展和现状[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 17-24.  
TANG Xinming, XIE Junfeng, ZHANG Guo. Development and status of mapping satellite technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(3): 17-24.
- [8] 曹海翊, 刘付强, 赵晨光, 等. 高分辨率立体测绘卫星技术研究[J]. 遥感学报, 2021, 25(7): 1400-1410.  
CAO Haiyi, LIU Fuqiang, ZHAO Chenguang, et al. The study of high resolution stereo mapping satellite[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(7): 1400-1410.
- [9] 曹海翊, 张新伟, 赵晨光, 等. 高分七号卫星总体设计与技术创新[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(5): 1-9.  
CAO Haiyi, ZHANG Xinwei, ZHAO Chenguang, et al. System design and key technologies of the GF-7 satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(5): 1-9.
- [10] 王建荣, 杨元喜, 胡燕, 等. 光学测绘卫星现状与发展趋势分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). (2022-04-28) [2022-06-15]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220074>.  
WANG Jianrong, YANG Yuanxi, HU Yan, et al. Analysis on the status and development trend of optical surveying and mapping satellites[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. (2022-04-28) [2022-06-15]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220074>.
- [11] 杨元喜, 任夏, 王建荣. 集成型与智能型测绘卫星工程发展及其关键技术[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 854-861. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220048.  
YANG Yuanxi, REN Xia, WANG Jianrong. Development of integrated and intelligent surveying and mapping satellite project with corresponding key technology, 2022, 51(6): 854-861. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220048.
- [12] 李德仁, 王密. 高分辨率光学卫星测绘技术综述[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(2): 1-11.  
LI Deren, WANG Mi. A review of high resolution optical satellite surveying and mapping technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2020, 41(2): 1-11.
- [13] 曹海翊, 戴君, 徐驰, 等. 资源三号系列卫星及其应用概况[J]. 卫星应用, 2020(10): 11-13.  
CAO Haiyi, DAI Jun, XU Chi, et al. The overview of ZY3 satellite and its application[J]. Satellite Application, 2020(10): 11-13.
- [14] 唐新明, 张过, 祝小勇, 等. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证[J]. 测绘学报, 2012, 41(2): 191-198.  
TANG Xinming, ZHANG Guo, ZHU Xiaoyong, et al. Triple linear-array imaging geometry model of Ziyuan-3 surveying satellite and its validation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(2): 191-198.
- [15] 张曼倩, 徐驰, 刘付强. 三星齐聚, 中国卫星测绘阔步前进——访资源三号卫星总设计师曹海翊[J]. 国际太空, 2020(9): 4-7.  
ZHANG Manqian, XU Chi, LIU Fuqiang. An interview of CAO Haiyi, the chief designer of ZY3 satellite[J]. Space International, 2020(9): 4-7.
- [16] 李国元, 唐新明. 资源三号 02 星激光测高精度分析与验证[J]. 测绘学报, 2017, 46(12): 1939-1949. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170174.  
LI Guoyuan, TANG Xinming. Analysis and validation of ZY-3 02 satellite laser altimetry data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(12): 1939-1949. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170174.
- [17] 李国元, 高小明, 陈继溢, 等. 资源三号 02 星激光测高精度数据质量分析[J]. 遥感学报, 2019, 23(6): 1159-1166.  
LI Guoyuan, GAO Xiaoming, CHEN Jiyi, et al. Data quality analysis of ZY-3 02 satellite laser altimeter[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(6): 1159-1166.
- [18] 唐新明, 王鸿燕, 祝小勇. 资源三号卫星测绘技术与应用[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1482-1491. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170251.  
TANG Xinming, WANG Hongyan, ZHU Xiaoyong. Technology and applications of surveying and mapping for ZY-3 satellites [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1482-1491. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170251.
- [19] 唐新明, 王鸿燕. 资源三号卫星应用分析与展望[J]. 航天器工程, 2016, 25(5): 1-10.  
TANG Xinming, WANG Hongyan. Analysis and prospect of application of ZY-3 satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(5): 1-10.
- [20] TANG Xinming, ZHOU Ping, ZHANG Guo, et al. Geometric accuracy analysis model of the Ziyuan-3 satellite without GCPs [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(12): 927-934.
- [21] TANG Xinming, ZHOU Ping, ZHANG Guo, et al. Verification of ZY-3 satellite imagery geometric accuracy without ground control points [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(10): 2100-2104.
- [22] 李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星——资源三号测绘卫星[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 317-322.  
LI Deren. China's first civilian three-line-array stereo map-

- ping satellite: ZY-3[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3): 317-322.
- [23] 曹海翊, 刘希刚, 李少辉, 等. “资源三号”卫星遥感技术[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 7-16.  
CAO Haiyi, LIU Xigang, LI Shaohui, et al. ZY-3 satellite remote sensing technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(3): 7-16.
- [24] 李国元, 周平, 陈继溢, 等. 资源三号 03 星激光测高数据处理与复合测绘应用[J/OL]. 红外与激光工程. (2021-08-26) [2022-06-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20210826.0841.004.html>.  
LI Guoyuan, ZHOU Ping, CHEN Jiyi, et al. Laser altimetry data processing and combined surveying application of zy3-03 satellite[J/OL]. Infrared and Laser Engineering. (2021-08-26) [2022-06-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20210826.0841.004.html>.
- [25] 徐红. “高分七号”来了! 1 万地形图全覆盖还远吗?——访高分专项应用系统副总设计师、自然资源部国土卫星遥感应用中心总工程师唐新明[J]. 中国测绘, 2020(10): 13-17.  
XU Hong. An interview of TANG Xinming, the deputy chief designer of high score special application system[J]. China Surveying and Mapping, 2020(10): 13-17.
- [26] ZHU Xiaoyong, TANG Xinming, ZHANG Guo, et al. Accuracy comparison and assessment of DSM derived from GFDM Satellite and GF-7 Satellite imagery[J]. Remote Sensing, 2021, 13(23): 4791. DOI: 10.3390/rs13234791.
- [27] 谢俊峰, 刘仁, 王宗伟, 等. 高分七号星载激光在轨几何检校与精度评估[J/OL]. 红外与激光工程. (2020-12-14) [2022-06-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20201214.0944.006.html>.  
XIE Junfeng, LIU Ren, WANG Zongwei, et al. In-orbit geometric calibration and accuracy evaluation of GaoFen-7 spaceborne laser altimeter[J/OL]. Infrared and Laser Engineering. (2020-12-14) [2022-06-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20201214.0944.006.html>.
- [28] 胡柳茹, 唐新明, 张智, 等. 高分七号卫星多源遥感数据精度优化与评估[J/OL]. 红外与激光工程. (2021-11-03) [2022-06-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20211102.1615.006.html>.  
HU Liuru, TANG Xinming, ZHANG Zhi, et al. Accuracy optimization and assessment of GF-7 satellite multi-source remote sensing data[J/OL]. Infrared and Laser Engineering. (2021-11-03) [2022-06-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20211102.1615.006.html>.
- [29] 罗恒, 贺彪, 郭仁忠, 等. 高分七号图像质量评价与解译度分析[J]. 测绘工程, 2022, 31(2): 1-7.  
LUO Heng, HE Biao, GUO Renzhong, et al. GF-7 image quality assessment and interpretability analysis[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2022, 31(2): 1-7.
- [30] 莫凡, 李鸿洲. 坐地日行八万里, 巡天遥看一星河——戴上 3D 眼镜, 高分七号邀你畅游立体地球[J]. 中国测绘, 2020(1): 54-57.  
MO Fan, LI Hongzhou. GF-7 satellite invites you to visit the three-dimensional earth[J]. China Surveying and Mapping, 2020(1): 54-57.
- [31] 丹妮. 载荷创新领跑者, 助力“高分七号”——访航天科技集团五院西安分院高分七号卫星副总设计师郑小松[J]. 中国测绘, 2020(10): 21-23.  
DAN Ni. An interview of ZHEGN Xiaosong, the deputy chief designer of GF-7 satellite[J]. China Surveying and Mapping, 2020(10): 21-23.
- [32] 孙伟伟, 杨刚, 陈超, 等. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析[J]. 遥感学报, 2020, 24(5): 479-510.  
SUN Weiwei, YANG Gang, CHEN Chao, et al. Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(5): 479-510.
- [33] 唐新明, 王鸿燕, 周平, 等. 资源三号卫星数据及产品体系[J]. 卫星应用, 2020(10): 14-18.  
TANG Xinming, WANG Hongyan, ZHOU Ping, et al. Data and product system of ZY3 satellite[J]. Satellite Application, 2020(10): 14-18.
- [34] 王鸿燕, 唐新明, 樊文锋, 等. 资源三号卫星在自然资源管理中的应用[J]. 卫星应用, 2020(10): 19-25.  
WANG Hongyan, TANG Xinming, FAN Wenfeng, et al. Application of ZY3 satellite in natural resources management[J]. Satellite Application, 2020(10): 19-25.
- [35] 胡轶之, 王鸿燕, 欧阳斯达, 等. 基于资源三号以及多源数据统筹的应急遥感服务保障[J]. 卫星应用, 2020(10): 26-31.  
HU Yizhi, WANG Hongyan, OUYANG Sida, et al. Emergency response service based on ZY3 and multi-source satellite remote sensing data[J]. Satellite Application, 2020(10): 26-31.
- [36] 王光辉, 徐雪蕾, 刘慧杰, 等. 创新与共享 构建自然资源卫星影像云服务平台[J]. 中国测绘, 2019(10): 12-13.  
WANG Guanghui, XU Xuelei, LIU Huijie, et al. Innovation and sharing to build a natural resources satellite image cloud service platform[J]. China Surveying and Mapping, 2019(10): 12-13.
- [37] 王鸿燕, 唐新明, 叶芳宏, 等. 资源三号卫星国际合作与应用推广[J]. 卫星应用, 2020(10): 36-39.  
WANG Hongyan, TANG Xinming, YE Fanghong, et al. International cooperation and application promotion of ZY3 satellite[J]. Satellite Application, 2020(10): 36-39.
- [38] 王鸿燕. 国产卫星影像助力“一带一路”建设[J]. 中国测绘, 2018(6): 4-9.  
WANG Hongyan. Domestic satellite images for the construction of the “the Belt and Road”[J]. China Surveying and Mapping, 2018(6): 4-9. (责任编辑:张艳玲)

收稿日期: 2022-03-07

修回日期: 2022-06-28

第一作者简介: 唐新明(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,研究方向为遥感和航天摄影测量。

First author: TANG Xinming(1966—), male, PhD, researcher, PhD supervisor, majors in remote sensing, space photogrammetry and related application.

E-mail: txm@lasac.cn

通信作者: 王鸿燕

Corresponding author: WANG Hongyan

E-mail: wanghy@lasac.cn