

5米光学02星应用在轨测试

唐新明¹, 肖晨超¹, 魏红艳¹, 刘宇¹, 韩波², 刘银年³, 王军⁴

1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;

2. 中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100094;

3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

4. 北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要: 5米光学02星于2021年12月26日成功发射, 卫星与前序型号组成陆地中分业务卫星星座, 建设形成天地一体化大幅宽定量化综合对地观测能力。在轨测试期间, 自然资源部根据卫星设计指标要求, 围绕土地资源、地质矿产、测绘地理信息、海洋海岛监测等领域业务, 梳理共计32个业务测试项, 并按照自然资源调查和监测的相关标准和技术规范, 开展了应用测试评价工作。在轨测试表明, 卫星系统、地面系统 and 应用系统各项功能正常、运行稳定, 双星一致性好, 具备组网运行条件, 卫星数据质量可满足自然资源执法督察、地质矿产资源调查、生态修复工程跟踪评价、地理空间信息更新、围填海调查、海岸线变化监测、钢铁去产能等业务需求, 高光谱和热红外载荷定量应用测试取得良好效果。本文在介绍该卫星的数据特点与应用能力的基础上, 重点介绍和分析卫星在轨测试应用评价结果, 可为后续业务化应用提供参考。

关键词: 遥感, 5米光学02星, 自然资源, 卫星应用, 可见光/近红外, 高光谱, 热红外

中图分类号: TP79/P2

引用格式: 唐新明, 肖晨超, 魏红艳, 刘宇, 韩波, 刘银年, 王军. 2024. 5米光学02星应用在轨测试. 遥感学报, 28(3): 591-600

Tang X M, Xiao C C, Wei H Y, Liu Y, Han B, Liu Y N and Wang J. 2024. In-orbit application testing of 5 m Optical Satellite 02 (ZY1-02E). National Remote Sensing Bulletin, 28(3): 591-600 [DOI: 10.11834/jrs.20232522]

1 引言

自然资源部成立以来, 为更好的履行“两统一”职责, 卫星遥感应用已从土地及矿产资源的观测为主, 拓展至山水林田湖草全要素观测; 由数量及权属调查为主延伸为“数量、质量、生态”三位一体调查与监测, 卫星遥感的观测范围及频次要求空前提升。卫星遥感在自然资源调查监测、确权登记、所有者权益、开发利用、国土空间规划、用途管制、生态修复和督察执法等自然资源主体业务中正发挥越来越重要的作用, 同时不断拓展服务国家宏观管理与规划的多个领域。

近年来伴随着管理需求的不断延伸, 业务卫星及应用技术研发也取得长足的发展, 其中自然资源部作为主用户的中国首颗民用高光谱业务卫星(5米光学01星)于2019年成功发射。该星在轨运

行后, 其数据不仅迅速在地质矿产等领域开展应用(孙雨等, 2022; 赵志芳等, 2022; 魏红艳等, 2020), 围绕数据融合、传感器标定等方面开展大量技术研究(郭慧婷等, 2020; 唐洪钊等, 2020), 并且针对卫星系统(张宏宇等, 2020)、应用系统设计(肖晨超等, 2020)总结了相关成果和经验, 为后续高光谱卫星的发展奠定了基础。

5米光学02星属于中国民用空间基础设施规划中的业务卫星序列。该星由自然资源部作为牵头部门负责卫星工程建设, 设计提供2.5 m全色/10 m多光谱、30 m高光谱和16 m热红外图像数据, 为1:10万—1:25万自然资源的调查、监测、监管和产能监控等业务提供国产数据保障, 并服务于应急管理、生态环境、住房和城乡建设、交通运输、农业农村、林业草原相关行业应用。

随着中国空间基础设施建设不断完善, 新的

收稿日期: 2022-10-13; 预印本: 2023-02-22

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2021YFB3900505)

第一作者简介: 唐新明, 研究方向为摄影测量与国产卫星遥感应用。E-mail: tangxinming99@qq.com

遥感卫星逐步向着一星多用、多星组网的模式发展。5米光学02星与前序5米光学01星组网,在多载荷协同获取数据的同时,组网运行可实现中国任意地区最快2天重访。2021年12月26日5米光学02星在中国在太原卫星发射中心使用长征四号运载火箭顺利发射入轨,通过7个月的在轨测试及状态调优,卫星持续稳定运行,地面系统和应用系统各项功能正常,测试性能达到研制总要求规定的各项指标,双星具备组网运行条件,已成为中国陆地资源调查与监测的重要保障,并将为高分辨率定量遥感监测技术研发、地球关键带科学观测等工作提供有效数据源。

2 卫星主要特点

针对自然资源山、水、林、田、湖、草整体保护、系统修复、综合治理中多要素定量遥感观测的重要需求,5米光学02星主推光谱分辨能力,卫星传感器谱段范围覆盖了可见近红外、短波红外和长波红外的典型波段,定量遥感特性突出,定位于中高分辨率大幅观观测和量化遥感任务。卫星及标准数据产品主要技术指标如表1所示。

可见光/近红外相机方面,多光谱谱段设计由传统四谱段拓展到八谱段,增加海岸蓝、黄、红边和近红外等谱段,进一步增强了可见光/近红外相机对植被、水体、林木、农作物等要素的量化观测的能力,有望在地表类型识别、植被参数计算、水体监测、作物养分及病害监测等方面得到更加充分的应用,同时更便于开展与哨兵等多谱段卫星的联合应用。

高光谱相机方面,实现了可见近红外至短波红外区间内166个通道的连续光谱观测,并且通过视场倍增光学中继方法,实现宽谱宽幅高光谱分辨率超低畸变精细分光。卫星所搭载的高光谱相机具有大视场、小F数的同时,数据的幅宽及信噪比等指标较国内外同类卫星有一定优势(Zhong等, 2021),通过规模化对地光谱数据获取,将有力支撑自然资源质量与生态遥感监测业务实施。

热红外相机方面,卫星可获取16 m空间分辨率热红外图像,并支持通过超分成像进一步将空间分辨率提升至10 m,是目前民用空间分辨率最高的热红外数据。长波红外遥感可不受昼夜限制,全天时对地面目标进行观测,满足地面温度目标遥感最新应用需求(段四波等, 2021; 吴骅等, 2021)。

表1 卫星及标准数据产品主要参数表

Table 1 The main specifications of the satellite and standard data product

主要指标	指标实现情况
谱段设置	全 色: 0.45—0.90 μm (PAN)
	多光谱: 0.45—0.52 μm (B1)
	0.52—0.59 μm (B2)
	0.63—0.69 μm (B3)
	0.77—0.89 μm (B4)
	0.40—0.45 μm (B5)
	0.59—0.625 μm (B6)
	0.705—0.745 μm (B7)
空间分辨率	0.860—1.040 μm (B8)
	热红外: 8—10 μm
	高光谱: 0.4—2.5 μm
幅宽	全色/多光谱: 优于 2.5 m/10 m
	高光谱: 优于 30 m
相对辐射定标精度	热红外: 优于 16 m
	全色/多光谱/热红外: 优于 115 km
绝对辐射定标精度	高光谱: 优于 60 km
	全色/多光谱: 优于 1.5%
星下点平坦区无控定位精度	高光谱: 优于 1%(大气窗口)
	热红外: 优于 1%(星上定标)
内部几何精度	全色/多光谱: 优于 7%
	高光谱: 优于 7%(大气窗口)
轨道回归周期	热红外: 优于 1 K (@300 K)
	全色/多光谱: 优于 25 m (CE90)
	高光谱: 优于 50 m (CE90)
	热红外: 优于 60 m (1σ)
	优于 1个像元 (1σ)
	55 d
	29°侧摆情况下重访周期 3 d

3 应用测试评价

为验证5米光学02星在自然资源主体业务中的可用性及应用潜力,在完成卫星系统、星地一体化及地面系统测试的基础上,基于各载荷卫星标准数据产品,围绕土地资源、地质矿产、测绘地理信息、海洋海岛监测等领域业务,在河北、云南、辽宁、内蒙古自治区等共选择35处测试区,选择不同载荷、地貌类型以及应用场景的在轨影像数据共计227景(其中多光谱131景、高光谱87景、热红外9景),开展了32项业务应用测试,对卫星设计指标进行测试验证(表2),同时对地面处理系统的算法进行必要的调整和优化。为卫星投入使用后顺利开展业务化应用奠定基础。

在轨测试表明,卫星系统、地面系统和应用

系统各项功能正常、运行稳定, 双星一致性好, 具备组网运行条件, 可满足自然资源、应急管理、生态环境、住房和城乡建设、农业农村、林业和

草原等行业主体业务对同等数据质量的要求, 高光谱和热红外载荷定量应用测试效果良好。

表2 主要在轨测试项

Table 2 The list of application test items

业务类型	业务名称
土地资源	自然资源执法督查、土地利用变更调查及核查
地质矿产	基础地质遥感调查、矿产资源遥感调查、植被覆盖区矿产资源调查、矿产资源开发现状遥感监测、海岸带地质环境遥感监测、生态地质环境遥感监测、城市地质环境遥感调查、地质灾害调查与监测
生态修复	矿山环境及恢复治理遥感监测、矿区周边土壤生态遥感监测、耕地土壤质量指标遥感监测、地表水资源遥感监测、湖库水质遥感监测、高原地区植被生态调查与监测、重点生态功能区植被定量遥感监测、草原退化监测、草原典型物种识别、湿地精细分类、生态修复工程实施监测
测绘地理信息	地理国情监测数据更新、1:5万和1:10万比例尺地理空间信息更新
海洋	近海养殖区监测、海域及海岛动态监测、海洋突发事件应急响应、海洋典型生态系统监测、近海海洋生态环境监测、极地监测、海水表面温度监测
工业与产能	钢铁去产能遥感监测、城市热岛遥感监测

3.1 土地资源领域

针对新增建设变化的“早发现、早制止、严查处”的监测需求(徐红, 2021), 在轨测试中利用2.5 m全色与多光谱融合数据, 开展新增线形地物、建(构)筑物、推填土、光伏用地、高尔夫用地和挖湖造景用地等6类变化信息的监测应用测试。测试结果表明, 融合影像各地表要素间的色调差异明显、地表要素的识别能力强, 地表要素

间的接触边界清晰, 通过多时相高分辨率遥感影像比对, 能获取疑似违法图斑类型的属性、形态(图1)等信息, 具有较高的识别精度。所提取新增建设用地的最小图斑满足最小0.6 ha的要求, 可用于常态化执法督察、土地资源全天候遥感监测等业务应用。多光谱115 km的大幅宽, 可实现大中型城市一次性全覆盖, 具有较强的数据区域连片覆盖能力。



(a) 前时相数据
(a) Pre-phase image



(b) 后时相数据
(b) Post-phase image

图1 新增线性地物遥感影像特征

Fig. 1 Remote sensing imagery of new linear feature

除土地利用类型外, 充分发挥高光谱定量监测优势, 利用5米光学01星构建的黑土地高光谱监测模型(Shang等, 2020, 2021), 开展耕地土壤质量相关测试工作。在辽宁省彰武县/黑山县首先通过光谱探测方式识别耕地范围内裸土像元分布, 在此基础上基于有机质、砂粒敏感光谱波段

构建特征指数, 并基于历史经验模型反演土壤有机质(图2)、砂粒含量等土壤参量数值, 测试数据反演结果与参考数据的回归系数优于0.7, 显示出星载高光谱数据在耕地土壤监测中有良好的应用前景。

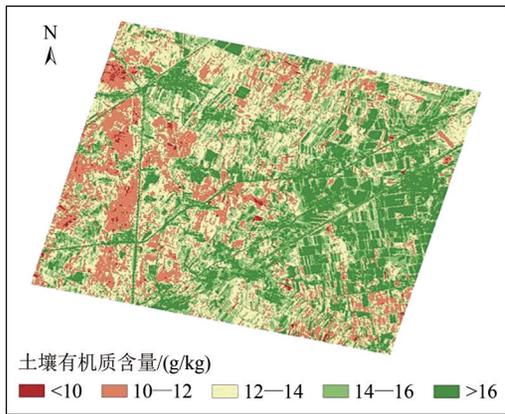
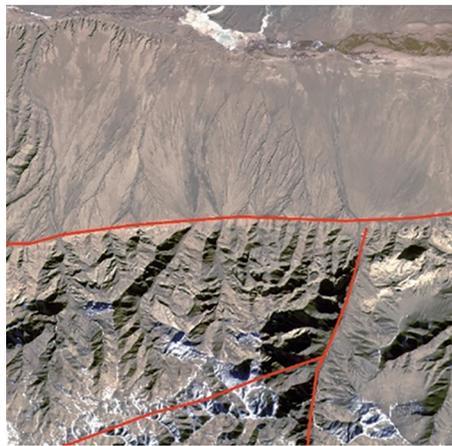


图2 土壤有机质含量分级反演图

Fig. 2 Inversion map of soil organic matter content

3.2 地质矿产领域

全色与多光谱融合数据，既保留了多光谱波段的色调，又提高了其空间分辨率（邵亚奎等，2019）。在断裂构造的识别、构造的空间展布形态、构造性质等构造信息的判识方面，具有较好的应用效果（图3（a）），甚至在某些构造复杂地段还能识别出劈理、褶皱、韧性剪切带等微构造。在地质体解译方面，数据能有效地识别并圈出直径大于25 m的闭合地质体（图3（b））或宽度大于25 m、长度大于25 m的块状地质体；长度大于100 m、或宽大于20 m的线状地物（断裂、脉岩等）。



(a) 深大断裂
(a) Deep and large faults



(b) 裸露岩脉
(b) Exposed dikes

图3 裸露区构造岩性影像特征

Fig. 3 Structural and lithologic image features of exposed areas

裸露区典型矿物信息在星载高光谱数据中可有效表达（李根军等，2021）。5米光学02星高光谱数据的矿物信息响应较好，矿物特征谱形清晰可辨，特征吸收位置较准确，不仅可用于识别不同的矿物种类（图4），还能反演矿物的相对丰度信息。在业务应用中，基于矿物共生组合规律、成矿指示矿物，可快速为找矿预测、资源潜力评价、靶区圈定与优选提供重要信息（丁文清和丁林，2022）。

此外，5米光学02星全色与多光谱融合影像可获取采场、尾矿库（图5）等矿产资源开发要素的范围、位置等信息，结合其他信息可确定/推测不同矿山的开采状态、开采矿种、开采方式等信息；此外，还可利用该数据进行矿山地质灾害等环境信息的定性判别；在江西德兴铜矿周边，基于卫

星高光谱数据所构建的铜胁迫植被指数（夏天等，2021），进一步结合地面采样数据反演土壤重金属含量分级反演结果（图6），总体精度超过70%，可为矿区周边土壤生态遥感监测应用提供支撑。

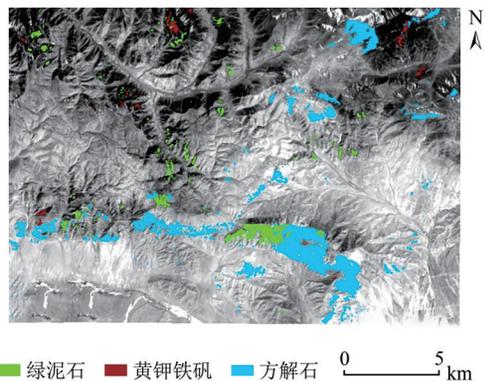


图4 高光谱蚀变矿物分布图

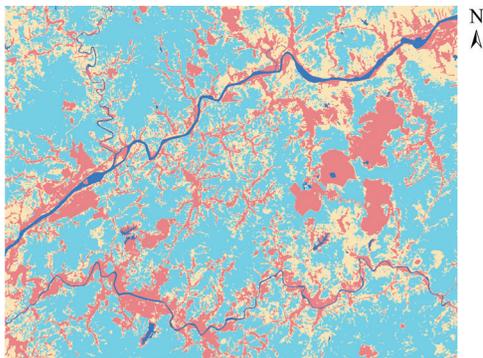
Fig. 4 Distribution map of hyperspectral altered minerals



(a) 尾矿库
(a) Tailings pond
(b) 露天采场
(b) Open pit

图5 矿山开发典型要素影像特征

Fig. 5 Image characteristics of typical elements of mine development



制图单位: 自然资源部国土卫星遥感应用中心
制图时间: 2022年7月

图例 土壤重金属 级别
■ 水域 污染程度 ■ I级 ■ II级 ■ III级

图6 土壤重金属含量分级反演图

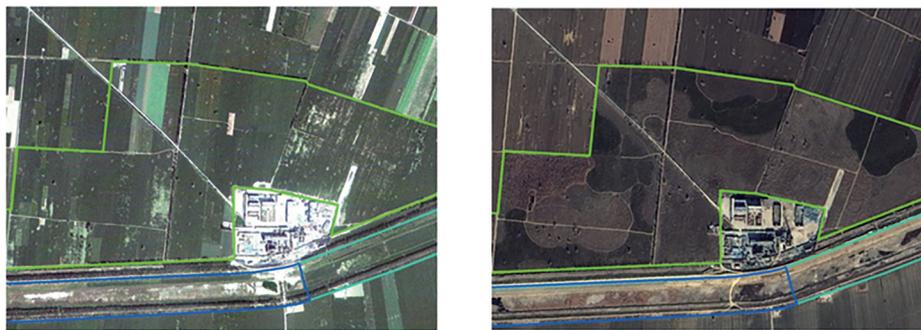
Fig. 6 Inversion map of soil heavy metal content

3.3 生态修复领域

5米光学02星全色与多光谱融合影像地质环境相关解译标志清晰, 可支撑解译湿地、荒漠化、

水体、植被等生态环境因子; 有效识别直径大于15 m的闭合塌陷坑; 宽度大于100 m、长度大于200 m的块状崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害信息; 通过前后时相影像对别, 可对于生态修复工程中退耕还河、退耕造林(图7)、河道疏浚、污水库治理、人工湿地建设、海岸线修复等工程形迹进行有效研判。

在湿地、农田等生态系统中, 综合利用高光谱和多光谱数据, 一方面可对生态系统内部组成开展更为精细的分类; 另一方面可结合地面工作或辐射传输模型, 开展植被、水体等目标物理化学参量的仿真及反演, 获取植被覆盖度、叶面积指数、水体透明度、叶绿素a浓度、富营养状况定量信息(于贵瑞等, 2021; 郭庆华等, 2020; 刘瑶等, 2022)。在轨测试中, 在黄河口、杭州湾、呼伦贝尔、滇池(图8)、浙江丽水(图9)等区域取得较好的测试应效果。



(a) 北京二号影像(2018-09)
(a) BJ-2 satellite image (2018-09)
(b) 5米光学02星影像(2022-01)
(b) 5 m Optical Satellite 02 image (2022-01)

□ 污水库治理 □ 河道治理 □ 退耕造林 0 480 m

图7 沿河退耕造林监测影像对比

Fig. 7 Comparison of monitoring images of abandoned farmland and afforestation along the river

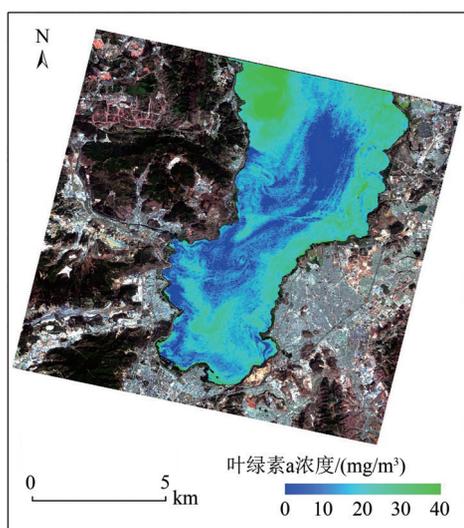


图8 湖泊水体叶绿素a浓度反演图

Fig. 8 Inversion map of chlorophyll a in lake water

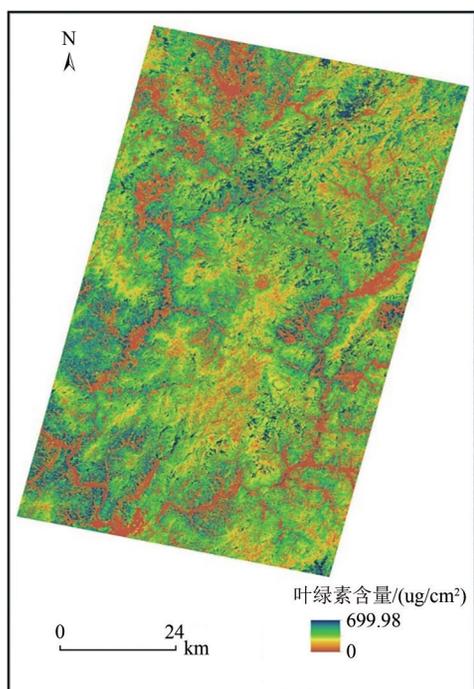


图9 植被冠层叶绿素含量反演图

Fig. 9 Inversion map of chlorophyll in vegetation canopy

3.4 测绘应用领域

利用5米光学02星数据在锡林浩特城区,依据遥感影像平面制作规范开展的1:5万平面影像图制作中,地面测试的38个点中误差为2.134 m,满足成图要求,对后期1:5万和1:10万比例尺地理空间信息更新有着重要的数据支撑作用。在地理国情监测业务中,5米光学02星融合影像特征及地物识别能力与高分一号相近(图10),达到

2 m级数据监测能力,满足地表覆盖监测项目一级类和部分二级类、三级类的提取要求(孙兴丽等,2020)。



(a) 5米光学02星融合影像 (b) 高分一号融合影像
(a) Fusion image of 5 m Optical Satellite 02 (b) Fusion image of GF-1 satellite

图10 同类卫星融合影像细节对比

Fig. 10 Detail comparison of similar satellite fusion images

3.5 海洋应用领域

5米光学02星可为海洋遥感应应用提供陆海交接带综合观测的大幅宽可靠数据源。卫星数据几何位置准确、光谱信息丰富,全色多光谱融合数据对水边线、冰缘线、养殖浮筏轮廓(图11)、红树林等信息提取准确;利用高光谱数据反演的近海海水叶绿素浓度与总悬浮指标与相同/相近日期的哨兵三号数据产品(Tilstone等,2021)相关性超过0.8(图12),5米光学02星数据可满足围填海调查、近海养殖区监测、海岸线变化监测、海洋突发事件应急响应、海洋典型生态系统监测以及极地监测方面的应用需求。



卫星名称: ZY1-02E
时间: 2022年3月9日
制作单位: 国家卫星海洋应用中心

— 浮筏养殖区

图11 汕头市浮筏养殖区遥感监测图

Fig. 11 Remote sensing monitoring map of floating raft aquaculture area in Shantou

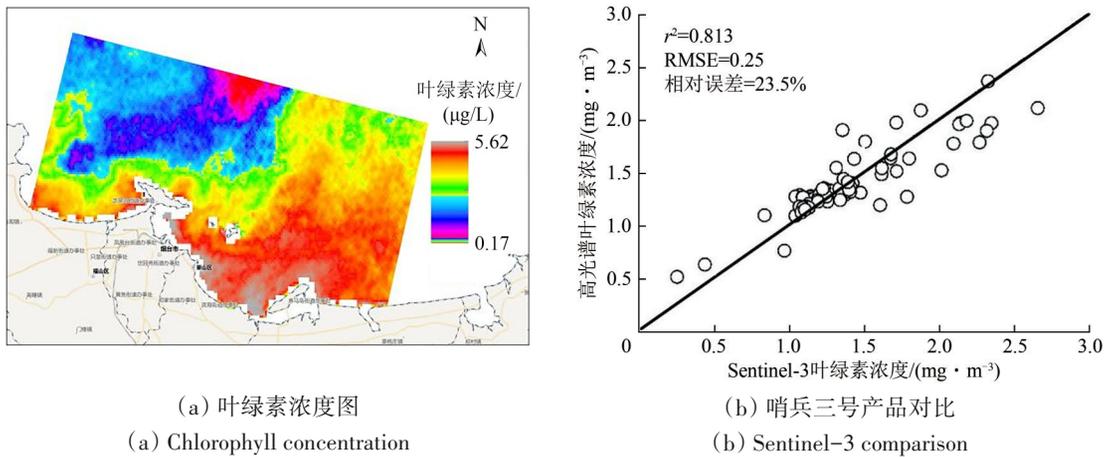


图12 大洋水质反演交叉验证
Fig. 12 Oceanic water quality inversion cross-validation

3.6 工业产能监测

在江苏测试区开展的5米光学02星热红外测试结果表明,热红外影像地表温度精细识别能力较高,能够识别较小面积钢铁企业地表温度的变

化情况,可监测到钢铁企业局部地区的升温情况,与Landsat系列数据为基础开展的钢铁去产能遥感监测结果对比分析一致性较好,能够为钢铁去产能遥感监测业务提供有效数据支撑。

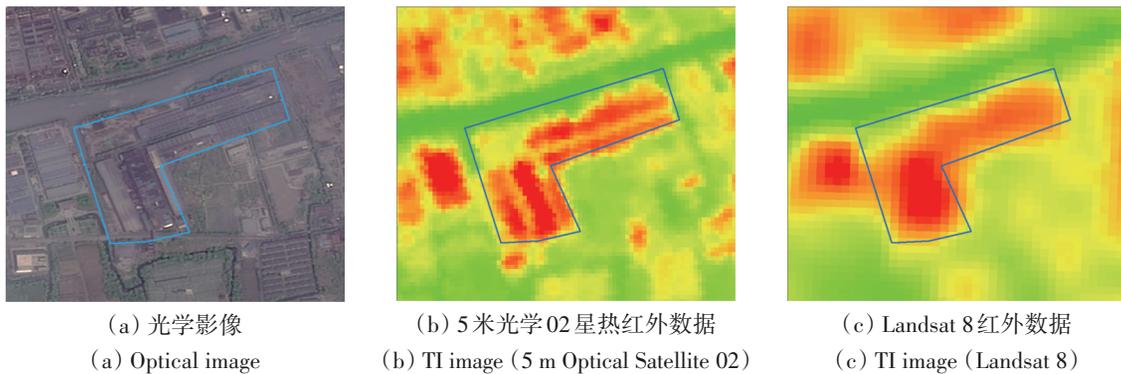


图13 不同传感器地表温度细节对比
Fig. 13 Detailed comparison of surface temperature of different sensors

4 结论

在轨测试表明,5米光学02星全色多光谱数据质量良好,可满足1:5万—1:25万自然资源典型业务应用对数据质量的要求;高光谱载荷所获取的典型地物光谱曲线形态合理,特征位置准确;热红外载荷数据质量稳定,空间分辨率高,细节信息丰富,系列定量应用测试效果显著;5米光学02星数据在自然资源及相关行业遥感监测应用中可发挥重要作用。

多载荷协同成像的总体设计,可连续、高效、稳定获取可见光至热红外区间,最大幅宽可达115 cm、最高空间分辨率可达2.5 m、最高光谱分

辨率可达10 nm的对地观测数据。该设计理念充分发挥星地一体化多载荷协同应用能力,通过卫星段差异化观测能力配置与地面处理环节相结合,在获取相同平台状态、相同大气条件的多源数据后,可在地面段根据业务场景,进一步生成2.5 m全色多光谱融合数据、10 m高光谱融合数据及热红外超分数据等,使得卫星数据应用场景及应用效益最大程度发挥。

高光谱数据规模化、业务化应用对于星载数据的推广和应用尤为重要。在5米光学02星测试和应用过程中,围绕高光谱数据Etalon效应去除、光谱保真条件下的辐射质量提升、片间一致性处理、规模化大气校正等技术难点,以及高光谱

水体水质、土壤质量等典型应用场景,开展技术攻关并构建了业务化应用平台,基本实现高光谱数据产品的日清月结,相关技术规范及指南对后续工作有重要指导意义。

5米光学02星在轨测试工作受测试周期、疫情防控等客观因素影响,主要基于已有数据本底或内业人工解译成果开展精度评价和验证,较大规模外业试验验证及星空地一体化同步观测开展的次数不多,后续工作中将进一步加强相关数据和技术成果的野外验证和交叉比对,持续优化卫星数据处理模型,深入挖掘卫星的应用潜力。

5米光学02星投入使用后,将进一步扩充自然资源现代化监管体系,提高卫星数据保障能力和卫星遥感技术业务化应用能力,推进卫星资源整合和共享,支撑实现自然资源调查法制化、监测制度化、监管常态化,更好的满足国家在经济社会发展、国土资源安全、资源环境保护等诸多重大问题方面对资源环境管理的新要求。

志 谢 此次自然资源领域应用在轨测试工作中,得到中国资源卫星应用中心、国家卫星海洋应用中心、中国自然资源航空物探遥感中心、河北省水文工程地质勘察院、青海省地质调查院、湖南省第二测绘院、云南省地质技术信息中心、内蒙古自治区测绘地理信息局等单位专家的支持,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

Ding W Q and Ding L. 2022. Hyperspectral remote sensing of rock and mineral and its application prospects on the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geology*, 57(3): 924-944 (丁文清, 丁林). 2022. 岩矿高光谱遥感及其在青藏高原的应用前景. *地质科学*, 57(3): 924-944 [DOI: 10.12017/dzqx.2022.053]

Duan S B, Ru C, Li Z L, Wang M M, Xu H Q, Li H, Wu P H, Zhan W F, Zhou J, Zhao W, Ren H Z, Wu H, Tang B H, Zhang X, Shang G F and Qin Z H. 2021. Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1591-1617 (段四波, 茹晨, 李召良, 王猛猛, 徐涵秋, 历华, 吴鹏海, 占文凤, 周纪, 赵伟, 任华忠, 吴骅, 唐伯惠, 张霞, 尚国珪, 覃志豪). 2021. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展. *遥感学报*, 25(8): 1591-1617 [DOI: 10.11834/jrs.20211296]

Guo H T, Han B, Wang X and Tan K. 2020. Hyperspectral and multi-spectral remote sensing images fusion method of ZY-1-02D satellite. *Spacecraft Engineering*, 29(6): 180-185 (郭慧婷, 韩波, 王雪,

谭琨). 2020. 资源一号02D卫星高光谱与多光谱遥感影像融合方法. *航天器工程*, 29(6): 180-185 [DOI: 0.3969/j.issn.1673-8748.2020.06.027]

Guo Q H, Hu T Y, Ma Q, Xu K X, Yang Q L, Sun Q H, Li Y M and Su Y J. 2020. Advances for the new remote sensing technology in ecosystem ecology research. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44(4): 418-435 (郭庆华, 胡天宇, 马勤, 徐可心, 杨秋丽, 孙千惠, 李玉美, 苏艳军). 2020. 新一代遥感技术助力生态系统生态学. *植物生态学报*, 44(4): 418-435 [DOI: 10.17521/cjpe.2019.0206]

Li G J, Yang X S, Zhang X, Li X M, Li D L and Du C. 2021. Application and analysis of ZY1-02D hyperspectral data in geological and mineral survey. *Remote Sensing for Land and Resources*, 33(2): 134-140 (李根军, 杨雪松, 张兴, 李晓民, 李得林, 杜程). 2021. ZY1-02D高光谱数据在地质矿产调查中的应用与分析. *国土资源遥感*, 33(2): 134-140 [DOI: 10.6046/gtzyyg.2020190]

Liu Y, Li J S, Xiao C C, Zhang F F and Wang S L. 2022. Inland water chlorophyll-a retrieval based on ZY-1 02D satellite hyperspectral observations. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 168-178 (刘瑶, 李俊生, 肖晨超, 张方方, 王胜蕾). 2022. 资源一号02D高光谱影像内陆水体叶绿素a浓度反演. *遥感学报*, 26(1): 168-178 [DOI: 10.11834/jrs.20221244]

Shang K, Xiao C C, Gan F P, Wei H Y and Wang C K. 2021. Estimation of soil copper content in mining area using ZY1-02D satellite hyperspectral data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 15(4): 042607 [DOI: 10.1117/1.jrs.15.042607]

Shang K, Xiao C C and Liang S N. 2020. Comparison of bare soil extraction methods in black soil zone for AHSI/GF-5 remote sensing data//*Proceedings Volume 11432, MIPPR 2019: Remote Sensing Image Processing, Geographic Information Systems, and Other Applications*. Wuhan: SPIE: 293-300 [DOI: 10.1117/12.2539360]

Shao Y K, Zhu C M, Zhang X and Shen Q. 2019. Comparison of different fusion methods and their performance evaluation to high spatial resolution remote sensing data of GF. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (6): 5-10 (邵亚奎, 朱长明, 张新, 沈谦). 2019. 国产高分卫星遥感影像融合方法比较与评价. *测绘通报*, (6): 5-10 [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0174]

Sun X L, Liu X H, Liu X J, Gao J, Zhu Z L and Zheng W Y. 2020. Classification system of natural resources for integrated management. *Resources Science*, 42(10): 1860-1869 (孙兴丽, 刘晓煌, 刘晓洁, 高娟, 朱樟柳, 郑文艺). 2020. 面向统一管理的自然资源分类体系研究. *资源科学*, 42(10): 1860-1869 [DOI: 10.18402/resci.2020.10.04]

Sun Y, Liu J J, Zhai D G, Liu Z J, Zhang F F, Zhao Y J, Liu P F and Wang Z T. 2022. Alteration minerals mapping and identification of gold mineralization belt based on ZY1-02D hyper-spectral data in the Toudiaoquan-Nandan area, Gansu Province. *Geology and Exploration*, 58(2): 399-409 (孙雨, 刘家军, 翟德高, 柳振江, 张方方, 赵英俊, 刘鹏飞, 王子涛). 2022. 基于资源一号02D卫星高光谱数据的甘肃头吊泉一南大滩地区蚀变矿物填图及金矿化带识别. *地质与勘探*, 58(2): 399-409 [DOI: 10.12134/j.dzykt.

- 2022.02.014]
- Tang H Z, Xiao C C, Liang S N, Wei H Y and Gao H L. 2020. On-orbit radiometric calibration and validation of ZY-1-02D satellite. *Spacecraft Engineering*, 29(6): 142-147 (唐洪钊, 肖晨超, 梁树能, 魏红艳, 高海亮. 2020. 资源一号02D卫星在轨辐射定标精度验证与分析. *航天器工程*, 29(6): 142-147) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2020.06.021]
- Tilstone G H, Pardo S, Dall'Olmo G, Brewin R J W, Nencioli F, Dessailly D, Kwiatkowska E, Casal T and Donlon C. 2021. Performance of Ocean Colour Chlorophyll a algorithms for Sentinel-3 OLCI, MODIS-Aqua and Suomi-VIIRS in open-ocean waters of the Atlantic. *Remote Sensing of Environment*, 260: 112444 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112444]
- Wei H Y, Xiao C C, Song Q J, Liu K, Chu Q F, Li N, Li Z and Sun X F. 2020. Natural resources typical applications in on-orbit test of ZY-1-02D satellite. *Spacecraft Engineering*, 29(6): 148-154 (魏红艳, 肖晨超, 宋庆君, 刘克, 初启凤, 李娜, 李战, 孙小飞. 2020. 资源一号02D卫星在轨测试自然资源典型应用. *航天器工程*, 29(6): 148-154) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2020.06.022]
- Wu H, Li X J, Li Z L, Duan S B and Qian Y G. 2021. Hyperspectral thermal infrared remote sensing: current status and perspectives. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1567-1590 (吴骅, 李秀娟, 李召良, 段四波, 钱永刚. 2021. 高光谱热红外遥感: 现状与展望. *遥感学报*, 25(8): 1567-1590) [DOI: 10.11834/jrs.20211306]
- Xia T, Yang K M, Feng F S, Guo H and Zhang C. 2021. A new copper stress vegetation index NCSVI explores the sensitive range of corn leaves spectral under copper pollution. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(8): 2604-2610 (夏天, 杨可明, 冯飞胜, 郭辉, 张超. 2021. 新型铜胁迫植被指数NCSVI探索铜污染下玉米叶片光谱敏感区间. *光谱学与光谱分析*, 41(8): 2604-2610) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)08-2604-07]
- Xiao C C, Wei Y J and Zhao S H. 2020. Application system design of ZY-1-02D satellite. *Spacecraft Engineering*, 29(6): 136-141 (肖晨超, 魏英娟, 赵世湖. 2020. 资源一号02D卫星应用系统设计. *航天器工程*, 29(6): 136-141) [DOI: 0.3969/j.issn.1673-8748.2020.06.020]
- Xu H. 2021. Law enforcement by satellite: use the "eyes of the sky" to protect the arable land resources. *China Surveying and Mapping*, (5): 8-11 (徐红. 2021. 卫片执法: 用“天眼”护卫我们赖以生存的耕地资源. *中国测绘*, (5): 8-11) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-6831.2021.05.003]
- Yu G R, Chen Z, Yang M and Wang Q F. 2021. Discussion on the theoretical basis and technical system of large-scale terrestrial ecosystem science research. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32(2): 377-391 (于贵瑞, 陈智, 杨萌, 王秋风. 2021. 大尺度陆地生态系统科学研究的理论基础及其技术体系之探讨. *应用生态学报*, 32(2): 377-391) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.202102.042]
- Zhang H Y, Han B, Wang X H, An M and Lei Y. 2020. System design and technique characteristic of ZY-1-02D satellite. *Spacecraft Engineering*, 29(6): 10-18 (张宏宇, 韩波, 王啸虎, 安萌, 雷勇. 2020. 资源一号02D卫星总体设计与技术特点. *航天器工程*, 29(6): 10-18) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2020.06.002]
- Zhao Z F, Zhang X L, Chen Q, Zhang R S, Li W C and Cao X M. 2022. Mapping of alteration minerals and prospecting potential analysis of Pulang porphyry copper deposit: evidence from remote sensing data of Ziyuan-1 02D satellite. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42(1): 17-29 (赵志芳, 张新乐, 陈琪, 张瑞丝, 李文昌, 曹晓民. 2022. 普朗斑岩型铜矿区矿化蚀变特征矿物填图及找矿潜力分析: 来自资源一号02D遥感卫星的证据. *沉积与特提斯地质*, 42(1): 17-29) [DOI: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.01012]
- Zhong Y F, Wang X Y, Wang S Y and Zhang L P. 2021. Advances in spaceborne hyperspectral remote sensing in China. *Geo-spatial Information Science*, 24(1): 95-120 [DOI: 10.1080/10095020.2020.1860653]

In-orbit application testing of 5 m Optical Satellite 02 (ZY1-02E)

TANG Xinming¹, XIAO Chenchao¹, WEI Hongyan¹, LIU Yu¹, HAN Bo², LIU Yinnian³, WANG Jun⁴

1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China;

2. Institute of Remote Sensing Satellite, CAST, Beijing 100094, China;

3. Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China;

4. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract: The 5 m Optical Satellite 02 (ZY1-02E) was successfully launched on December 26, 2021. Along with the previous model (ZY1-02D), an operational constellation of mid-resolution satellites will be established, forming a large-scale, quantitative, and comprehensive earth observation capability. This satellite was designed to provide 2.5 m panchromatic/10 m multispectral, 30 m hyperspectral, and 16 m thermal infrared image data. The whole project was led by the Ministry of Natural Resources. It will support national monitoring and survey and mapping projects at the scale of 1:100000—1:250000. Compared with traditional multispectral data, hyperspectral data can obtain more abundant spectral information of ground objects, which is particularly important for fine-grained survey and monitoring tasks. The development of China's hyperspectral remote sensing technology is basically synchronized with the international frontier level. However, since the birth of hyperspectral remote sensing technology, the main way to obtain data has relied on human-operated aerial platforms, and for a long period of time, there has been no large-scale acquisition capacity from the data source. Therefore, the hyperspectral payload

carried by this satellite is its biggest highlight and has attracted widespread attention from domestic and foreign peers. During the in-orbit test, the Ministry of Natural Resources designed a total of 32 application test items, focusing on land resources, geology and minerals, surveying and mapping geographic information, ocean island monitoring, and other fields. All application items and other key indicators were evaluated in accordance with the relevant standards for natural resource survey and monitoring and technical specifications. The result shows that the satellite system, ground system, and application system have been operating stably and maintaining good consistency between each satellite of the constellation. It meets the data quality requirements of main businesses in various fields, including natural resource supervision and enforcement, geological and mineral resource investigation, ecological restoration project monitoring and evaluation, geospatial information update, coastline change monitoring, and steel industrial capacity monitoring. Hyperspectral and thermal infrared payloads have achieved good application results. This paper will introduce the data characteristics and application capabilities of the satellite, focusing on the evaluation results of some specific applications, especially with hyperspectral and thermal infrared cameras. Hopefully, this paper can provide a reference for the further application of this satellite.

Key words: remote sensing, 5 m Optical Satellite 02 (ZY1-02E), natural resources, satellite application, visible/near-infrared, hyperspectral, thermal infrared

Supported by National Key Research and Development Program of China(No. 2021YFB3900505)