

遥感多光谱卫星分析即用数据研究进展

杨爱霞, 仲波, 柳钦火, 唐娉, 单小军, 吴善龙, 霍连志,
胡龙飞, 敖凯, 吴俊君

中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101

摘要: 随着全球空间基础设施进入系统化发展与全球服务的新阶段, 卫星遥感不断创新与升级, 已成为获取自主地面观测、掌握空间资源、抢占经济科技制高点的关键技术。海量的对地观测数据在环境、社会和经济研究中蕴藏着巨大的潜力, 但同时也带来了数据处理、存储和分析方面的巨大挑战。分析即用数据 ARD (Analysis Ready Data) 的出现大幅降低了数据处理成本, 推动了数据共享与科学发现; ARD 生成技术与遥感云平台和数据立方等载体的结合提升了遥感大数据挖掘的能力, 颠覆了传统遥感数据处理和分析的模式, 使全球尺度的长时间序列快速分析和应用成为可能。本文梳理了国内外 ARD 的背景和发展现状, 包括国际主流的 ARD 产品, 以及作为 ARD 生产和共享载体的遥感云平台和数据立方体, 分析了国产卫星数据 ARD 产品生产时面临的问题和挑战, 介绍了国产高分卫星数据的 ARD: GF ARD 产品, 并分析和讨论了 ARD 未来需要解决的关键问题, 以期为对地观测大数据的高质量、高效率、标准化应用提供思路, 支撑重大科学发现和政府决策。

关键词: 对地观测, 分析即用, 国产卫星, 归一化处理, 云平台, 数据立方, 大数据挖掘, 多源数据

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 杨爱霞, 仲波, 柳钦火, 唐娉, 单小军, 吴善龙, 霍连志, 胡龙飞, 敖凯, 吴俊君. 2025. 遥感多光谱卫星分析即用数据研究进展. 遥感学报, 29(5): 1103-1122

Yang A X, Zhong B, Liu Q H, Tang P, Shan X J, Wu S L, Huo L Z, Hu L F, Ao K and Wu J J. 2025. Progress on Analysis Ready Data for remote sensing multispectral satellite. National Remote Sensing Bulletin, 29(5): 1103-1122 [DOI:10.11834/jrs.20254454]

1 引言

自 1960 年 NASA 发射了第一颗对地观测卫星 TIROS-1 以来, 全球对地观测技术已经发展了 60 多年。卫星遥感作为战略性、探索性、创新性强的观测手段, 已经成为国家对地观测能力和国家核心竞争力的直观体现, 也是实施全球可持续发展战略的基础支撑。卫星遥感技术成为全球化发展态势下获取自主对地观测信息、把握空间信息资源、抢占经济科技竞争制高点、保障国家利益和国家公共安全的核心技术 (何国金 等, 2018; 廖小罕, 2021; 李德仁 等, 2022; 童庆禧, 2023)。

随着高分辨率、超分辨率等新一代遥感卫星的发展, 对地观测数据呈爆发式增长。海量的历史观测数据和新一代地球观测数据为系统地监测

和评估地球表面变化提供了机会, 使研究人员得以从宏观尺度研究地球科学、环境科学、资源科学与全球变化的动态趋势。当前的全球对地观测技术已经进入了数据驱动的新时代。海量的对地观测数据在环境、社会和经济研究中蕴藏着巨大的潜力, 但同时也带来了数据处理、存储和分析方面的巨大挑战。(李德仁 等, 2022)。因此, 虽然对地观测技术蓬勃发展, 但其产业化市场仍然迟迟未能腾飞, 究其根本, 是数据供应仍然不足以满足各行业需求, 从而限制了产业化的进程 (Keith, 2020)。

数据预处理的难度大、效率低和成本高是导致对地观测数据供应不足的一个重要原因。首先, 遥感卫星的原始数据通常需经过复杂的预处理才能用于分析应用, 包括辐射定标、大气校正和地

收稿日期: 2024-10-24; 预印本: 2025-02-19

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际合作项目 (编号: 2021YFE0117400, 2019YFE0197800)

第一作者简介: 杨爱霞, 研究方向为遥感数据预处理和应用。E-mail: yangax@aircas.ac.cn

通信作者简介: 仲波, 研究方向为遥感数据预处理和应用。E-mail: zhongbo@aircas.ac.cn

形效应校正等。随着多星组网技术的不断发展和对多源协同观测的需求增加,多源数据协同应用分析成为未来遥感发展的主流趋势之一,而多源数据来自于不同的观测平台和载荷,硬件设计差异增加了数据预处理的复杂性。其次,许多卫星用户缺乏专业知识、基础设施和带宽,难以高效利用数据,即使是专业用户也需投入大量时间和成本进行数据预处理,效率低下。此外,数据预处理是各类遥感应用的首要前提,不同领域的用户在应对不同应用需求时往往需要反复进行相似的预处理操作,造成了人力成本的浪费。针对这些挑战,国际上提出了“分析即用数据”ARD (Analysis Ready Data) 的概念,以减少用户在数据处理上的时间和成本 (Zhong 等, 2021)。

ARD 概念由 CEOS (国际卫星对地观测委员会) 提出,并制定了专门的产品规范 (PFS), 提供了详细的处理和质量控制要求,确保数据可用于直接分析应用。CEOS 的 CARD4L 倡议推动了 ARD 在地球观测中的发展。多个国家和机构陆续开发了符合 ARD 标准的产品,如美国的 Landsat ARD、欧洲的 Sentinel-2 ARD 等。中国的 ARD 发展起步较晚,但近年来也取得了突破,推出了时空分辨率高和一致性好的 GF ARD 产品。ARD 的普及加速了数据共享和科学研究的进程,推动了全球遥感大数据的开放和协作,使长时序分析和全球监测成为可能。

本文梳理了 ARD 出现的背景、内涵和发展现状,介绍了国际主流的光学卫星 ARD 产品,以及作为 ARD 生产和共享载体的遥感云平台和数据立方体,归纳了国产光学卫星数据 ARD 产品生产时面临的问题和挑战,并重点介绍了国产高分卫星数据的 ARD: GF ARD 产品,讨论了 ARD 未来需要解决的关键问题,以期对地观测大数据的高质量、高效率、标准化应用提供思路,支撑重大科学发现和政府决策。

2 ARD 的发展概述

众所周知,遥感卫星获取的原始数据并不能直接拿来分析应用,中间还需要进行复杂繁琐的预处理操作,这是因为:(1) 原始遥感影像是 DN 值形式,并不是真正的物理量,需要转化为辐亮度,即单位立体角和单位面积上的能量,才可进行量化应用。DN 值可通过一定的转化关系得到

辐亮度,即传感器定标。通常来说,遥感数据提供者在数据分发时会同时提供定标系数,但传感器发射前、发射中以及发射后的性能会发生变化,定标系数也需要随时更新,往往通过星上定标系统、地面同步观测、行星定标、交叉定标等多种方式得到。(2) 经过定标后的数据并不能直接表征地表物体的特征,因为即使是同一类型的地表,由于大气特性、地形条件和太阳天顶、方位角和传感器视角的变化,卫星接收到的辐射也不同,需要通过大气校正、地形纠正、角度纠正等技术进行量化。(3) 随着卫星遥感向多星组网方向的发展,多源协同成为提升综合观测能力的必要手段,而多源数据来自不同平台和传感器,即使观测同一目标也会产生显著差异。卫星数据用户往往需要投入大量时间和精力进行数据准备,以克服这些差异。(4) 许多卫星数据用户缺乏专业知识、基础设施和互联网带宽等,无法高效和有效地访问、预处理和利用日益增长的对地观测数据,即使是专业用户,也要在数据准备方面投入大量精力,耗时长、成本高。以基于遥感数据的信息提取应用为例,往往 80% 的时间和精力用于准备数据,仅有 20% 的时间用于数据分析及应用上,效率低 (李俊杰 等, 2023) (图 1)。(5) 不同行业的用户在处理不同应用时,都需要进行重复的数据预处理操作,导致了人力成本的浪费。针对不同的应用,预处理的程度不同,但常见的预处理包括地理定位和空间对齐、辐射定标、大气校正、云检测等,这些操作对个人用户来说较为复杂,计算成本较高,且不同用户数据预处理的精度和水平不同,导致对数据的分析结果不一致,进而影响了应用的扩展和成果共享。因此,要解决海量异构观测数据在存储、处理和分析等方面的挑战,需要改变传统的本地处理和数据分发模式,以降低数据管理及处理的复杂性。

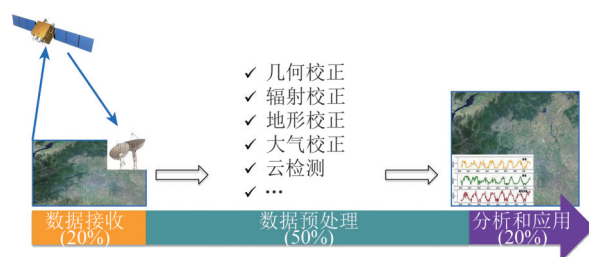


图 1 遥感数据接收、处理和应用中的工作量占比

Fig. 1 The workload proportion in the reception, processing, and application of remote sensing data

在以上大背景下, 分析即用数据 ARD (Analysis Ready Data), 也常被翻译为分析就绪数据) 概念被提出。即用数据 (“Data Ready”) 的概念来源于图像处理领域, 作为一种数据可视化和图形分析的原则, 由 William S. Cleveland 提出 (Graphs in Statistical Analysis, 1982), 旨在提倡通过图表直观地展示数据, 以便更好地理解和分析数据。该概念被引入到了地球科学领域。目前不同的机构对 ARD (及其处理水平) 的定义/描述不同, 国际上广泛认可的 ARD 定义是由国际卫星对地观测委员会 CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) 给出的, 即 “Analysis Ready Data are satellite data that have been processed to a minimum set of requirements and organized into a form that allows immediate analysis with a minimum of additional user effort and interoperability both through time and with other datasets”, 也就是说, ARD 是指已经被处理、组织成标准格式的卫星数据, 该数据在时间维度上以及与其他数据集之间有着最好的互操作性; 用户可以在最小额外预处理条件下直接分

析应用该数据。ARD 的理念旨在提高数据的可用性和互操作性, 使研究人员能够更轻松地访问和分析遥感数据, 从而加快科学研究的进程。首先, ARD 经过预处理转化为用户友好的格式, 提高了数据的易用性和可访问性。其次, ARD 减少了用户进行数据处理和校正所需的时间和资源, 使用户能够更快速地进行分析和研究, 缩减了数据梳理的时间和成本。第三, ARD 的预处理过程通常包括校正和质量控制, 确保了数据质量和一致性, 使用户能够直接进行准确地分析和比较。第四, 由于不同数据源的数据格式和校正方法可能不同, ARD 可以帮助用户将多个数据源进行协同分析, 促进了多源数据的融合和交叉验证。此外, ARD 可以促进数据共享和协作研究, 降低研究人员访问和使用数据的门槛, 颠覆传统遥感数据分析和模式的模式, 推动开放科学的发展和进步, 提升遥感大数据挖掘的能力, 推动遥感云平台的建设与发展, 使全球尺度的长时间序列快速分析和应用成为可能 (Dwyer 等, 2018)。ARD 处理流程和效果如图 2 所示。

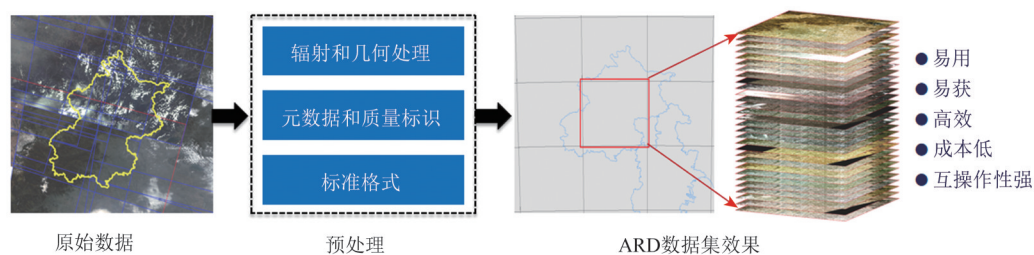


图2 ARD处理流程和效果示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ARD processing flow and effect

CEOS在2019年发起了CARD4L (CEOS Analysis Ready Data for Land) 倡议, 旨在提供用于陆地观测的分析即用数据标准, 促进卫星数据的开放性、互操作性和可持续性, 以促进地球观测社区的数据共享和利用。在多个国家和国际组织的支持下, CEOS牵头制定了CEOS-ARD的产品规范 PFS (Product Family Specifications)。该规范是一个灵活和可扩展的框架, 用于详细说明可被定义为CEOS ARD的数据集必须满足的特定要求。该规范定义了PFS的核心要素: (1) 通用元数据: 允许用户评估数据集的整体适用性; (2) 逐像素元数据: 允许用户选择使用或丢弃哪些观测值 (或像素); (3) 辐射校正和精度; (4) 几何校正和精度。

CEOS ARD 的 PFS 详细说明了两个层次的需求: “阈值” 和 “目标”, 其中阈值水平是满足要求的最低水平, 而目标水平则代表前沿水平 (并非所有 ARD 数据都能达到目标水平)。CEOS ARD 的 PFS 作为未来 PFS 的起点, 提供了一个基础和一套通用的评估因子, 以确保所有 PFS 在布局、总体结构、解释和方法上具有通用性。CEOS ARD 产品的评估过程包括数据提供者的自我评估和由 CEOS 专家进行的同行评议两个过程。目前 CEOS 已经完成了地表反射率 (Surface Reflectance)、地表温度 (Surface Temperature)、水体反射率 (Aquatic Reflectance) 和夜间灯光地表辐射 (Nighttime Lights Surface Radiance) 等 4 个光学 PFS, 以及归一化雷

达后向散射NRB (Normalised Radar Backscatter)、极化雷达POL (Polarimetric Radar), 海洋雷达后向散射ORB (Ocean Radar Backscatter) 和地理编码单视复合体GSLC(Geocoded Single-Look Complex)等4个雷达PFS, 另有干涉雷达INSAR(Interferometric Radar)和LiDAR地形和冠层顶部高度(LiDAR Terrain and Canopy Top Height)的两个PFS正在制定中(CEOS, 2024)。

ARD是知识发掘的关键, 同时也是应用规模与效率的加速器, 这已经成为了国际共识。全球各大遥感卫星数据服务商纷纷推出了各自的ARD产品。美国地质调查局USGS (United States Geological Survey) 推出的Landsat ARD (Dwyer等, 2018); 欧洲航天局ESA (European Space Agency) 推出的Sentinel-2A/B地表反射率ARD产品(Hagolle等, 2021); 美国的商业遥感卫星公司Maxar和Planet公司各自推出了商业ARD产品(Planet Releases Analysis-Ready PlanetScope Product for Time-Series Analysis and Machine Learning Models); 日本的NSI (New Space Intelligence) 与美国的Labsphere共同签署了谅解备忘录(MOU), 共同研发一种尖端系统, 用于协调卫星图像以提取和分析就绪数

据; 其他国家针对各自的卫星也在纷纷研究ARD生成技术和产品(Nair等, 2019; Lee和Kim, 2020; Zhong等, 2021)。ARD产品使数据在时间序列分析中的应用变得更加容易, 为许多科学应用打开了方便之门(Zhu, 2019), 支撑了全球气候变化和可持续发展研究(Killough, 2022)。

在科研领域极具权威性的学术数据库Web of Science上, 以“Analysis Ready Data”作为精准的关键词展开全面搜索, 最终共检测到在1990年—2024年的30余年的时间里, 围绕该主题发表的文章数量总计为8200篇。深入剖析这些文章的发表情况和引用趋势, 我们发现在2009年以前, 相关文章的发表数量和引用次数均处于相对平稳且较低的水平; 自2009年以后, 发表文章数和文章引用数陡增, 呈现出迅猛的增长态势, 并在2021年达到顶峰。值得注意的是, 在2019年以后, 尽管相关研究仍在持续推进, 但无论是发表文章数还是文章引用数, 都逐渐呈现出一种平稳的态势, 不再像之前那样急剧增长, 这或许暗示着该领域的研究进入了一个相对成熟和稳定的发展阶段(图3)。

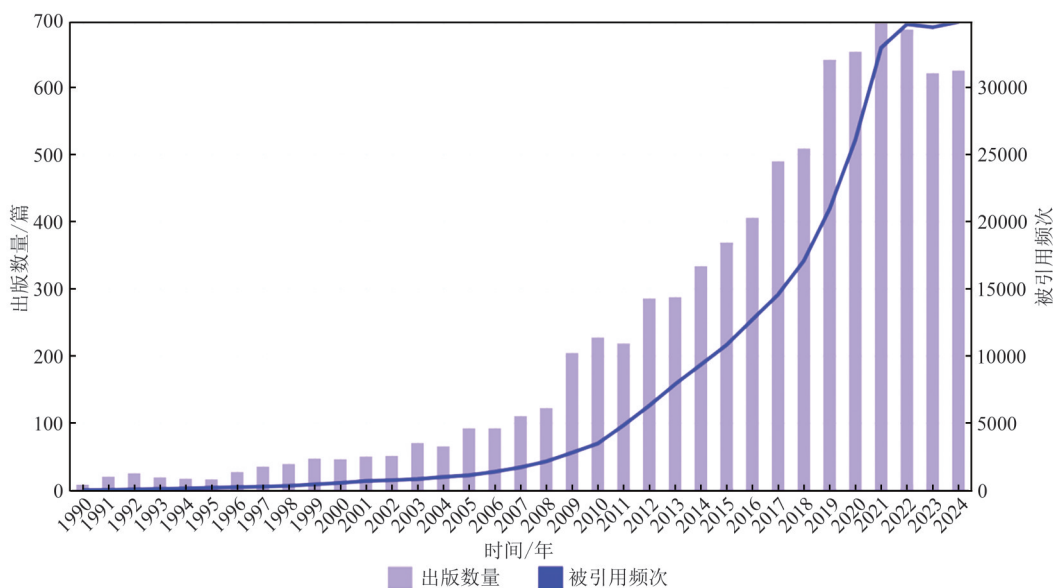


图3 近30余年ARD相关论文的出版数量与被引用频次

Fig. 3 The publication quantity and citation frequency of papers related to ARD in the past more than 30 years

基于国产卫星数据的ARD产品研究起步较晚, 一方面是由于国产对地观测本身发展较晚, 另一方面则是因为部分国产卫星数据的预处理水平不足, 为定量应用带来了新的挑战。中国的卫星遥

感应用从20世纪80年代才开始突破, 经过几十年的发展, 卫星发射数量位居世界前列, 实现了光学、多光谱、高光谱、雷达、激光等多种观测手段, 为资源环境研究和国民经济建设提供了宝贵

的空间影像数据，在农业、林业、国土资源、水利、城市规划、环境监测、测绘、公共卫生、交通、能源、气象、海洋、地球科学研究等众多领域发挥了重要作用（何国金 等，2018）。卫星遥感数据的处理一直是一个很重要的环节和难点，然而国产卫星数据的预处理和产品开发相对滞后，高质量、长时序 ARD 产品的生产能力较弱，影响了其应用能力的发挥和潜力的挖掘。Zhong 等（2021）针对国产卫星的几何校正、辐射定标、大气校正等问题，发展了一系列的数据预处理方法，构建了国产卫星 ARD 产品的技术框架，以 GF-1 WFV 数据为输入，生产和发布了国内 16 m GF ARD 产品，形成了 GF ARD 产品的生成与生产能力。GF ARD 产品具有时空分辨率高、空间完整性好、辐射一致性高、受云和气溶胶影响小的特点，是国产卫星数据走向分析即用的重大突破。GF ARD 产品打破了 Landsat、Sentinel 等卫星数据的垄断地位，形成了国际中分辨率光学遥感数据的第三极。此外，中国遥感卫星地面站何国金研究员团队提出了卫星数据 RTU（Ready To Use，即得即用）产品的理念，并长期致力于 RTU 产品的研发和共享，基于中国遥感卫星地面站接收存档的卫星数据相继发布共享了一系列 RTU 产品，目前研发共享的长时序 Landsat 8 卫星地表反射率和地表温度产品，已顺利通过 CEOS 审查，使得中国遥感卫星地面站成为 Landsat 国际站网成员中首批通过 CEOS-ARD 产品标准认证的机构（[https://ceos.org/ard/\[2024-10-24\]](https://ceos.org/ard/[2024-10-24])）；长光卫星技术股份有限公司和中国科学院空天信息创新研究院联合研制的全球 5 m 分辨率宽波段多光谱卫星数据集（JLS-5M）已在国家对地观测科学数据中心（NODA）正式对

外开放共享；中国的其他商业卫星公司如二十一世纪空间技术应用股份有限公司等，也都在计划或已经实现了各自的 ARD 产品生产。需要说明的是，一些数据集虽未以 ARD 进行命名或共享，但其生产流程和分发的数据格式已具备了 ARD 数据集的特点和功能。

3 主流的国际 ARD 产品介绍

如前文所述，当前的 ARD 产品已经有很多，表征地表反射率、地表温度和归一化雷达后向散射等参数。以地表反射率的 ARD 产品为例，目前国际上主流的 ARD 产品包括基于 EOS/MODIS 数据的 MOD09 地表反射率产品，基于 Landsat 系列卫星数据的 Landsat Collection 2，基于 Sentinel-2A/B 卫星的 Sentinel-2 Level-2A 产品，基于中国的 GF 卫星的 GF SR 和 ARD 等（表 1）。这些产品均为全球覆盖产品，其中，MOD09 地表反射率产品是时间跨度最长的公里级产品，具有 7 个波段，时间频次高（1 d），但 MODIS 传感器现在处于超寿命运行状态，面临退役风险；Landsat Collection 2 地表反射率产品是时间跨度最长的中高分辨率产品（30 m），也是使用最多颗卫星数据的产品（Landsat 1—9）；Sentinel-2 Level-2A 兼顾高分辨率（10 m）和高时间分辨率（5 d），在发布以后使用量和受关注程度已逐渐超过 Landsat。中国的高分卫星在设计性能上优于 Landsat 和 Sentinel-2，也作为后起之秀，打破了美国和欧盟的垄断地位，应用潜力巨大。Landsat Collection 2 和 Sentinel-2 Level-2A 是目前使用最多的两个国际主流中高分辨率 ARD 产品，本节将做重点介绍。

表 1 当前国际主流的多光谱地表反射率 ARD 产品
Table 1 The current mainstream international multi spectral surface reflectance ARD products

数据集名称	数据生产方	卫星/传感器	空间分辨率	时间分辨率/d	参考文献
MOD09/MYD09	NASA	Aqua/Terra MODIS	250 m/500 m/1 km	1	Vermote 和 Vermeulen, 1999
Landsat Collection 2	USGS	Landsat 4/5/7/8/9	30 m/60 m	8	Dwyer 等, 2018
Sentinel-2 Level-2A	ESA	Sentinel-2A/B	10 m/20 m/60 m	5	Hagolle 等, 2021
Gaofen-1/6 SR	AIR-CAS	GF-1/6	16 m	2	余文庆 等, 2023
GF ARD	AIR-CAS	GF-1	16 m	2	Zhong 等, 2021

3.1 基于 Landsat 系列卫星数据的 ARD 产品

Landsat 系列卫星是美国地球资源卫星计划（EROS）的一部分，旨在提供用于地表监测和遥

感应用的连续、高质量遥感数据。自 1972 年 7 月 23 日 Landsat 1 发射以来，50 多年里以 30 m 分辨率提供了全球天基地球观测的最长时间记录。

Landsat 系列卫星上的传感器, 包括多光谱扫描仪 MSS (Landsat 1—5 搭载)、专题成像仪 TM (Landsat 4—5 搭载)、增强型专题成像仪 ETM+ (Landsat 7 搭载) 和陆地成像仪 OLI (Landsat 8—9 搭载), 光谱和空间准确度逐渐提高。其中, Landsat 4 发射于 1982 年 7 月 16 日, 1993 年 12 月 14 日因技术问题结束观测; Landsat 5 发射于 1984 年 3 月 1 日, 2013 年 1 月 15 日仪器关闭电源; Landsat 7 发射于 1999 年 4 月 15 日, Landsat 8 发射于 2013 年 2 月 11 日, Landsat 9 发射于 2021 年 9 月 21 日, 均在持续的观测地球。Landsat 系列卫星的重访周期为 16 d。一般来说, 每个 Landsat 卫星在一年内可观测同一地面位置 22—23 次。自 2008 年 Landsat 存档数据通过互联网免费向公众发布以来 (Woodcock 等, 2008), 下载和使用量急剧增加 (Wulder 等, 2016)。

随着 Landsat 数据的积累, 以及大范围 (国家尺度或全球尺度)、长时序 (多季节、多年等) 应用分析的需求, 对数据进行预处理以保证其时间和空间上具有可比性必不可少。美国国家航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 制作了用于环境研究的地球数据记录 MEaSUREs (Making Earth System Data Records for Use in Research Environments) 的全球网格陆地卫星数据 GWELD (Global Web-Enabled Landsat Data) 产品 (Roy 等, 2010), 这也是使用 Landsat 数据生产的最早可作为 ARD 的数据集。该产品提供了 1985 年、1990 年和 2000 年 30 m 的月度合成 (GWELDMO) 和年度合成 (GWELDYR) 的全球 (无南极洲) 的产品。GWELD 产品使用了美国地质调查局 (USGS) 提供的所有存档 Landsat 数据, 包括 Landsat 4 和 5 的 TM 数据和 Landsat 7 的 ETM+, 包括反射波段的反射率 (经 BRDF 调整后的反射率)、热红外波段的大气层顶的亮温、归一化植被指数 (NDVI)、天数、角度和数据质量等信息, 具备了 ARD 产品的特征。

USGS 地球资源观测与科学 (EROS) 中心在 2017 年为美国本土 (CONUS)、阿拉斯加 (Alaska) 和夏威夷 (Hawaii) 提供了 Landsat U.S. ARD (Dwyer 等, 2018), 时间覆盖范围为 1982 年至今, 空间分辨率为 30 m。在 Landsat U.S. ARD 产品中, 使用的输入数据为 Landsat Collection 1 Tier1 (T1) 存档数据集, 由 Landsat 1—8 系列卫星的 560 多万景观数据组成。Landsat Collection 1 的数据经过了了几何

校正和辐射定标, 形成了 3 类数据: Tier 1 (T1), Tier 2 (T2) 和 Real-Time (RT), 其中数据质量最好的 Landsat 影像被处理为 T1, 几何误差优于 12 m (RMSE), 适合于多时相数据分析; 预处理没有达到 T1 标准的 Landsat 影像被作为 T2, T2 和 T1 的辐射标准相同, 但由于缺少轨道信息, 大范围云层覆盖等因素造成选择的地面控制点不够, 几何精度达不到 T1 的标准。RT 是指可快速下载的 Landsat 7 ETM+ 和 Landsat 8 OLI/TIRS 数据, 主要应用于应急的情况, 一般可在 12 h (通常为 4—6 h) 内下载, 并在数据获取后的 14—16 d 内重新处理, 得到 T1 或 T2 产品。USGS 发布 ARD 产品使用 Landsat 产品生成系统 LPGS (Landsat Product Generation System) 生产, 使用户摆脱了搜索下载图像, 执行辐射定标和几何校正的传统操作, 并实现了大规模的自动化分析。Landsat ARD 采用 WGS84 基准参考的 Albers 等面积投影和 5000 像素×5000 像素 (150 km×150 km) 的分幅方案, 各瓦片之间无重叠。图 4 展示了美国本土的分幅情况, 共包括 512 个瓦片。Landsat U.S. ARD 存储了每个瓦片像素位置的传感器大气层顶 TOA (Top Of Atmosphere) 波段值, 为了方便使用, 分别将反射波段和热红外波段的波段值转换为反射率和亮温, 还增加了质量评估波段 (QA)。此外, 考虑到一些用户对大气校正的需求, 自动大气校正产品和大气顶层反射率值也作为单独的波段进行了存储。需要说明的是, Landsat U.S. ARD 在 2016 年 Landsat Collection 1 发布后开始提供, 并成为 EROS 中心土地变化监测、评估和预测 (LCMAP) 计划的基础。Landsat Collection 1 已于 2021 年 12 月 31 日停止, 之后被 Collection 2 替代。

Landsat Collection 2 U.S. ARD (简称为 Landsat C2 U.S. ARD) 的输入数据为 2020 年底发布的 Collection 2 数据集, 除 Landsat 4、5、7、8 以外, 还使用了最新的 Landsat 9 的观测数据。同 Landsat U.S. ARD 一样, 也是覆盖了美国本土 (1982 年至今)、夏威夷 (1989 年—1993 年, 和 1993 年至今) 和阿拉斯加 (1984 年至今) 3 个地区, 其中, 阿拉斯加的分幅进行了修改, 增加了阿留申群岛。Collection 2 数据集改进了辐射与几何校正等各方面的精度, 包括两个级别的数据 (L1 和 L2), 其中, L1 为大气顶层的反射率和亮温, L2 为地表的反射率和温度。Landsat C2 US ARD 的 L2 级产品使

用新版本的 LPGS 软件生成, 该软件包含一个新的质量评估 (QA) 程序, 使用 CFMask 检测云、水和雪, 可在 L1 和 L2 产品包中提供一致的逐像素的质

量标记。Landsat Collection 2 U.S. ARD 已被 CEOS 接收为 CARD4L 的组成产品。

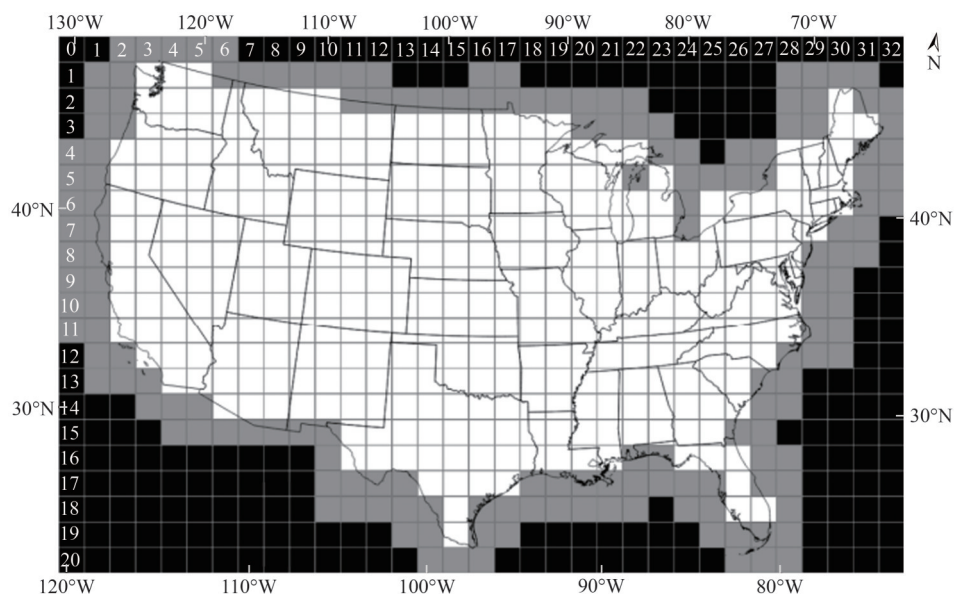


图4 美国本土 Landsat ARD 分幅(Egorov 等, 2019)

Fig. 4 Landsat ARD tiles in the Continental United States (Egorov et al., 2019)

美国马里兰大学地理科学系的全球陆地分析与发现团队 GLAD (Global Land Analysis and Discovery team) 创建了全球的 Landsat ARD, 即 GLAD ARD (Potapov 等, 2020)。该产品形成了全球 1997 年至今每 16 d 合成的地表反射率时间序列, 时空连续性好, 适用于森林等陆地生态系统的变化检测与土地覆盖制图等。GLAD ARD 以 8 波段的 GeoTIFF 形式存储, 采用地理坐标系, 空间分辨率为 0.00025° , 以 $1^\circ \times 1^\circ / 4004 \times 4004$ 像素大小分幅, 每个分幅与其他分幅之间有两个像素的重叠, 每个分幅一年有 23 个合成图, 每个合成图分配有唯一的 ID。GLAD ARD 分幅数据可通过 API 在线访问, 无需任何相关费用。

基于 Landsat 系列数据的 ARD 产品已在多个分析和监测应用中得到了使用, 如 Roy 和 Yan (2020) 采用 5 年 Landsat ARD 数据的调和和时间序列模型, 完成了华盛顿州的 3000 万树木覆盖制图和 6 个不同 ARD 瓦片的作物变化监测; Ren 等使用 MODIS 和 Landsat ARD 制作了 30 m 分辨率的内布拉斯加州的灌溉和非灌溉玉米地图 (Ren 等, 2021)。

3.2 基于 Sentinel 系列数据的 ARD 产品

Sentinel-2 是欧洲航天局 (ESA) 哥白尼计划的一部分, 由两颗高分辨率多光谱成像卫星

Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 组成, 分别于 2015 年 6 月 23 日和 2017 年 3 月 7 日发射。单颗卫星的重访周期为 10 d, 两颗卫星组网后的重访周期缩短至 5 d。Sentinel-2 的核心载荷是多光谱成像仪 (MSI), 采用推扫成像模式, 覆盖 13 个波段, 波长范围为 400—2400 nm, 涵盖可见光、近红外和短波红外区域, 光谱分辨率在 15—180 nm, 空间分辨率从 10 m 到 60 m 不等, 成像幅宽为 290 km, 最大成像时长为每轨 40 min。Sentinel-2 主要用于陆地监测、生物物理参数制图、海岸带和内陆水域的监测, 以及灾害应急制图等高分辨率应用领域。

ESA 推出的 Sentinel-2 的地表反射率产品 SR (Surface Reflectance) 被归类为 ARD (Hagolle 等, 2021)。Sentinel-2 SR 除了进行了常规的几何配准和辐射定标外, 还进行了大气校正, 能够直接用于后续的应用分析。该数据集提供了除 B10 以外的 12 个波段的地表反射率, 还提供了表示气溶胶光学厚度的 AOT (Aerosol Optical Thickness) 波段, 接近人眼感知的 3 个真彩色波段 (TCI-R、TCI-G 和 TCI-B), 云概率图 (MSK_CLDPRB), 雪概率图 (MSK_SNOWPRB), 以及 3 个质量评估波段 (QA10、QA20 和 QA60, 分别代表 10 m、20 m 和 60 m 分辨率的波段)。需要说明的是, ESA 并未为

所有一级数据生成SR产品,并且早期的SR产品并非为全球覆盖范围,此外,SR产品3个质量评估波段中,QA10和QA20为预留的空波段,QA60提供了云掩膜信息,但该信息在2022年2月到2024年2月期间缺失。由于Sentinel-2 SR存在的以上问题,限制了Sentinel-2数据的大规模使用,一些研究者针对Sentinel-2数据纷纷研发自己的Sentinel-2 ARD。Giuliani等(G2018)发展了一种使用自动处理服务链生成Sentinel-2 ARD的方法,实现了高效的数据访问和预处理,支持超过2 TB的数据,覆盖瑞士的所有Sentinel-2存档数据,并对外公开发布了数据集(<http://www.swissdatacube.org>[2024-10-24])。

4 ARD的载体:遥感云计算平台和数据立方体

ARD产品作为标准的数据格式,最终目的是面向用户进行应用,数据组织和共享的形式尤为重要。随着云计算和数据存储技术的发展,遥感云计算平台和数据立方体应运而生。遥感云平台通过在云端存储海量数据,并提供给用户应用程序接口,使用户在云端即可批量进行交互式计算、处理、分析和结果可视化,而不再依赖本地计算机硬件配置,大大降低了数据的使用门槛,极大提高了运算效率,加速了算法测试的迭代过程,使全球尺度地球系统科学快速分析和应用成为可能(付东杰等,2021;孙哲伦等,2023)。目前最主流的遥感云平台为GEE(Google Earth Engine)(Kumar和Mutanga,2018;Hansen等,2013;Gorelick等,2017;蒙继华等,2024),由美国的谷歌公司研发。GEE集成了Landsat系列、Sentinel系列、MODIS等卫星数据,以及地形、气象、人口等多种数据,并提供了大量的函数和云端算法,依托谷歌公司的全球百万台服务器,实现数据密级分析、海量计算和高端可视化(付东杰等,2020),一经问世便受到了全球学者的广泛关注。

数据立方基于高性能存储/计算设施,采用统一的时空基准,将对地观测数据组织为ARD,向用户提供海量对地观测数据发现、访问和大规模分析的功能(高凡等,2022)。随着数据立方体模型在对地观测领域掀起的热潮,国际上陆续开展了大量相关研究,如开源数据立方体ODC(Open Data Cube)(Killough等,2020)、地球系统数据立

方体ESDC(Earth System Data Cube)(Mahecha等,2020)、多源对地观测时空立方体(GeoCube)(高凡等,2022)、无缝数据立方体(RDC)(宫鹏,2021;刘涵和宫鹏,2021)等,其中研究和应用较多的为ODC。

ODC起源于澳大利亚科工局和地调局开发的澳大利亚地学数据立方体AGDC(Australian Geoscience Data Cube)(Lewis等,2017),后由地球观测卫星委员会(CEOS)牵头组织于2018年成立。ODC作为一个免费的开源软件包,简化了对大量卫星图像和其他地球观测数据的管理和分析,允许用户轻松访问、处理和分析数十年的地理数据,以跟踪地球表面随时间的变化,旨在帮助科学家、研究人员和政府机构在环境问题、土地利用和资源管理等领域做出更明智的决策,提升对地观测数据的影响力。2019年后在全球多个国家和地区进行定制化开发和业务化部署。经过多年的发展、壮大和完善,ODC在全球的影响力不断提升,目前已完成非洲数据立方体(Africa Regional Data Cube)(Killough,2019;Mubea等,2020)、瑞士数据立方体SDC(Swiss Data Cube)(Giuliani等2017,2018;Chatenoux等,2021)、澳大利亚数字地球(Digital Earth Australia)(Gavin等,2018;Dhu等,2017)等。基于ODC框架的中国数据立方体CDC(China Data Cube)已在部署建设中(Yao等,2018;孙哲伦等,2023)。

相比于GEE平台的多类型数据,ODC只侧重对地观测数据。ODC框架下集成了ARD的生成算法,可将原始的对地观测数据处理成ARD,目前支持Landsat 5/7/8, Sentinel-1/2, ALOS-1/2, ASTER, MODIS等数据。ODC框架由数据获取层、逻辑结构层、调用接口层和具体应用层4个层次,其中数据获取层用于写入对地观测的原始数据和预处理数据,对ARD进行管理,并使用NetCDF格式存储单元来分块存储数据,提升数据存储和调用的效率。此外,ODC方便在本地部署,对小范围数据分析友好,且提供了开源通用分析框架和丰富的数据处理与分析接口,在大型网格化数据收集、组织和分析中具有很大优势(孙哲伦等,2023)。

作为ARD的载体,依托遥感云平台和数据立方体,在土地覆盖/土地利用制图(Owers等,2022;宫鹏,2021;Wang等,2020)、海岸监测(Murray等,2019;Astsatryan等,2022)、植被监

测 (Bastin 等, 2017, 2019; Malthus 等, 2019)、农业监测 (Wardle 等, 2022; Zeng 等, 2018)、灾害监测和预警 (Hawbaker 等, 2020)、气候变化监测等 (Stocker 等, 2019) 多个领域均涌现了大量的成果。

5 基于国产卫星的 ARD 发展现状

5.1 国产卫星生成 ARD 面临的挑战

中国于 1970 年 4 月发射了第一颗人造地球卫星“东方红一号”, 拉开了中国航天活动的序幕, 之后陆续发射了 FY、HJ、ZY、HY 以及 GF 系列等多颗卫星, 观测能力迅速提升。中国已成为世界遥感第二大, 具备了全球最强的十米级观测能力, 为长时间序列的应用与分析奠定了基础。国产光学遥感卫星数据由于几何定位低、辐射性能差、大气校正业务化困难等问题, 导致预处理的难度大, 影响了应用能力的发挥和潜力的挖掘。

(1) 几何定位精度低。国产卫星数据, 尤其是国产中高分辨率卫星数据, 其几何定位低主要表现在存在局部几何畸变、无控几何精度偏低、几何精度不一致等问题。Shan 等 (2023) 对上万景 GF-1 和 GF-6 影像几何精度的评价结果表明, GF-1 影像几何误差在 1—22 个像元, GF-6 影像误差在 0—7 个像元, 多数影像存在不同程度的内部几何变形 (图 5), 且在山区的几何变形更明显。

(2) 缺少星上定标设备, 辐射性能差, 定标频次低。与 Landsat 等国际主流卫星相比, 国产卫星的辐射性能较差, 主要体现在以下几个方面。其一, 缺少星上定标设备, 不能及时监测并纠正传感器的性能变化。目前绝大多数国产高分卫星的在轨星上定标设备研制明显落后于国际水平, 对在轨运行的卫星标定多通过场地定标, 需要大

量的人力物力, 且易受大气条件影响, 定标频次低, 不能及时监测并纠正传感器的性能变化。其二, 受传感器硬件设计影响, 不同源卫星、同卫星不同传感器影像间存在辐射差异, 影响了多星协同使用。例如, GF-1 包括 4 个 WFV 相机, 4 个相机同时获取的影像之间具有明显的拼接线差异 (图 6 (a)), 这就是辐射不一致引起的; 此外, GF-1 和 GF-6 在高分系列中是作为组网星设计, 搭载了同类型 WFV 相机, 但实际上, 二者同时过境的影像拼接在一起时也具有明显的拼接线差异 (图 6 (b))。其三, 国产卫星传感器的辐射稳定性差, 辐射性能衰减明显。与国际同类型主流卫星相比, GF-6 WFV 的辐射性能平均年衰减率超过 7% (Yang 等, 2020)。其四, 绝大多数国产中高分辨率卫星为宽覆盖、大角度观测, GF-6 的一个 WFV 相机和 GF-1 的 4 个 WFV 的幅宽可达 800 km, HJ-1 和 HJ-2 的 CCD 相机幅宽也有 700 km, 在进行定标时, 受定标场的 BRDF 效应影响较大, 需要通过精确的 BRDF 测算将其影响精确刻画出来, 以免为定标结果带来较大的不确定性 (Zhong 等, 2014; Schläpfer 等, 2015; Yang 等, 2015, 2017, 2020; Farhad 等, 2020; Gao 等, 2020; Zhou 等, 2021)。

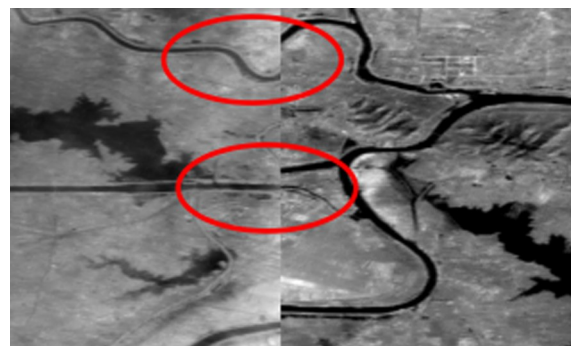
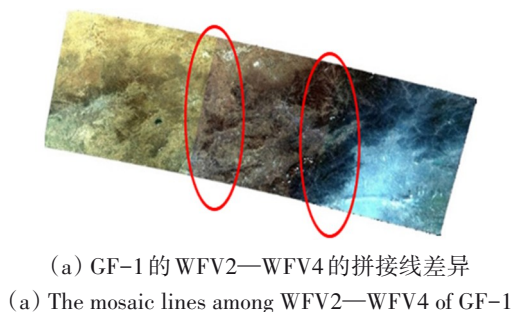
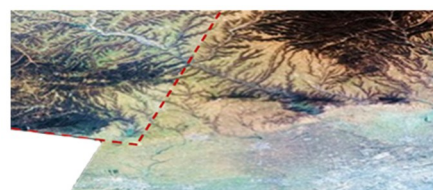


图 5 GF-1 影像几何误差引起的影像间拼接错位
Fig. 5 Geometric errors in GF-1 imagery cause misalignment in image mosaicking



(a) GF-1 的 WFV2—WFV4 的拼接线差异
(a) The mosaic lines among WFV2—WFV4 of GF-1



(b) GF-1 与 GF-6 的 WFV 拼接线差异
(b) The mosaic lines between GF-1 and GF-6

图 6 不同源卫星、同卫星不同传感器影像间存在辐射差异

Fig. 6 Radiometric differences between different source satellites or different sensor images of the same satellite

(3) 大气校正不完全、精度低。在进行地表反射率的ARD产品生产时,需要高精度、全地表、全自动化的大气校正技术,才能支撑ARD产品的业务化生产。然而,目前国产卫星的大气校正还面临几个特有或共性问题。首先,中国受雾霾影响大,需要重点考虑高气溶胶光学厚度AOD (Aerosol Optical Depth) 情况下的大气校正方法。第二,国产卫星数据缺少短波红外波段和深蓝波段,导致传统的大气校正方法不再适用。第三,现有的较成熟的业务化算法,多使用低分辨率的

气溶胶光学厚度产品,例如 Landsat Collection 2 使用了MODIS产品,无法捕捉高分率影像上精细的空间变化,导致大气校正不完全(图7)。第四,高亮地表的气溶胶信号弱,易被较强的地表信号掩盖,大部分算法对高亮地表处的大气校正精度较低。此外,现有的高精度大气校正算法往往针对具体的地表类型研发,在应用于地表类型多样的整景影像的大气校正时,自动化程度低,难以业务化运行。

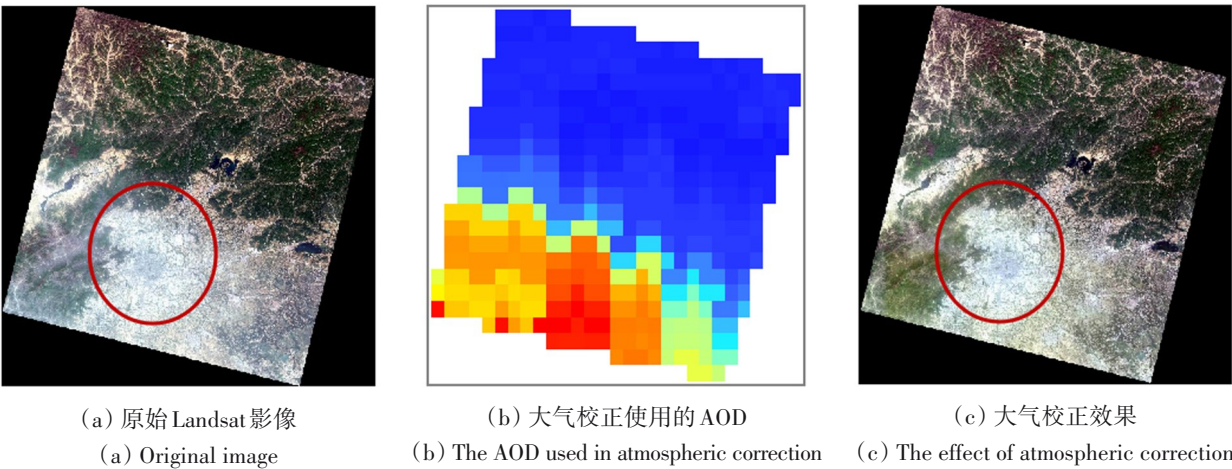


图7 Landsat 影像使用的气溶胶光学厚度产品分辨率低,大气校正不完全
Fig. 7 The aerosol optical depth product used for Landsat imagery has low resolution, resulting in incomplete atmospheric correction

(4) 缺少云检测的关键波段,云检测精度低。传统基于特征阈值方法的云检测技术往往使用蓝波段、近红外波段、短波红外波段和热红外波段的组合,然而,国产卫星如GF、HJ等系列,缺少

短波红外和热红外波段,导致传统阈值法在高亮地表处(积雪、高反射率地表等)误检严重(图8),影响ARD产品的质量标记精度。

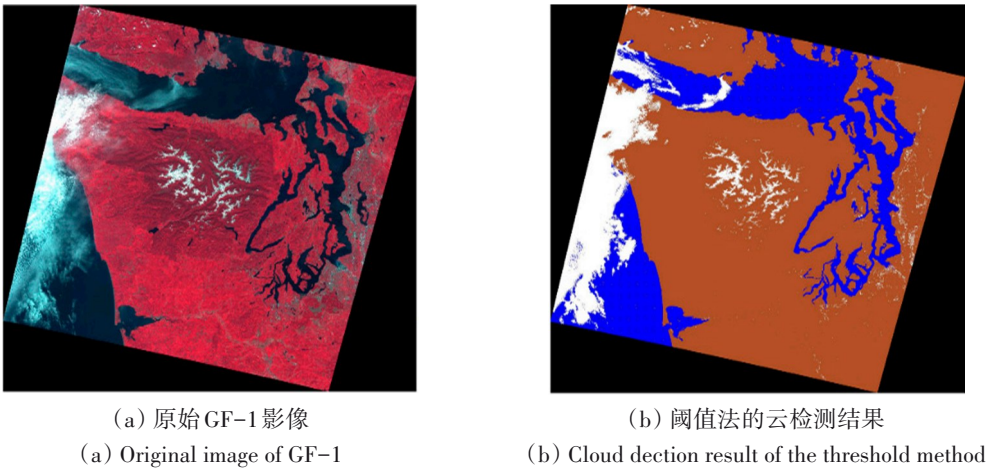


图8 传统特征阈值法导致云和积雪的误检(Chang 等,2023)
Fig. 8 Traditional feature threshold methods lead to false detection of clouds and snow (Chang et al., 2023)

因此, 针对国产中高分辨率的卫星数据, 必须解决几何、辐射、大气、云检测等多个问题, 形成高精度、自动化的解决方案, 才能推动后续ARD产品的生产, 打通原始数据到应用分析的通道, 真正发挥出国产卫星的应用潜力。

5.2 GF ARD: 国产高分卫星的ARD产品

相比于国外ARD产品的不断涌现, 国产卫星ARD产品的发展较为滞后, 目前仅有少数团队对中高分辨的ARD产品具备生产能力。GF ARD产品是目前已经公开发布且使用较多的国内光学卫星ARD产品 (Zhong等, 2021)。

与Landsat ARD类似, GF ARD以标准分幅的形式提供, 在通用和统一的投影下提供逐像素质量标记和用于数据追溯和处理的元数据信息, 并以HDF文件的形式存储和分发。ARD中存储了各波段经过几何配准和辐射定标后的TOA反射率以及经过大气校正之后的地表反射率、角度信息, 以及分辨率、观测时间、生产时间、投影信息、使用的原始数据信息等。GF ARD产品的生产流程如图9所示, 包括几何校正、辐射定标、大气校正、标准分幅、质量控制等几个关键技术。

(1) 几何归一化。针对国产卫星几何偏差大的问题, 采用时间因子的星地一体化 (时)、大规模区域网平差 (空)、多特征融合多源遥感影像 (特征), 结合时间、空间和特征3个方面实现国产多源影像几何精度归一化处理。首先采用基于基

准影像的几何精校正技术, 该技术使用少量控制点优化有理函数模型, 提高RPC校正精度; 通过基于几何约束的分块匹配, 剔除误配点, 获得大量高精度控制点; 通过多线程并行处理, 极大的提高了算法处理速度。此外, 融合了基于DEM的误匹配点剔除方法 (图10), 该方法通过判断匹配点之间的高程差异, 能有效克服复杂地形的影响, 实现了控制点的高精度识别与匹配 (Shan等, 2014; Shan和Zhang, 2023)。最后, 通过区域网平差技术进一步提升几何校正精度 (图11)。几何校正后, 对上万景影像之间的平均中误差统计, 结果小于1个像元。

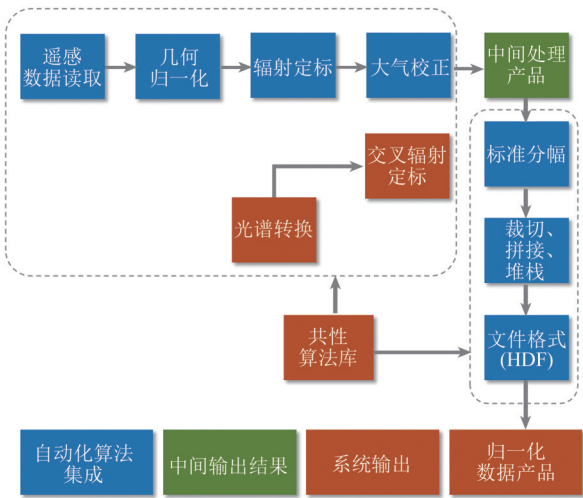


图9 GF ARD产品的生产框架 (Zhong等, 2021)
Fig. 9 The production framework of GF ARD (Zhong et al., 2021)

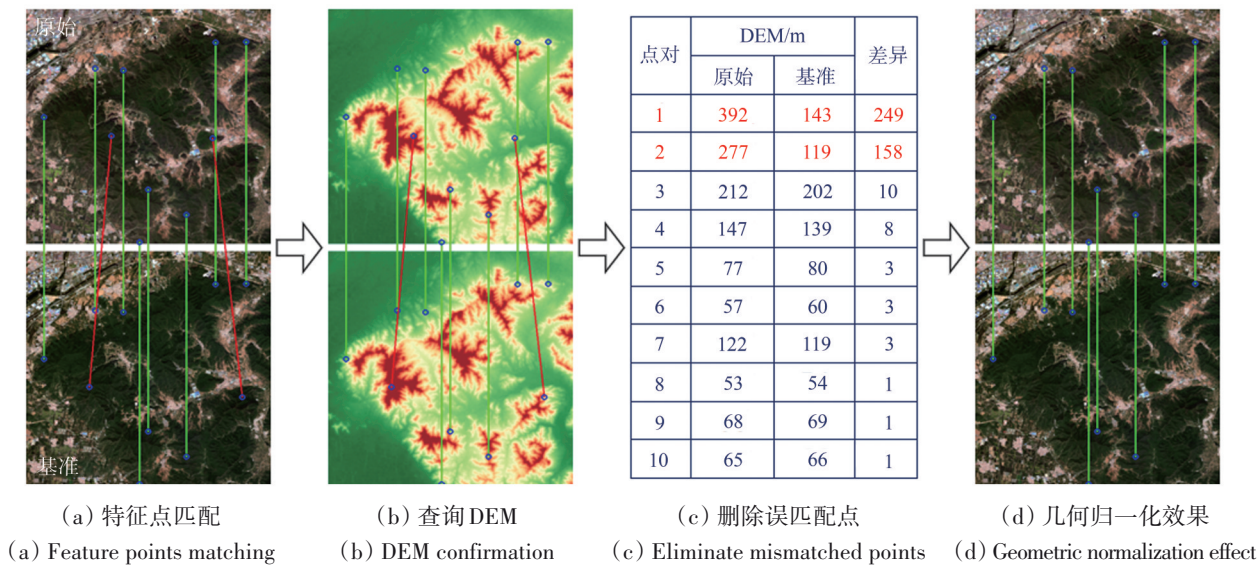


图10 复杂地形区基于DEM的误匹配点剔除流程
Fig. 10 The mismatched point removal process based DEM for complex terrain areas

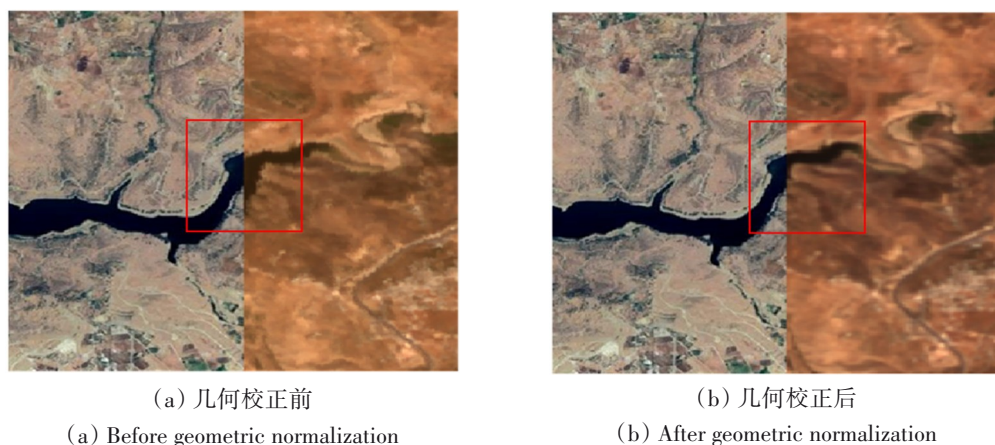


图 11 几何归一化效果

Fig. 11 Geometric normalization effect

(2) 辐射归一化。针对国产高分卫星缺少星上定标设备、场地定标频次低、传感器性能不稳定、多源传感器数据之间辐射差异，以及宽覆盖大角度观测导致BRDF影响大的问题，巧妙地利用地形起伏但辐射性能长期稳定的定标场，发展了基于Landsat和DEM构建定标场BRDF查找表的交叉辐射定标方法(Zhong等, 2014; Yang等, 2015,

2017, 2020)，利用BRDF查找表拟合目标传感器波段的TOA反射率，最终实现交叉辐射定标。该方法将定标频次由一年一次的场地定标提高到一年多次，多星综合辐射一致性优于3.73%，归一化后数据在时间上的衰减趋势基本消除，空间上的影像拼接线基本消失(图12)。

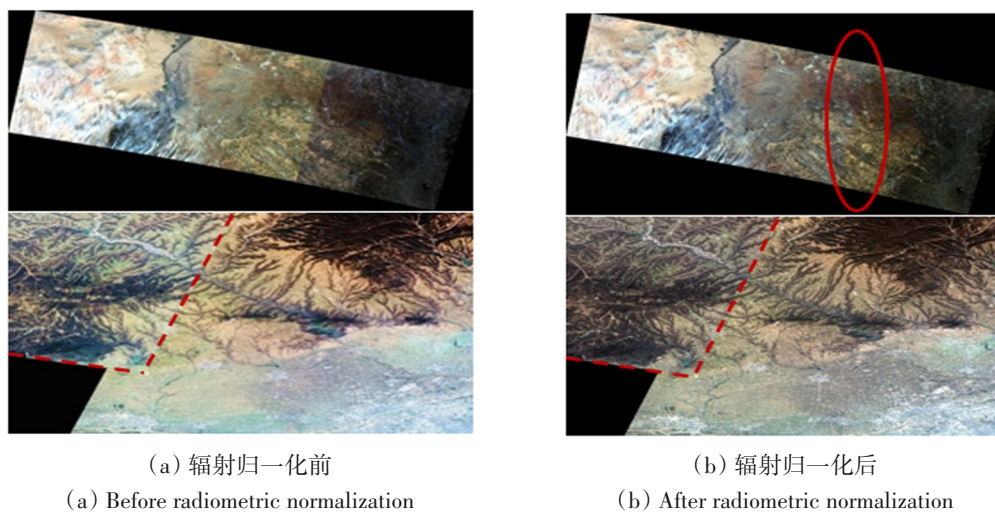


图 12 辐射归一化效果

Fig. 12 Radiometric normalization effect

(3) 大气校正。Zhong等为GF ARD产品构建了完整的大气校正技术体系(Zhong等, 2017b)，包括全图像AOD反演与大气校正技术，基于BRDF高亮地表大气校正技术和城市地表大气校正技术，极大提高了地表反射率产品的精度。一大创新是利用遥感图像在时间和空间两个维度上高低频信号分离原理：在空间维度上，地

表信息变化明显，为高频信号，而大气信息缓慢变化，为低频信号；在时间维度上，高亮地表区域的大气信息在时间上变化明显，为高频信号，但地表信息变化缓慢为低频信号；通过时间和空间上的高低频信号分离，解决了全图像和高亮地表处的大气校正问题。校正效果如图13所示。

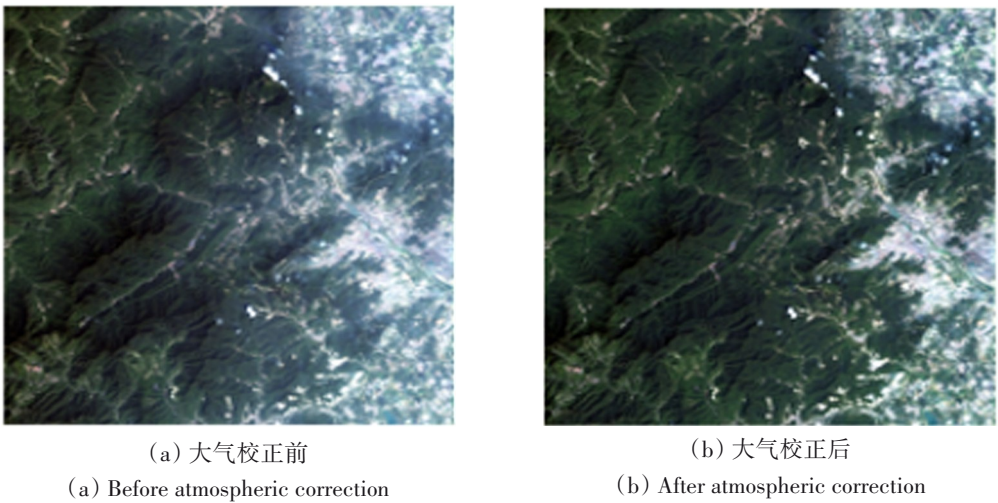


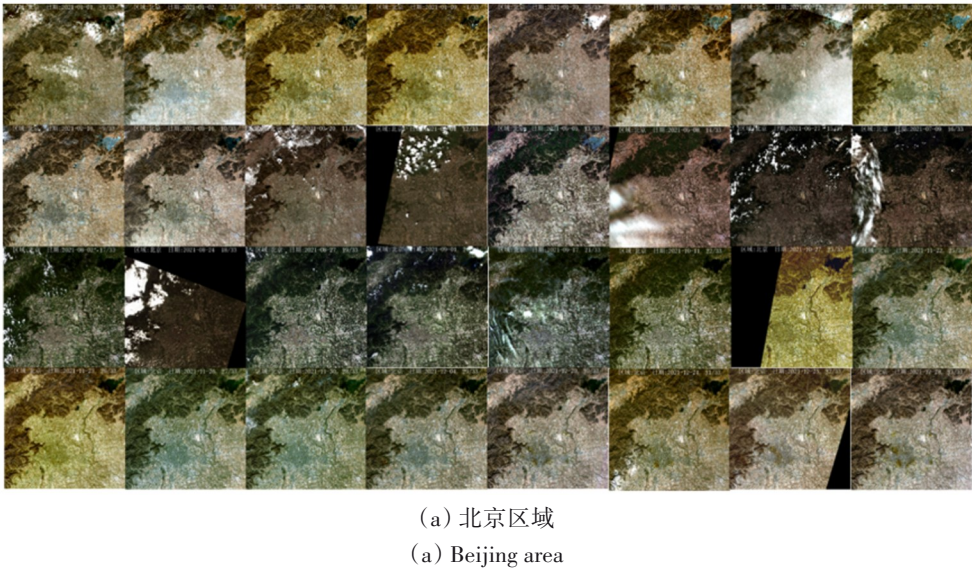
图 13 大气校正效果展示
Fig. 13 Atmospheric correction effect display

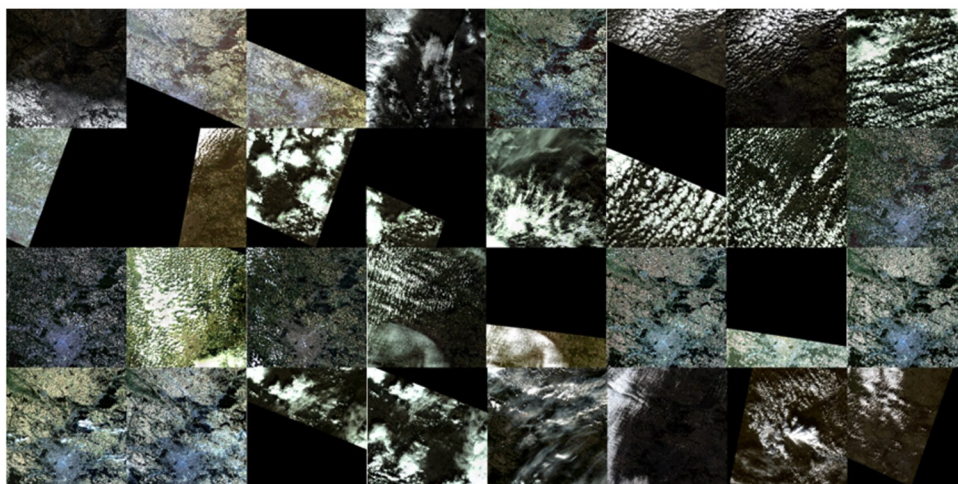
(4) 分幅和投影。GF ARD 产品中采用了与 Sentinel-2 同样的分幅标准，即军事网格参考系统 (MGRS)，以便后续与 Sentinel-2 进行比较和融合。MGRS 是 UTM 的扩展版本，首先按照 UTM 系统将地球表面划分为 60 个区域，每个区域为一个垂直宽度为 6° 经度，水平宽度为 8° 纬度的方格；其次，对每个 UTM 区域内分割为 $100\text{ km}\times 100\text{ km}$ 的小方格，并按照东西和南北的位置进行字母编码，投影则参考对应 UTM 方格的 WGS84 投影。

(5) 云检测和质量标记。GF ARD 设计了一个质量评估波段，包含从 1A 级数据预处理中传递的信息和与大气校正有关的信息，以 16 位无符号整数 (UINT 16) 的位 (bit) 填充格式存储，设置不同的值表示云、气溶胶或填充值。其中，云及云

阴影检测信息来自面向对象的云检测算法 (Zhong 等, 2017a)，并对云和云阴影附近的像素进行了云膨胀标记以进一步减少疑似的云和云阴影。

在以上技术的加持下，GF ARD 产品具有时空分辨率高、空间完整性好、辐射一致性高、受云和气溶胶影响小的特点。目前，GF ARD 产品只使用了 GF-1 WFV 数据，在受云、雨等影响较小的地区可基本实现月度的全覆盖 (图 14 (a))，但在受云、雨等影响较大的地区如中国南方，仍存在明显的影像缺失问题 (图 14 (b))。因此，未来还会融入 GF-6、HJ-2 以及后续不断发射的同类型其他传感器，以协同生产更高观测频次的地表反射率 ARD 产品，提升长时间序列上的分析发现能力。





(b) 巴黎区域

(b) Paris area

图 14 不同条幅下的多期 ARD 数据

Fig. 14 Multi - period ARD data under different tiles

6 结 语

目前, 全球空间基础设施已经进入了一个系统化发展和全球服务的新阶段。卫星应用水平和商业服务模式也在不断创新和升级, 卫星遥感应用已经从传统基础应用向专业化、深度开发和社会化服务拓展, 成为保障国家利益和公共安全的核心技术。尽管海量的地面观测数据在环境、社会和经济研究中有着巨大的应用潜力, 但也为数据处理、存储和分析带来了巨大的挑战。

ARD技术的出现降低了数据处理成本和时间, 简化了数据处理流程, 颠覆了传统的遥感数据处理和分析模式, 使得全球尺度的长时序分析和应用变得更加便捷和高效。作为ARD的载体, 遥感云计算平台和对地观测数据立方通过标准化的数据格式和接口, 大大提高了对地观测数据的可访问性和处理效率, 促进了数据共享和跨学科合作, 并支持大规模数据分析, 增强了数据的透明性和可信度, 极大地推动了科学研究、政策决策和技术创新。

ARD和数据立方体越来越受到全球各国对地观测领域机构和科研人员的关注。CEOS于2019年启动了CARD4L倡议, 旨在制定分析即用的陆地观测数据标准, 推动卫星数据的开放性和可持续性。该倡议得到了多个国家和国际组织的支持, 制定了CEOS-ARD产品规范(PFS), 用于定义满

足CEOS ARD要求的数据集。基于Landsat系列和Sentinel系列数据的ARD技术和产品已经非常成熟, 且已进行了大规模和长时序的应用。

相比国外ARD产品的快速发展, 国产卫星ARD产品相对滞后。近年来, 随着高分辨率对地观测卫星(如GF、ZY、HJ系列等)的发射与数据共享, 中国逐渐具备了自主生产ARD产品的能力。中国科学院、国家航天局等机构, 以及部分高校和企业, 已开展了国产卫星的ARD产品开发研究, 发布了一些针对GF-1、ZY-3等卫星的ARD产品。这些数据主要应用于农业、环境监测、灾害预警等领域, 逐步推动中国在地球观测数据领域的自给自足。GF ARD是中国十米级卫星数据的ARD产品, 突破了国产卫星数据在几何、辐射和大气校正方面的技术难题, 是将国产卫星数据从可用变为好用的新起点, 为后续融合更多国产卫星数据生产多源国产ARD产品, 以及国产卫星与国际卫星融合的ARD提供了思路和基本框架, 以进一步发挥国产卫星数据在全球变化研究和应用中的潜力和能力。

目前全球的ARD技术和产品处在快速发展阶段, 几个较为关注的研究趋势包括:

(1) 发展多源融合的ARD产品。目前的主流ARD产品如Landsat系列和Sentinel系列, 均各自处理, 还未形成协同应用的能力。然而, 单一遥感卫星传感器的数据产品精度不同或时空连续性

不好,难以高精度地反演地表参数,常常需要综合应用多源卫星传感器的数据。比如光学数据易受云雨的影响,造成数据缺失,而与SAR数据的协同可以实现全天候观测。遥感云平台和数据立方等虽具备多源数据协同处理、标准分幅和快速分发的能力,但不同源的卫星在波段设置和光谱响应等参数上的设计不同,导致获取到的观测数据之间存在不一致的问题,使得多源数据的协同使用面临巨大挑战。此外,在应用多源数据进行长时序的应用分析时,不同源传感器的辐射衰减差异也是需要考虑的问题。因此,生成多源协同的ARD产品不仅需要解决单一传感器数据的预处理、以及多源数据的组织管理问题,还需要考虑不同源卫星数据之间的差异,解决辐射不一致和时空不一致的问题,以获取更多的观测频次和地表参数,满足大范围长时序的应用分析需求。多源融合ARD产品的研究可从国际数据和国内数据的融合、光学与SAR数据的融合、多光谱与高光谱的融合、观测数据和站点数据的融合等方面的关键技术和生产框架着手。

国产卫星的ARD产品目前主要集中在GF系列的中高分辨率多光谱数据上,在ZY、HJ等其他卫星数据上的研究较少,在高光谱、SAR等方面仍然存在空白,亟需进行开拓研究。

(2) 精化数据预处理技术。当前已有大量研究为生成ARD提供技术方案,如几何校正(Zhou等, 2023)、大气校正(Yin等, 2022)、光谱对齐(Liu等, 2023)、云检测(Chang等, 2023; 胡昌苗等, 2023)、质量标记(Fan等, 2023)等,且随着ARD数据的需求越来越多,一些ARD处理软件也陆续出现,例如针对Landsat数据处理研发的LaSRC(Vermote等, 2018),针对Sentinel系列数据研发的Sen2cor(Raiyani等, 2021),能够大规模处理和分析Landsat和Sentinel-2图像的科学软件FORCE(Frantz, 2019),能够将Sentinel-1和Sentinel-2数据标准化处理成多模态和多时相ARD的python框架等(Upadhyay等, 2022)。然而,即使是主流的Landsat和Sentinel ARD产品,其部分预处理技术的不确定度仍然较大(Li等, 2018; Rumora等, 2020; Chen和Zhu, 2022)。此外,现有的遥感云平台和数据立方体多将侧重点放在了ARD数据的组织、管理和分发方面,虽然也集成了数据预处理算法,但各算法的精度参差不齐,

影响用户的选择和使用。随着计算能力的快速发展和成本的大幅降低,复杂的高精度预处理算法将更加容易实现,ARD产品的质量将进一步提升。

尽管中国的卫星数据观测能力不断提升,但在几何精度、辐射一致性和大气校正等方面,与国际领先水平相比仍有差距。虽然很多研究已经对数据预处理技术进行了研究,但尚未实现真正的自动化和标准化。随着人工智能和大数据技术的发展,未来可以考虑引入深度学习和高效算法,实现实时的数据预处理,提高数据的互操作性。

(3) 提升ARD产品的共享和分发能力。遥感云计算平台和数据立方体虽然极大的促进了ARD产品的共享和分发,但随着数据量暴涨和用户需求激增,共享和分发的能力仍有待进一步提升。首先,由于不同卫星数据源和处理标准的多样性导致数据格式和质量不统一,增加了数据立方体的构建和互操作性难度。其次,数据体量庞大,存储和传输成本高,尤其对于长时间序列和大面积观测的数据,传统分发模式无法满足用户的高效获取需求。第三,数据预处理过程复杂且耗时,不同用户需求的差异使得个性化的数据服务难以实现。此外,隐私和安全性也是数据共享中的潜在挑战。因此,下一步的研究方向可着重于标准化和自动化处理流程,确保不同数据源的互操作性;同时开发更高效的存储与分发机制,提升ARD产品的获取和处理速度。对于用户而言,还需要研发个性化、灵活的API接口或可视化工具,以及加强数据隐私保护和共享的政策研究,以确保数据的安全与开放性平衡。

国产卫星的数据共享机制近年来也在逐步完善。以中国资源卫星应用中心官网的数据共享系统为例,普通用户已可订购中巴系列、高分系列、环境系列等12个卫星31个传感器的数据,涵盖了16 m以下的可见光、近红外等多光谱的L1A和L2数据。然而,在数据共享方面仍有许多不足:(1) 数据共享系统提供的数据里面并无ARD产品,用户下载后仍需进行复杂的预处理;(2) 由于北极站于2016年建成,在此之前的如HJ-1、GF-1等并无全球覆盖的能力,北极站建成后,国产卫星数据才具备了全球覆盖的能力,但北极站的接收能力较低,导致在极地区域的卫星数据总量仍然较少;(3) 数据共享网站限定了每日最多订购数量(不超过100景),使得大尺度上的应用分析

需要较长的时间来准备数据；(4) 目前用户账户需要经过严格的审核，注册时需填写身份证信息、单位信息等，对个人用户不友好。此外，虽许多科研人员也在积极研究共享和分发国产数据的云平台（付东杰等，2021；孙哲伦等，2023），但目前仍没有类似GEE等影响力大的平台公开上线运营。

(4) 深挖ARD产品的商业应用潜力。虽然ARD产品在农业、气象、灾害监测、城市规划等领域具有广泛的潜力，但目前仅有少量的商业公司在该领域深耕，如美国的Maxar和Planet公司等，高价值的商业应用相对较少，市场需求不足，用户对数据的付费意愿低。大部分潜在用户，特别是中小型企业或地方政府，往往缺乏资金和技术资源去充分利用ARD产品。此外，很多领域的用户对于ARD产品的价值和应用场景仍不够清晰，导致数据使用率低，未能形成大规模的市场需求，进一步限制了产业的规模化发展。下一步应尽快推动ARD产品的具体应用落地，特别是在精准农业、智慧城市和气候变化监测等高潜力领域。

中国的卫星遥感技术经过30多年的发展，在国家政策层面的大力支持下，已经广泛应用于陆地资源调查、海洋生态保护、气象灾害预警和国家重大工程建设等诸多领域。商用遥感卫星占在轨遥感卫星的比重已超过36%，且仍呈增加趋势。然而，ARD产品的应用涉及多个环节，包括卫星数据获取、预处理、应用开发和服务交付等。中国的对地观测产业链尚不够完善，上下游的技术对接不畅，限制了市场的全面发展。当务之急，仍是需要从提升国产数据质量角度入手，针对具体的行业应用，开发针对性的解决方案，提升行业用户的认知和使用意愿，推动更多高价值商业应用的落地，激发市场需求，助力产业规模化发展。

总之，ARD产品目前在全球范围内已得到初步应用，在遥感云平台和数据立方体的推动下，应用需求和能力持续提升，在农业、气候监测和灾害管理等各领域具有广泛潜力。然而，数据质量差、标准化欠缺、共享分发能力受限及市场需求不足仍是发展的主要障碍，未来研究可侧重于进一步提升数据处理的自动化、标准化程度，拓展高价值商业应用市场。中国的ARD发展虽然起步较晚，随着自主卫星数据能力的提升，卫星数

量的暴涨，预处理技术的研发和国家政策的大力支持，呈现出蓬勃发展的趋势，然而，国产卫星在ARD产品的生成技术、共享分发、应用推广方面存在一些特有的问题，仍需进一步追赶，预计近期发展趋势仍聚焦于预处理技术提升、数据共享、市场拓展、国际合作和规模化应用上。

参考文献(References)

- Astsatryan H, Grigoryan H, Abrahamyan R, Asmaryan S, Muradyan V, Tepanosyan G, Guigoz Y and Giuliani G. 2022. Shoreline delineation service: using an earth observation data cube and sentinel 2 images for coastal monitoring. *Earth Science Informatics*, 15(3): 1587-1596 [DOI: 10.1007/s12145-022-00806-7]
- Bastin J F, Berrahmouni N, Grainger A, Maniatis D, Mollicone D, Moore R, Patriarca C, Picard N, Sparrow B, Abraham E M, Aloui K, Atesoglu A, Attore F, Bassüllü Ç, Bey A, Garzuglia M, García-Montero L G, Groot N, Guerin G, Laestadius L, Lowe A J, Mamane B, Marchi G, Patterson P, Rezende M, Ricci S, Salcedo I, Diaz A S P, Stolle F, Surappaeva V and Castro R. 2017. The extent of forest in dryland biomes. *Science*, 356(6338): 635-638 [DOI: 10.1126/science.aam6527]
- Bastin J F, Finegold Y, Garcia C, Mollicone D, Rezende M, Routh D, Zohner C M and Crowther T W. 2019. The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448): 76-79 [DOI: 10.1126/science.aax0848]
- Bendini H N, Fonseca L M G, Schwieder M, Rufin P, Korting T S, Koumrouyan A and Hostert P. 2020. Combining environmental and Landsat analysis ready data for vegetation mapping: a case study in the Brazilian savanna biome. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43: 953-960 [DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-953-2020]
- CEOS. 2024. CEOS analysis ready data[EB/OL]. [2024-08-14]. <https://ceos.org/ard/>.
- Chang H, Fan X, Huo L Z and Hu C M. 2023. Improving cloud detection in WFV images onboard Chinese GF-1/6 satellite. *Remote Sensing*, 15(21): 5229 [DOI: 10.3390/rs15215229]
- Chatenoux B, Richard J P, Small D, Roeoesli C, Wingate V, Poussin C, Rodila D, Peduzzi P, Steinmeier C, Ginzler C, Psomas A, Schaepman M E and Giuliani G. 2021. The Swiss data cube, analysis ready data archive using earth observations of Switzerland. *Scientific Data*, 8(1): 295 [DOI: 10.1038/s41597-021-01076-6]
- Chen J and Zhu W N. 2022. Comparing Landsat-8 and Sentinel-2 top of atmosphere and surface reflectance in high latitude regions: case study in Alaska. *Geocarto International*, 37(20): 6052-6071 [DOI: 10.1080/10106049.2021.1924295]
- Dhu T, Dunn B, Lewis B, Lymburner L, Mueller N, Telfer E, Lewis A, McIntyre A, Minchin S and Phillips C. 2017. Digital earth Australia - unlocking new value from earth observation data. *Big Earth Data*, 1(1/2): 64-74 [DOI: 10.1080/20964471.2017.1402490]
- Dwyer J L, Roy D P, Sauer B, Jenkerson C B, Zhang H K and Lym-

- burner L. 2018. Analysis ready data: enabling analysis of the Landsat archive. *Remote Sensing*, 10(9): 1363 [DOI: 10.3390/rs10091363]
- Egorov A V, Roy D P, Zhang H K, Li Z B, Yan L and Huang H Y. 2019. Landsat 4, 5 and 7 (1982 to 2017) Analysis Ready Data (ARD) observation coverage over the conterminous United States and implications for terrestrial monitoring. *Remote Sensing*, 11(4): 447 [DOI: 10.3390/rs11040447]
- Fan X, Chang H, Huo L Z and Hu C M. 2023. GF-1/6 satellite pixel-by-pixel quality tagging algorithm. *Remote Sensing*, 15(7): 1955 [DOI: 10.3390/rs15071955]
- Farhad M M F, Kaewmanee M, Leigh L and Helder D. 2020. Radiometric cross calibration and validation using 4 angle BRDF model between Landsat 8 and Sentinel 2A. *Remote Sensing*, 12(5): 806 [DOI: 10.3390/rs12050806]
- Frantz D. 2019. FORCE—Landsat + Sentinel-2 analysis ready data and beyond. *Remote Sensing*, 11(9): 1124 [DOI: 10.3390/rs11091124]
- Fu D J, Xiao H, Su F Z, Zhou C H, Dong J W, Zeng Y L, Yan K, Li S W, Wu J, Wu W Z and Yan F Q. 2021. Remote sensing cloud computing platform development and Earth science application. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 220-230 (付东杰, 肖寒, 苏奋振, 周成虎, 董金玮, 曾也鲁, 闫凯, 李世卫, 吴进, 吴文周, 颜凤芹. 2021. 遥感云计算平台发展及地球科学应用. *遥感学报*, 25(1): 220-230) [DOI: 10.11834/jrs.20210447]
- Gao C X, Liu Y K, Qiu S, Li C R, Ma L L, Han Q J, Liu J R, Zhao E Y, Zhao Y G, Qian Y G and Wang N. 2020. Radiometric cross-calibration of GF-4/VNIR sensor with Landsat8/OLI, Sentinel-2/MSI, and Terra/MODIS for monitoring its degradation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 2337-2350 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2991214]
- Gao F, Yue P, Jiang L C, Cao Z P, Liang Z H, Shangguan B Y, Hu L and Zhao S F. 2022. GeoCube: a spatiotemporal cube toward massive and multi-source EO data analysis. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(6): 1051-1066 (高凡, 乐鹏, 姜良存, 曹志鹏, 梁哲恒, 上官博屹, 胡磊, 赵帅锋. 2022. GeoCube: 面向大规模分析的多源对地观测时空立方体. *遥感学报*, 26(6): 1051-1066) [DOI: 10.11834/jrs.20210566]
- Gavin D, Dhu T, Sagar S, Mueller N, Dunn B, Lewis A, Lymburner L, Minchin S, Oliver S, Ross J and Thankappan M. 2018. Digital earth Australia—from satellite data to better decisions//Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE: 8633-8635 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518160]
- Giuliani G, Chatenoux B, De Bono A, Rodila D, Richard J P, Allenbach K, Dao H and Peduzzi P. 2017. Building an earth observations data cube: lessons learned from the Swiss data cube (SDC) on generating analysis ready data (ARD). *Big Earth Data*, 1(1/2): 100-117 [DOI: 10.1080/20964471.2017.1398903]
- Giuliani G, Chatenoux B, Honeck E and Richard J P. 2018. Towards Sentinel-2 analysis ready data: a Swiss data cube perspective//Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE: 8659-8662 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517954]
- Gong P. 2021. Intelligent mapping with remote sensing, iMap. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 527-529 (宫鹏. 2021. 智慧遥感制图(iMap). *遥感学报*, 25(2): 527-529) [DOI: 10.11834/jrs.20211010]
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S and Moore R. 2017. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18-27 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031]
- Hagolle O, Colin J, Coustance S, Kettig P, D'Angelo P, Auer S, Doxani G and Desjardins C. 2021. Sentinel-2 surface reflectance products generated by CNES and DLR: methods, validation and applications. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 51: 9-15 [DOI: 10.5194/isprs-annals-V-1-2021-9-2021]
- Hansen M C, Potapov P V, Moore R, Hancher M, Turubanova S A, Tyukavina A, Thau D, Stehman S V, Goetz S J, Loveland T R, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice C O and Townshend J R G. 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160): 850-853 [DOI: 10.1126/science.1244693]
- Hawbaker T J, Vanderhoof M K, Schmidt G L, Beal Y J, Picotte J J, Takacs J D, Falgout J T and Dwyer J L. 2020. The Landsat Burned Area algorithm and products for the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment*, 244: 111801 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111801]
- He G J, Wang G Z, Long T F, Peng Y, Jiang W, Yin R Y, Jiao W L and Zhang Z M. 2018. Opening and sharing of big earth observation data: challenges and countermeasures. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33(8): 783-790 (何国金, 王桂周, 龙腾飞, 彭燕, 江威, 尹然宇, 焦伟利, 张兆明. 2018. 对地观测大数据开放共享: 挑战与思考. *中国科学院院刊*, 33(8): 783-790) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2018.08.003]
- Hu C M, Zhang Z and Tang P. 2023. Research on multispectral satellite image cloud and cloud shadow detection algorithm of domestic satellite. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 623-634 (胡昌苗, 张正, 唐嫔. 2023. 国产卫星多光谱数据云与云影检测算法研究. *遥感学报*, 27(3): 623-634) [DOI: 10.11834/jrs.20211209]
- Keith A. 2020. Why Hasn't the Earth observation industry taken off (yet)? [EB/OL]. SpaceQ. [2024-08-14]. <https://spaceq.ca/why-hasnt-the-earth-observation-industry-taken-off-yet>.
- Killough B. 2018. Overview of the open data cube initiative//Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE: 8629-8632 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517694]
- Killough B. 2019. The impact of analysis ready data in the Africa regional data cube//Proceedings of 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IEEE: 5646-5649 [DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898321]
- Killough B, Siqueira A and Dyke G. 2020. Advancements in the open data cube and analysis ready data—past, present and future//Pro-

- ceedings of 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE: 3373-3375 [DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324712]
- Killough B D. 2022. Satellite analysis ready data for the sustainable development goals//Kavvada A, Cripe D and Friedl L, eds. Earth Observation Applications and Global Policy Frameworks. Hoboken: American Geophysical Union: 133-143 [DOI: 10.1002/9781119536789.ch8]
- Kumar L and Mutanga O. 2018. Google Earth Engine applications since inception: usage, trends, and potential. *Remote Sensing*, 10(10): 1509 [DOI: 10.3390/rs10101509]
- Lee K and Kim K. 2020. Validation of surface reflectance product of KOMPSAT-3A image data using RadCalNet data. *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(2_1): 167-178 [DOI: 10.7780/kjrs.2020.36.2.1.6]
- Lewis A, Lymburner L, Purss M B J, Brooke B, Evans B, Ip A, Dekker A G, Irons J R, Minchin S, Mueller N, Oliver S, Roberts D, Ryan B, Thankappan M, Woodcock R and Wyborn L. 2016. Rapid, high-resolution detection of environmental change over continental scales from satellite data-the Earth Observation Data Cube. *International Journal of Digital Earth*, 9(1): 106-111 [DOI: 10.1080/17538947.2015.1111952]
- Lewis A, Oliver S, Lymburner L, Evans B, Wyborn L, Mueller N, Raevksi G, Hooke J, Woodcock R, Sixsmith J, Wu W J, Tan P, Li F Q, Killough B, Minchin S, Roberts D, Ayers D, Bala B, Dwyer J, Dekker A, Dhu T, Hicks A, Ip A, Purss M, Richards C, Sagar S, Trenham C, Wang P and Wang L W. 2017. The Australian geoscience data cube-foundations and lessons learned. *Remote Sensing of Environment*, 202: 276-292 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.015]
- Li D R, Zhang G, Jiang Y H, Shen X and Liu W L. 2022. Opportunities and challenges of geo-spatial information science from the perspective of big data. *Big Data Research*, 8(2): 3-14 (李德仁, 张过, 蒋永华, 沈欣, 刘伟玲. 2022. 论大数据视角下的地球空间信息学的机遇与挑战. *大数据*, 80(2): 3-14) [DOI: 10.11959/j.issn.2096-0271.2022012]
- Li J J, Guo C H and Chen W R. 2023. Unleashing the potential of remote sensing data - introduction to ready data analysis. *Satellite Application*, (10): 28-30 (李俊杰, 郭朝辉, 陈卫荣. 2023. 释放遥感数据的潜力——分析就绪数据介绍. *卫星应用*, (10): 28-30)
- Li Y J, Chen J, Ma Q M, Zhang H K and Liu J. 2018. Evaluation of Sentinel-2A surface reflectance derived using Sen2Cor in North America. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(6): 1997-2021 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2835823]
- Liao X H. 2021. Scientific and technological progress and development prospect of the earth observation in China in the past 20 years. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 267-275 (廖小罕. 2021. 中国对地观测 20 年科技进步和发展. *遥感学报*, 25(1): 267-275) [DOI: 10.11834/jrs.20211017]
- Liu H and Gong P. 2021. 21st century daily seamless data cube reconstruction and seasonal to annual land cover and land use dynamics mapping-iMap(China)1.0. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 126-147 (刘涵, 宫鹏. 2021. 21 世纪逐日无缝数据立方体构建方法及逐年逐季节土地覆盖和土地利用动态制图—中国智慧遥感制图 iMap(China)1.0. *遥感学报*, 25(1): 126-147) [DOI: 10.11834/jrs.20210580]
- Liu Z Q, Wang Z, Zhao Z T, Huo L Z, Tang P and Zhang Z. 2023. Bandpass alignment from Sentinel-2 to Gaofen-1 ARD products with UNet-induced tile-adaptive lookup Tables. *Remote Sensing*, 15(10): 2563 [DOI: 10.3390/rs15102563]
- Mahecha M D, Gans F, Brandt G, Christiansen R, Cornell S E, Fomferra N, Kraemer G, Peters J, Bodesheim P, Camps-Valls G, Donges J F, Dorigo W, Estupinan-Suarez L M, Gutierrez-Velez V H, Gutwin M, Jung M, Londoño M C, Miralles D G, Papastefanou P and Reichstein M. 2020. Earth system data cubes unravel global multivariate dynamics. *Earth System Dynamics*, 11(1): 201-234 [DOI: 10.5194/esd-11-201-2020]
- Malthus T J, Lehmann E, Ho X, Botha E and Anstee J. 2019. Implementation of a satellite based inland water algal bloom alerting system using analysis ready data. *Remote Sensing*, 11(24): 2954 [DOI: 10.3390/rs11242954]
- Meng J H, He R P and Lin Z X. 2024. Status and prospects of Google Earth Engine in agricultural management research. *Journal of Geo-information Science*, 26(4): 1002-1018 (蒙继华, 何荣鹏, 林圳鑫. 2024. Google Earth Engine 在农业管理中的研究现状与展望. *地球信息科学学报*, 26(4): 1002-1018) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2024.230760]
- Mubea K, Killough B, Seidu O, Kimani J, Mugambi B and Kamara S. 2020. Africa regional data cube (ARDC) is helping countries in Africa report on the sustainable development goals (SDGs)//Proceedings of 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE: 3379-3382 [DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324156]
- Murray N J, Phinn S R, DeWitt M, Ferrari R, Johnston R, Lyons M B, Clinton N, Thau D and Fuller R A. 2019. The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 565(7738): 222-225 [DOI: 10.1038/s41586-018-0805-8]
- Nair T, Singh A, Venkateswarlu E, Swamy G P, Bothale V M and Krishna B G. 2019. Generation of analysis ready data for Indian Resourcesat sensors and its implementation in cloud platform. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*, 10(6): 9-17 [DOI: 10.5815/ijigsp.2019.06.02]
- Owers C J, Lucas R M, Clewley D, Tissot B, Chua S M T, Hunt G, Mueller N, Planque C, Punalekar S M, Bunting P, Tan P, Metternicht G. 2022. Operational continental-scale land cover mapping of Australia using the Open Data Cube. *International Journal of Digital Earth*, 15(1): 1715-1737 [DOI: 10.1080/17538947.2022.2130461]
- Potapov P, Hansen M C, Kommareddy I, Kommareddy A, Turubanova S, Pickens A, Adusei B, Tyukavina A and Ying Q. 2020. Landsat analysis ready data for global land cover and land cover change mapping. *Remote Sensing*, 12(3): 426 [DOI: 10.3390/rs12030426]
- Raiyani K, Gonçalves T, Rato L, Salgueiro P and Marques da Silva J R. 2021. Sentinel-2 image scene classification: a comparison be-

- tween Sen2Cor and a machine learning approach. *Remote Sensing*, 13(2): 300 [DOI: 10.3390/rs13020300]
- Ren J, Shao Y, Wan H, Xia Y H and Campos A. 2021. A two-step mapping of irrigated corn with multi-temporal MODIS and Landsat analysis ready data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 176: 69-82 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.04.007]
- Roy D P, Ju J, Kline K, Scaramuzza P L, Kovalsky V, Hansen M, Loveland T R, Vermote E and Zhang C S. 2010. Web-enabled Landsat Data (WELD): landsat ETM+ composited mosaics of the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 35-49 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.011]
- Roy D P and Yan L. 2020. Robust Landsat-based crop time series modelling. *Remote Sensing of Environment*, 238: 110810 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.038]
- Rumora L, Miler M and Medak D. 2020. Impact of various atmospheric corrections on sentinel-2 land cover classification accuracy using machine learning classifiers. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4): 277 [DOI: 10.3390/ijgi9040277]
- Schlöpfer D, Richter R and Feingersh T. 2015. Operational BRDF effects correction for wide-field-of-view optical scanners (BREFCOR). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(4): 1855-1864 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2349946]
- Shan X J, Tang P and Hu C M. 2014. An automatic geometric precision correction system based on hierarchical registration for HJ-1 A/B CCD images. *International Journal of Remote Sensing*, 35(20): 7154-7178 [DOI: 10.1080/01431161.2014.967884]
- Shan X J and Zhang J Y. 2023. Does the rational function model's accuracy for GF1 and GF6 WFV images satisfy practical requirements? *Remote Sensing*, 15(11): 2820 [DOI: 10.3390/rs15112820]
- She W Q, Zhang Z M, Peng Y, He G J, Long T F and Wang G Z. 2023. GF-1 WFV surface reflectance product in China's land area. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(9): 2206-2218 (余文庆, 张兆明, 彭燕, 何国金, 龙腾飞, 王桂周). 2023. 中国陆地区域 GF-1 WFV 地表反射率产品. *遥感学报*, 27(9): 2206-2218 [DOI: 10.11834/jrs.20222190]
- Stocker B D, Zscheischler J, Keenan T F, Prentice I C, Seneviratne S I and Peñuelas J. 2019. Drought impacts on terrestrial primary production underestimated by satellite monitoring. *Nature Geoscience*, 12(4): 264-270 [DOI: 10.1038/s41561-019-0318-6]
- Sun Z L, Xiao B Y, Zhao Z L, Yu G J, Cao Q Q, Wang M and Yao X C. 2023. Loading and service implementation of GF-1 satellite data based on Open Data Cube. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023: 38(4): 794-802 (孙哲伦, 肖弼雍, 赵祖亮, 俞国江, 曹倩倩, 王萌, 姚晓闯). 2023. 基于开放数据立方体的 GF-1 卫星数据加载与服务. *遥感技术与应用*, 38(4): 794-802 [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.4.0794]
- Tong Q X. 2023. The current situation and improvement ideas of remote sensing technology and industrialization development in China. *Development Research*, 40(6): 1-5 (童庆禧). 2023. 中国遥感技术和产业化发展现状与提升思路. *发展研究*, 40(6): 1-5 [DOI: 10.3969/j.issn.1003-0670.2023.06.003]
- Upadhyay P, Czerkawski M, Davison C, Cardona J, Macdonald M, Andonovic I, Michie C, Atkinson R, Papadopoulou N, Nikas K and Tachtatzis C. 2022. A flexible multi-temporal and multi-modal framework for Sentinel-1 and Sentinel-2 analysis ready data. *Remote Sensing*, 14(5): 1120 [DOI: 10.3390/rs14051120]
- Vermote E, Roger J C, Franch B and Skakun S. 2018. LaSRC (Land Surface Reflectance Code): overview, application and validation using MODIS, VIIRS, LANDSAT and sentinel 2 data's//Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE: 8173-8176 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517622]
- Vermote E F, Vermeulen A. 1999. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). ATBD Version, 4: 1-107.
- Wang X X, Xiao X M, Zou Z H, Dong J W, Qin Y W, Doughty R B, Menarguez MA, Chen B Q, Wang J B, Ye H, Ma J, Zhong Q Y, Zhao B and Li B. 2020. Gainers and losers of surface and terrestrial water resources in China during 1989-2016. *Nature Communications*, 11(1): 3471 [DOI: 10.1038/s41467-020-17103-w]
- Wardle J A, Sagan V and Mohammed F. 2022. Using open data cube on the cloud to investigate food security by means of cropland changes in Djibouti. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43: 1039-1044 [DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-1039-2022]
- Woodcock C E, Allen R, Anderson M, Belward A, Bindschadler R, Cohen W, Gao F, Goward S N, Helder D, Helmer E, Nemani R, Oreopoulos L, Schott J, Thenkabail P S, Vermote E F, Vogelmann J, Wulder M A and Wynne R. 2008. Free access to Landsat imagery. *Science*, 320(5879): 1011 [DOI: 10.1126/science.320.5879.1011a]
- Wulder M A, White J C, Loveland T R, Woodcock C E, Belward A S, Cohen W B, Fosnight E A, Shaw J, Masek J G and Roy D P. 2016. The global Landsat archive: status, consolidation, and direction. *Remote Sensing of Environment*, 185: 271-283 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.032]
- Yang A X, Zhong B, Hu L F, Wu S L, Xu Z P, Wu H B, Wu J J, Gong X S, Wang H B and Liu Q H. 2020. Radiometric cross-calibration of the wide field view camera onboard gaofen-6 in multispectral bands. *Remote Sensing*, 12(6): 1037 [DOI: 10.3390/rs12061037]
- Yang A X, Zhong B, Lv W B, Wu S L and Liu Q H. 2015. Cross-calibration of GF-1/WFV over a desert site using Landsat-8/OLI imagery and ZY-3/TLC data. *Remote Sensing*, 7(7): 10763-10787 [DOI: 10.3390/rs70810763]
- Yang A X, Zhong B, Wu S L and Liu Q H. 2017. Radiometric cross-calibration of GF-4 in multispectral bands. *Remote Sensing*, 9(3): 232 [DOI: 10.3390/rs9030232]
- Yao X C, Liu Y B, Cao Q Q, Li J J, Huang R H, Woodcock R, Paget M, Wang J and Li G Q. 2018. China data cube (CDC) for big Earth observation data: Lessons learned from the design and implementation//Proceedings of 2018 International Workshop on Big Geospatial Data and Data Science. Wuhan: IEEE: 1-3 [DOI: 10.1109/BGDDS.2018.8626825]
- Yin F, Lewis P E and Gómez-Dans J L. 2022. Bayesian atmospheric correction over land: sentinel-2/MSI and Landsat 8/OLI. *Geosci-*

- entific Model Development, 15(21): 7933-7976 [DOI: 10.5194/gmd-15-7933-2022]
- Zeng Z Z, Estes L, Ziegler AD, Chen A P, Searchinger T, Hua F Y, Guan K Y, Jintrawet A and Wood E F. 2018. Highland cropland expansion and forest loss in Southeast Asia in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, 11(8): 556-562 [DOI: 10.1038/s41561-018-0166-9]
- Zhong B, Chen W H, Wu S L, Hu L F, Luo X B and Liu Q H. 2017a. A cloud detection method based on relationship between objects of cloud and cloud-shadow for Chinese moderate to high resolution satellite imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(11): 4898-4908 [DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2734912]
- Zhong B, Wu S L, Yang A X and Liu Q H. 2017b. An improved aerosol optical depth retrieval algorithm for moderate to high spatial resolution optical remotely sensed imagery. *Remote Sensing*, 9(6): 555 [DOI: 10.3390/rs9060555]
- Zhong B, Yang A X, Liu Q H, Wu S L, Shan X J, Mu X H, Hu L F and Wu J J. 2021. Analysis ready data of the Chinese GaoFen satellite data. *Remote Sensing*, 13(9): 1709 [DOI: 10.3390/rs13091709]
- Zhong B, Zhang Y H, Du T T, Yang A X, Lv W B and Liu Q H. 2014. Cross-calibration of HJ-1/CCD over a desert site using Landsat ETM+imagery and ASTER GDEM product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(11): 7247-7263 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2310233]
- Zhou Q, Tian L Q, Li J, Wu H and Zeng Q. 2021. Radiometric cross-calibration of large-view-angle satellite sensors using global searching to reduce BRDF influence. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(6): 5234-5245 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3019969]
- Zhou S, Pan H B, Huang T and Zhou P. 2023. High accuracy georeferencing of GF-6 wide field of view scenes toward analysis ready data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 5614512 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3292297]
- Zhu Z. 2019. Science of Landsat analysis ready data. *Remote Sensing*, 11(18): 2166 [DOI: 10.3390/rs11182166]

Progress on Analysis Ready Data for remote sensing multispectral satellite

YANG Aixia, ZHONG Bo, LIU Qinghuo, TANG Ping, SHAN Xiaojun, WU Shanlong, HUO Lianzhi, HU Longfei, AO Kai, WU Junjun

Aerospace information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: With the development of a new generation of remote sensing satellites such as high resolution and super-resolution satellites, the earth observation data have experienced explosive growth. The massive historical observation data and the new-generation earth observation data provide opportunities for systematically monitoring and evaluating the changes on the earth's surface, enabling researchers to study the dynamic trends of earth science, environmental science, resource science, and global change at a macroscopic scale. The high difficulty, low efficiency, and high cost of data preprocessing are important reasons for the insufficient supply of earth observation data. First, the raw data of remote sensing satellites usually need complex preprocessing before analysis and applications, including radiometric calibration, atmospheric correction, and terrain effect correction. Second, many satellite users lack professional knowledge, infrastructure, and bandwidth, hindering efficient data utilization. In addition, users in different fields must repeatedly perform similar preprocessing operations to meet diverse application requirements, resulting in unnecessary labor costs. In response to these challenges, the "Analysis Ready Data" (ARD) concept was proposed by Committee on Earth Observation Satellites, providing detailed processing and quality control requirements to ensure that the data can be directly used for analysis and applications. Many countries and institutions have successively developed ARD compliant products, such as the Landsat ARD in the United States and the Sentinel-2 ARD in Europe. The development of ARD in China started relatively late, but breakthroughs have been achieved in recent years, and the GF ARD product with high spatiotemporal resolution and good consistency has been launched. The popularization of ARD has accelerated data sharing and scientific research, promoted the openness and cooperation of global remote sensing big data, and enabled long-term sequence analysis and global monitoring. This paper examines the background, connotation, and development status of ARD; introduces the international mainstream optical satellite ARD products; discusses the remote sensing cloud platforms and data cubes that serve as the carriers for ARD production and sharing; summarizes the problems and challenges faced in the production of domestic optical satellite data ARD products; and focuses on introducing the first set of domestic high-resolution satellite data ARD: the GF ARD product. It also discusses the key issues that ARD needs to solve in the future, aiming to provide ideas for the high-quality, high-efficiency, and standardized application of earth observation big data, thereby facilitating major scientific discoveries and government decision-making.

Key words: earth observation, Analysis Ready Data, Chinese satellites, normalization processing, cloud platform, data cube, data mining, multi-source data

Supported by National Key Research and Development Program (No. 2021YFE0117400, 2019YFE0197800)