



另类数据视角下的 经济洞察

——卫星遥感在 经济金融市场中的应用

主编：张博辉

报告发布单位： 深圳数字经济研究院
SHENZHEN INSTITUTE OF DATA ECONOMY



咨询与数据支持单位： 尔特数科
alt data tech

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

另类数据视角下的经济洞察

——卫星遥感在经济金融市场中的应用

主 编：张博辉

副 主 编：赵小峰 魏与萱

执行主编：宋佩阳 王玥瑶

编 委：黄丰 潘京臣 薛原 余俊彪

行业顾问：林一平 刘宇博 陈然

鸣谢与说明

感谢深圳高等金融研究院包芊、樊涛为本报告所作贡献。

如对本报告内容感兴趣，欢迎联系：

- sidepost@cuhk.edu.cn

本报告正式发布于 2025 年 11 月。仅用于行业交流，而非商业用途，亦不构成投资建议。

目录

一、简介.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 卫星遥感数据优势	2
1.3 研究目标.....	6
二、卫星遥感数据总图景.....	7
2.1 卫星运行轨道	7
2.2 卫星类型及功能介绍.....	9
2.2.1 卫星类型	10
2.2.1.1 应用卫星.....	10
2.2.1.2 科学卫星.....	14
2.2.1.3 技术试验卫星.....	15
2.2.2 传感器类型	16
2.2.2.1 被动光学传感器 (Passive Optical Sensors).....	18
2.2.2.2 主动光学传感器 (Active Optical Sensors).....	26
2.2.2.3 被动微波传感器(Passive Microwave Radiometers).....	30
2.2.2.4 主动微波传感器 (Active Microwave Sensors).....	35
2.2.2.5 大气化学与成分专用传感器 (Atmospheric Composition Sensors)	40
2.3 卫星数据的获取	45

2.3.1 开源数据	51
2.3.2 商业数据源	57
2.4 卫星遥感数据处理基础.....	62

三、卫星遥感数据在经济金融市场应用 69

3.1 卫星遥感数据助力宏观层面监测分析.....	69
3.1.1 经济监测	69
案例一：夜间灯光——经济活动的地理足迹与轮廓.....	69
案例二： 尔特数科热红外辐射——衡量经济体系的代谢强度	71
3.1.2 物流监测	73
案例三： 尔特数科卫星港口监测直击盐田港拥堵.....	74
案例四：从新闻热点到金融信号 —— 洛杉矶长滩港拥堵事件....	75
3.1.3 交通监测	77
案例五：新冠疫情机场停机潮	78
案例六：虚拟新加坡交通仿真平台	80
3.1.4 环境检测	82
案例七：卫星量化观测全球工业排放.....	82
案例八：遥感技术追踪甲烷排放.....	84
案例九：InSAR 技术在矿区安全与环境监测中的应用	87
3.2 卫星遥感数据助力行业及微观层面监测分析	88
3.2.1 公司经营活动监测.....	88
案例十： 尔特数科热辐射遥感识别企业生产经营状况	89
3.2.2 行业监测	93

案例十一：行业碳排放监测	93
案例十二：基于遥感数据的零售业运营强度识别与业绩预测	95
案例十三：卫星遥感见证经济动态——中国消费与制造活动的遥感 透视.....	97
3.2.3 大宗商品监测.....	98
案例十四：多源遥感在原油库存中的全景监测.....	99
案例十五：美国农业部利用卫星遥感预测粮食作物产量	101
案例十六：农作物受损程度评估.....	103
3.2.4 土建项目开工监测.....	105
案例十七：卫星提前捕捉卡塔尔世界杯主场馆建设进度滞后	105
3.3 卫星遥感数据助力金融市场交易	107
3.3.1 助力证券市场交易	107
案例十八：尔特数科卫星数据量化投资案例	107
3.3.2 助力期货市场交易	109
案例十九：卫星遥感助力农产品期货交易决策.....	110
四、政府决策与金融行业支持及实施建议	114
4.1 建议政府积极建立基于卫星数据的监测系统	114
4.2 建议金融机构将卫星遥感融入业务场景	116
4.3 建议各方建立健全数据治理体系	119
五. 结论	120
参考文献.....	121

一、简介

1.1 背景

- 从另类数据到卫星遥感数据：

随着大数据、人工智能和云计算等技术的深度融合，金融分析正在经历一场深刻的范式变革。数据在形式与来源上的多样性显著提升，传统依赖抽样统计的指标（如 GDP、CPI、企业财报以及其他官方经济数据）因更新滞后、覆盖范围有限，已难以满足金融市场中对实时性与精细化的数据需求。在此背景下，另类数据(Alternative Data)即通过非传统渠道获取的经济与金融信息日益受到关注，并凭借其高频更新、数据规模大、类型多样的优势，迅速进入投资研究与风险管理的主流工具箱。

另类数据的价值不仅在于其提供了更为丰富的经济信号，更在于其独特结构属性所带来的全新应用范式。其来源通常超越金融体系的传统边界，如社交媒体、物联网终端、卫星遥感平台与物流追踪系统等，因而在获取路径、数据类型与处理方式上均与传统数据截然不同。一方面，另类数据在市场中普及度尚低，具有较强的信息稀缺性与战略价值；另一方面，其非标准化、体量庞大且噪声复杂，往往需要借助机器学习、自然语言处理等现金方法，才能提炼出有效洞察(Denev & Amen, 2020)。随着数据存储与算力的快速提升，研究者和机构能够更高效地从这些非结构化或半结构化数据中提取微观响应与宏观趋势，为金融决策提供前所未有的信息基础(Cao et al., 2024)。

在宏观(macro)、中观(meso)、微观(micro)三个层次上，另类数据在金融市场的应用已经形成了较为完整的体系(廖理, 2021)。

- 宏观层面，通过电商平台交易数据构建价格指数、利用招聘平台监测就业动态，或借助物流与税收数据追踪复工复产，以时效性和细节性超越传统统计。

- 中观层面，另类数据在行业和企业分析中，通过夜间灯光影像、热成像监测工业生产，或挖掘电商评论识别消费趋势，帮助投资者和政策制定者精准研判市场。
- 微观层面，另类数据在个体决策环节，投资者利用社交媒体数据分析市场情绪，金融机构基于消费行为数据优化信用评估，从而提升服务质量与覆盖率。

在诸多新兴数据源中，**卫星遥感数据**因其**覆盖范围广、客观性强、更新频率高等优势**，被视为突破传统统计时空局限的关键工具（Cong et al., 2021）。近年来，遥感卫星技术在空间/光谱分辨率、数据传输速度与存储能力上的持续突破，加之人工智能分析的赋能，正不断拓展其在科研与实践的应用边界（Guo et al., 2017）。与传统地面采集相比，遥感影像能够实现日度乃至小时级别更新，并因不依赖人为判断而具备高度一致性。其全球视野与实时响应能力，为金融分析提供了如同“上帝视角”的宏观洞察，使时空覆盖更广、信号响应更快、边际成本更低的金融服务成为可能。

随着信令数据在另类数据领域应用的深入，卫星遥感数据作为后续发展在地理空间数据中扮演着特别的角色，通过地球观测卫星提供的高分辨率图像，为投资者和决策者提供丰富的地理、环境和经济信息，与无人机和雷达数据结合可增强数据准确性和应用范围，已渗透到经济活动监控、农业、采矿、建筑和房地产、航运、石油和天然气、项目监控以及消费者零售活动等多个领域。在供应链管理、环境评估和经济活动预测方面，卫星数据发挥着重要作用，如监测钢厂和化工厂运营情况以预测公司经营表现、商品供需、价格趋势，还可用于更广泛的环境监测、分析气候变化对市场的影响以及优化城市基础设施和资源配置，如利用卫星影像监测农作物生长情况或使用兴趣点数据评估商业地产投资价值。

1.2 卫星遥感数据优势

● 传统数据缺点：

在全球经济活动日益复杂且迅速变化的背景下，高质量、实时且细粒度的数

据需求愈加迫切。尤其在金融经济领域，投资决策、风险管理和政策制定越来越依赖于对经济运行状态的及时把握（徐冠华等, 2016）。然而，现有金融经济数据大多基于传统的统计调查方法与官方发布机制，在响应速度、空间分辨率和数据客观性等方面暴露出诸多局限，难以满足现代金融系统对高频、精准与透明信息的需求。

首先，传统经济数据如 GDP、失业率、进出口总额等，通常按季度或年度发布，存在明显的时间滞后性，难以实现连续、动态的监测。以美国经济分析局（Bureau of Economic Analysis）公布的 GDP 数据为例，通常滞后一个季度甚至更长时间，导致政策响应和投资决策存在显著时滞，这种延迟使政策制定与投资行为难以及时对接快速变化的经济现实(Manski, 2015)。例如，在政策层面，政府对实时经济活动的监测、货币当局对基准利率的调整等，都依赖于传统经济数据。落后的数据可能使得财政刺激政策的出台和落地无法与实际冲击同步，错过部分关键的干预窗口。在微观市场层面，机构投资者依据过时数据进行资产配置，可能放大市场波动。这种信息时滞不仅加剧市场信息不对称，更可能引发"数据追认"效应，导致决策链条的负反馈循环。

其次，传统数据颗粒度不足，区域经济统计往往以省级或国家级数据为主，难以捕捉地级市、产业园区甚至街区层面的微观动态。多数国家的官方经济数据发布单位以省、州一级为基本统计单位，地级市、县域乃至更小空间单元的数据往往缺乏系统性公开与高频更新（Glaeser et al., 2017）。这对需要在微观空间单元内部署政策的情形尤为不利，如针对产业园区、开发区等特定区域的财政扶持、环境监管或招商引资策略，若缺乏细粒度经济数据支持，政策执行便可能出现“错位”或“滞后”现象。这种区域经济颗粒度不足的局限性在发展中国家表现尤为突出，在《Science》发表的研究中指出，传统的贫困数据往往缺乏时效性和空间细节，限制了政策干预的有效性（Jean et al., 2016）。

最后，传统数据采集往往依赖人工实地调查与逐级上报机制，易受到主观因素干扰，存在数据遗漏、误报或人为操纵的风险，难以全面、真实地反映经济活

动全貌，有数据失真风险。一方面，由于传统调查统计往往依赖企业或地方政府上报数据，存在一定的主观性和操作空间，容易受到瞒报、漏报或夸大等行为影响。Jones (2005) 指出，部分新兴市场经济体可能存在系统性数据失真的问题，这不仅影响数据的真实性，也削弱了政策制定的科学性与有效性。另一方面，传统统计方法难以覆盖灰色经济、临时就业、灵活用工等非标准经济活动形态。例如，美国劳工统计局在疫情期间曾多次修正其失业率数据，并承认初期统计方法未能准确覆盖部分被误分类为“离岗未就业”的人群，从而低估了真实失业水平 (US Bureau of Labor Statistics, 2020)。

总体而言，传统数据在现代金融体系中的出现适应性瓶颈，其时效性、覆盖范围与真实性方面的局限性逐渐暴露，这也促使研究者与机构寻求更具实时性、客观性的信息来源。

● 卫星数据优点：

为了克服传统数据获取方法在时效性、空间覆盖和数据质量方面的固有限制，遥感技术作为一种远距离、非接触式的对地观测手段逐渐兴起。自 20 世纪 60 年代以来，遥感技术通过感知地表反射或发射的电磁波，实现了对地表自然和人文活动的高效感知 (赵英时, 2013)。其中，卫星遥感技术作为遥感的重要分支，凭借宏观、动态、广覆盖等优势，为实现大尺度、动态连续的地表观测提供了独特的多维视角和重要技术手段，在环境监测、农业评估、城市扩张等场景中表现出强大能力 (冯筠等, 2001)。

卫星遥感技术的一大显著优势在于其高时间分辨率和强重访能力。这种技术能够在短时间内对同一区域进行多次观测，从而极大提升数据的时效性 (赵忠明等, 2021)。相较于传统经济统计数据常以季度或年度为周期，遥感数据如夜间灯光影像则可实现每日甚至更高频次的更新，显著提高了经济活动的动态追踪能力 (Chen & Nordhaus, 2011)。得益于此，卫星遥感技术使研究者得以系统、连续地监测地表要素的变化过程，能够为实时经济监测与快速响应提供重要支持。

此外，卫星遥感技术还具备宏观空间覆盖的独特能力。卫星遥感数据具有视

域广、观测范围大的特点，能够对广阔区域进行同步快速观测，有效克服了传统地面调查在覆盖范围、实施复杂性以及工作量上的局限性(McCoy, 2005)。这种跨地理、跨行政边界的大尺度信息获取方式，有效克服了传统地面调查方法在覆盖范围、实施复杂性以及人力成本方面的瓶颈。尤其在数据匮乏或信息屏蔽严重的地区，如撒哈拉以南非洲或偏远乡村区域，遥感数据已成为监测经济活动和灾害影响的重要工具，其广覆盖的能力显著拓展了研究的边界（Donaldson & Storeygard, 2016）。

遥感数据源自传感器自动记录，具备天然的客观性与防篡改性，避免了人为干预所带来的数据失真问题。例如，卫星数据可用于核实企业供销数据的真伪，或者对农民作物收成、矿山储量等进行有效评估，提供可信的风险洞察(Benami et al., 2021)。在金融和风险管理中，卫星遥感能够提供中立、定量、全面的数据，提升投资分析和信用评估的准确性，有助于更客观、科学地分析全球经济活动现状。

随着遥感技术的不断演进，其数据结构也在逐步走向多模态融合。当前主流遥感系统已能够整合光学影像（如 Landsat）与合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）等多源传感器所采集的信息，通过融合不同波段、成像方式与时间参数的观测结果，显著提高了对农业产出、城市建设、交通流量等多维经济现象的探测精度（You et al., 2017）。此外，在标准化参数设定的支持下，即便数据来源多样，依然可以实现信息获取的一致性与可比性（Zhu et al., 2018）。这种结构性一致为长时间序列追踪与跨区域比较研究奠定了坚实基础，有效减少了分析误差，进一步保障了数据驱动决策的稳定性与可靠性。

综上所述，卫星遥感以其高频更新、广域覆盖、客观透明与多模态融合的特性，正在重塑对地信息的获取逻辑，突破了传统数据在时间、空间和精度上的瓶颈。这一技术的成熟不仅为环境与资源监测提供了坚实保障，也为金融经济领域创造了前所未有的观察视角，奠定了遥感数据成为金融另类数据核心组成部分的技术根基。

表 1-1 传统经济数据与卫星遥感数据特征对比

特征维度	传统经济数据	卫星遥感数据
核心优势	权威性与标准化：由官方机构发布，	客观性与时效性
更新频率	低频滞后：存在数月的天然信息延迟。	高频实时
空间颗粒度	宏观粗糙：难以捕捉微观经济单元的动态。	微观精细：可深入单个工厂和农田，实现精细化分析。
数据客观性	易受干扰：存在主观偏差、瞒报、漏报的风险。	客观独立：不受人为干预，具备天然的防篡改性。
覆盖范围	覆盖有限：难以覆盖灰色经济、非标经济活动，或数据统计体系薄弱的地区。	全球覆盖：可无差别监测全球任何角落。
主要局限性	决策时滞、政策错位、数据失真、无法全面反映真实经济活动全貌。	原始数据处理技术门槛高；光学数据易受云雨天气影响；数据解读依赖专业模型。
核心价值总结	提供宏观经济趋势的权威历史基准。	提供微观经济活动的实时客观快照，是填补传统数据盲区、创造信息优势的关键。

1.3 研究目标

本报告的核心目标在于系统探讨卫星遥感数据在经济金融分析中的科学价值，并基于现实案例为政府部门及金融机构提供可借鉴的决策框架。遥感数据作为一种新型、客观且高频率的地球观测数据，正日益成为获取经济洞察、支持宏观决策和金融分析的关键工具。它通过太空视角持续监测地表活动和环境变化，为传统数据提供了有益补充和交叉验证，进而提升了经济监测、评估和预测的准确性与及时性。本报告通过梳理和总结卫星遥感数据在宏观、中观、微观经济监测与决策中的主要应用场景，分析其技术特点、核心机制以及发展潜力，并为政府和行业提出相关可行性建议。

二、卫星遥感数据总图景

2.1 卫星运行轨道

表 2-1 卫星轨道分类总结

轨道区域	高度	轨道类型	核心特征	代表性应用/卫星
低地球轨道	< 1200 km	太阳同步轨道 (SSO)	光照条件一致，分辨率高	高分辨率遥感 (Landsat, Sentinel)
		其他低轨	延迟低，可通过星座实现全球覆盖	低轨通信 (Starlink)
中地球轨道	12000 km – 36000 km	标准轨道	全球覆盖与信号强度的平衡	导航定位 (GPS, 北斗)
高地球轨道	>=36,000 km	地球静止轨道 (GEO)	相对地面静止，覆盖范围广	“中星”系列、“风云二号/四号”

卫星的轨道设计并非单纯的技术参数，而是其功能与使命的物理体现，是决定其所产生数据经济价值的顶层设计。对于金融和经济分析而言，理解一个卫星的轨道，就是理解其提供的数据在频率、精度、范围和一致性这四个核心维度上的能力边界。正是这些由轨道决定的数据特性，直接对应了不同金融场景的特定需求。轨道的重要性体现在它解答了几个关键问题。例如，卫星能以多高的频率重访特定目标，决定了其数据能否满足高频交易或实时风险预警的需求；它能以多高的分辨率进行观测，决定了分析的颗粒度是宏观经济趋势还是单个企业的经营活动；它的覆盖范围是区域性还是全球性，决定了其在评估跨国供应链或全球大宗商品格局中的作用。可以说，每一种轨道都是为了实现特定观测目标而做出的系统性权衡，理解这些权衡是成功将“太空之眼”转化为金融市场信息优势的

前提。

卫星轨道的分类遵循一个清晰的层级逻辑。首先，最基础的划分依据是其距离地面的高度，这决定了卫星的飞行速度和覆盖范围，并由此形成了低、中、高三大基础轨道区域。其次，在这些确定的高度区域内，通过对轨道倾角等参数的精密设计，可以进一步赋予卫星与地球或太阳之间独特的同步或静止关系，以满足特定的任务需求。本章将循着这一“先高度，后功能”的逻辑，对这些关键轨道进行阐述。

将地球附近的太空想象成三个同心圆区域，由近及远分别是：

(1) 低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO)

最内层的是低地球轨道，通常指高度在 **200 - 1200 公里** 的圆轨道。该轨道中的卫星距离地球最近，卫星飞行速度最快。这使得它能够提供最高分辨率的对地观测影像，并且数据传输延迟极低。这是绝大多数遥感卫星和大型通信星座的首选区域。

✧ 太阳同步轨道 (Sun-synchronous Orbit, SSO)

确定高度后，根据与地球之间的夹角关系，低地球轨道高度还存在太阳同步轨道，其是一种特殊的、倾角接近 90 度的低地球轨道（LEO）。它能确保卫星每天都在相同的当地太阳时飞越地球上的任何一个地点，为地球观测提供完全一致的光照条件，便于进行高精度的变化检测。因此，几乎所有知名的光学遥感卫星，如美国的 Landsat 系列和欧洲的 Sentinel-2，都运行在这条轨道上。

(2) 中地球轨道 (Medium Earth Orbit, MEO)

中层是高度介于低轨与高轨之间的中地球轨道，通常指高度在 **1200 - 36000 公里** 之间的圆轨道。该轨道上的卫星在覆盖范围和信号延迟之间取得了很好的平衡。单颗卫星覆盖范围远超低轨卫星，信号延迟远小于高轨卫星，因此仅需数十颗卫星即可实现全球连续覆盖。主要为全球导航卫星系统（GNSS）所使用，我

们所熟知的 GPS 和北斗星座就运行其中。

(3) 高地球轨道 (High Earth Orbit, HEO)

最外层是高地球轨道，指的是高度约为 **36000 公里** 的圆轨道。这里的物理特性允许卫星的飞行周期与地球自转周期保持同步，这类轨道统称为**地球同步轨道 (Geosynchronous Orbit, GEO)**。在此轨道上，卫星的运行周期与地球自转周期完全相同（约 23 小时 56 分 4 秒）。从地面上看，卫星每天都会在同一时间回到天空中的同一点。如果轨道存在倾角，它在一天内会从地面观察者的视角画出一个“8”字形轨迹，因此可以实现对地面固定区域的周期性、可预测的覆盖。

✧ 地球静止轨道 (Geostationary Orbit, GEO/GSO)

在高地球轨道上，存在一个地球同步轨道带，在这个带上运行的所有卫星，其环绕地球一周的时间都恰好是 24 小时。它不仅周期与地球同步，而且其轨道倾角为 0 度，正好位于赤道的正上方。周期同步与赤道正上这两个条件叠加，使得这条轨道上的卫星从地面上看是完全静止不动的，因此能够实现对地球上某一固定区域的 24 小时不间断通信或观测。所有通信广播卫星（如中国的“中星”系列、国际通信卫星组织的 Intelsat）和区域气象卫星（如中国的“风云二号/四号”、美国的 GOES 系列）都运行在这条“黄金轨道”上。

2.2 卫星类型及功能介绍

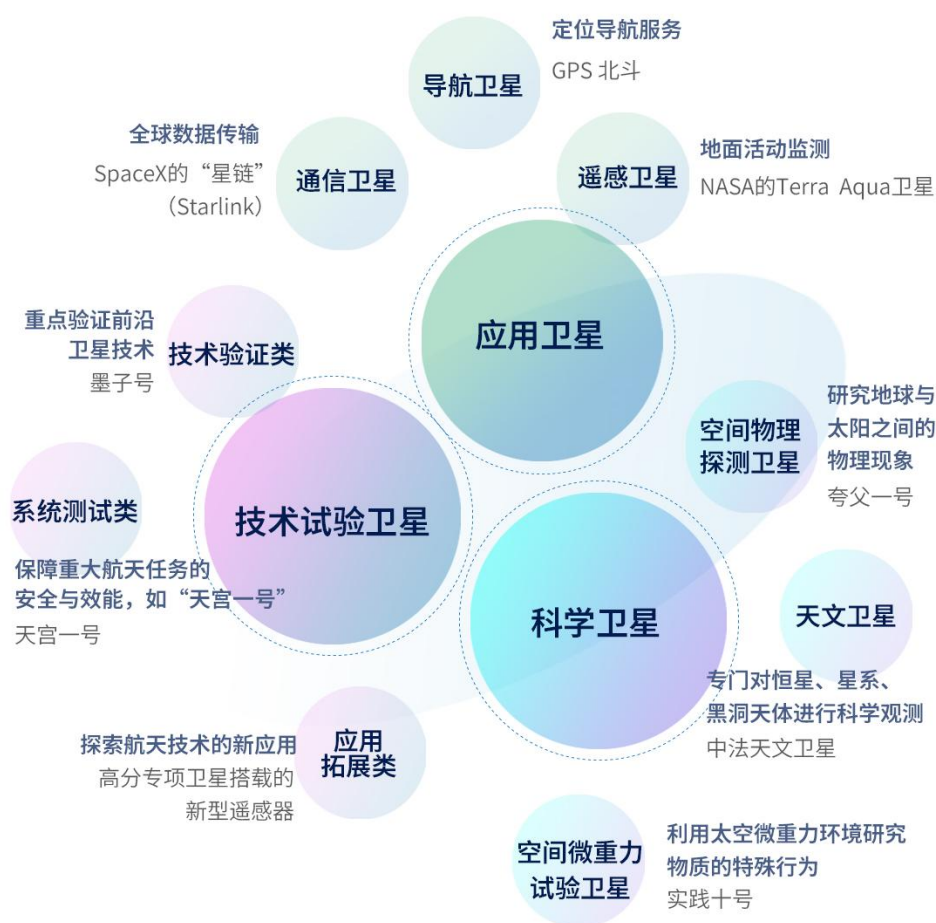
在卫星遥感系统中，**卫星平台与传感器**构成了一种互为依存、协同工作的核心关系。卫星平台是承载和保障系统运行的“太空基座”，而传感器则是实现特定观测任务的“核心眼睛”。二者共同构成一个完整的空间对地观测系统。在设计一颗遥感卫星时，需要根据传感器的任务需求来匹配相应的平台能力；反之，平台的技术边界也约束了传感器性能的上限。这种紧密的耦合关系是现代遥感卫星系统设计的核心（Kramer & Cracknell, 2008）。

基于这种协同关系，本报告接下来将分别从“**卫星平台**”与“**传感器**”两个维度，对所使用的遥感数据进行系统性介绍。

2.2.1 卫星类型

根据卫星的主要功能和任务目标，国家航天局将卫星分为应用卫星、科学卫星、技术实验卫星三大类（总结见表 2-1）。以下将详细讲述三类卫星。

图 2-1 卫星类型总结



2.2.1.1 应用卫星

应用卫星是直接服务于国民经济、军事和文化教育等人类社会生产生活的各类人造地球卫星的通称，具备明确的实用性功能，广泛应用于遥感观测、信息通信和导航定位等关键领域(昂海松等，2015)。与科学实验类卫星或技术验证类卫星相比，应用卫星的任务更具现实指向性，其价值主要体现在支撑社会运行效率、提升产业智能化水平和保障国家基础设施安全等方面。在功能特征上，应用卫星通常具有任务目标高度明确、技术成熟度高、运行周期长、系统集成度强等特点。

随着卫星技术与大数据、人工智能等新一代信息技术融合发展，其应用体系已逐步形成“空间段-地面段-用户段”的完整服务链。空间段主要指搭载任务载荷的卫星本体，地面段包括接收站、测控中心及数据处理平台，用户段则涵盖政府、科研机构、企业和公众等多元使用主体 (Pelton et al., 2017)。这种三段式架构使得应用卫星系统具有高度的稳定性与可扩展性，能够支撑大范围、高频次的获取与信息传输。

近年来，随着应用需求多样化和发射成本优化的趋势，应用卫星的体系也呈现出模块化、小型化、智能化的发展趋势。一方面，传统大型遥感卫星正在向更高分辨率、更高回访频率演进；另一方面，新一代应用卫星具备低成本、高灵活性的优势，正在迅速拓展地理信息获取、应急响应、海洋监测等领域的边界，展现出显著的经济价值 (梁顺林等, 2020)。从小型微纳卫星平台 (如英国萨里空间中心开发的微小卫星 bus)，到支持 10,000 公斤级通信卫星的重型平台 (如用于 Ariane 5 火箭发射的大型地球同步通信卫星)，应用卫星平台体系呈现“多规格、标准化、任务可定制”的发展路径，其作为空间信息基础设施的核心组成，正日益成为连接空间资源与地面经济社会活动的关键纽带。

应用卫星作为宏微观经济活动监测的关键工具，已被广泛应用于金融经济领域的数据采集与分析。根据其功能和服务领域的不同，应用卫星可细分为遥感卫星、通信卫星和导航卫星三大类别。这些卫星系统通过提供高频率、高分辨率的数据，支持经济活动的实时监测、政策评估和市场预测等多种应用。

应用卫星是执行监测宏微观经济生产活动任务的主力，根据其具体功能和服务领域的不同，可以进一步细分为遥感卫星、通信卫星、导航卫星三大类别。

(1) 遥感卫星

遥感 (Remote Sensing) 是一门在不直接接触目标的情况下，通过电磁波获取并解析其信息的科学 (赵英时, 2013)。作为应用卫星的核心组成，遥感卫星搭载多光谱、热红外、雷达等传感器，通过接收地物反射或发射的信号，对地球表面、大气及水体进行非接触式探测与信息采集 (Kansakar & Hossain, 2016)。这些

卫星能够提供大范围、多周期、多分辨率的观测数据，经过专业的辐射与几何校正后，成为现代社会获取空间信息的关键手段 (Roy et al., 2017)。

遥感卫星的应用已深度融入经济社会发展的各个领域，尤其在宏观监测与管理方面发挥着不可替代的作用。

- **经济活动监测：**遥感卫星为经济监测提供了实时、客观的新视角。其中，夜间灯光数据因其亮度与 GDP 增长、工业用电量等指标高度相关，已成为衡量区域经济活力和基础设施建设水平的重要参考，尤其适用于官方统计数据质量有限的发展中国家 (Henderson et al., 2012)。此外，遥感图像还被用于监测港口拥堵与交通流量，为全球供应链风险管理提供决策依据 (Donaldson & Storeygard, 2016)。
- **资源与环境监测：**在自然资源领域，多光谱与高光谱遥感可用于矿产勘查、水资源评估和森林覆盖分析，精准识别地表物质与植被的细微差异 (Gupta, 2017)。在环境监测方面，遥感卫星能动态监控空气污染、水体富营养化、冰川退缩等问题。例如，NASA 的 Terra 和 Aqua 卫星是全球气候变化研究的重要数据源 (王正兴等, 2003)，而中国的环境减灾二号 (HJ-2) 卫星则在水污染监测与森林防火等任务中扮演关键角色。
- **农业管理与金融：**遥感技术是现代精细农业的基石，可实现作物面积识别、长势评估、旱情预警和病虫害监测。欧盟 Copernicus 计划的 Sentinel-2 卫星数据，已广泛用于指导精准灌溉与施肥，提升粮食产量管理水平 (Veloso et al., 2017)。在农业金融领域，结合遥感影像的植被指数 (NDVI) 可用于预测作物产量与价格趋势，为农业保险和期货市场决策提供数据支持 (Lobell et al., 2015)。
- **灾害应急响应：**遥感卫星凭借其快速响应能力，可在灾后第一时间评估受灾范围与损失程度，并持续追踪重建进展，为宏观调控与公共资源的高效调度提供有力支撑 (Skakun S et al., 2014)。

这些应用充分证明了遥感卫星在提升经济社会治理时效性与空间覆盖度方面

的巨大战略价值。

(2) 通信卫星

通信卫星是构建全球信息网络的关键基础设施，通过在不同轨道（GEO/MEO/LEO）上运行的无线电中继站，实现全球范围内的语音、数据和视频传输。自 1965 年首颗商用卫星发射以来，通信卫星已从单一语音服务发展为支撑广播电视、宽带互联网、远程及应急通信的核心平台。

通信卫星的核心优势在于其广阔的覆盖范围、高带宽和高时效性，使其在多个领域发挥着不可替代的作用：

- 广播电视领域：地球同步轨道（GEO）卫星，如中国的“中星”系列，是实现国家级电视信号覆盖、提供稳定多频道服务的关键媒介。
- 互联网接入领域：以 SpaceX 的“星链”（Starlink）为代表的低轨（LEO）卫星星座，正为传统网络难以覆盖的偏远地区、海洋和空中交通工具提供高速互联网服务，有效弥合“数字鸿沟”。
- 应急与特殊通信：在自然灾害或战争等导致地面设施瘫痪的极端情况下，卫星通信是保障指挥救援、维持社会运转的生命线。同时，它也为远洋航行、极地科考等特殊活动提供唯一可靠的通信手段。

当前，随着“鸿雁”、“柯伊伯计划”（Project Kuiper）等新一代低轨卫星星座的加速部署，全球通信卫星产业正迈向多轨融合、智能调度的新阶段。未来，卫星通信与 5G/6G 网络的深度融合，将构建一个无缝覆盖的“天地一体化”通信体系。

(4) 导航卫星 (Navigation Satellites)

全球导航卫星系统（GNSS）为全球用户提供全天候、高精度的定位、导航与授时（PNT）服务。目前全球主要有四大系统：美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 Galileo 和中国的北斗（BDS），它们共同构成了现代社会不可或缺的空信息基础。

导航卫星的应用已深度融入经济社会发展的各个方面：

- 交通运输：从个人车辆导航到智能交通系统（ITS）中的车辆监控与路径优化，再到航空航天精准飞行控制，GNSS 是现代交通体系的基石。
- 关键行业应用：在精准农业中，它指导自动化耕作并辅助监测土壤湿度等环境参数；在测绘、物流、电力调度等领域，提供高精度位置与时间基准。
- 金融与公共安全：GNSS 提供纳秒级的高精度授时，是金融高频交易、数据同步的重要保障。同时，中国的北斗系统还集成了短报文通信功能，在应急救援中发挥着独特作用。

总而言之，导航卫星已从单一的定位工具，演进为支撑数字经济和智能产业发展的“时空引擎”，是现代化基础设施的核心组成部分。

2.2.1.2 科学卫星

科学卫星是用于科学探测和研究的人造地球卫星 (赵志明等, 2021)。其核心任务是利用搭载的科学仪器，收集来自地球大气层、磁场、太阳辐射、宇宙射线及各类天体的空间信息，为基础科学发展和航天、通信等应用领域提供支持。

科学卫星主要分为三类：

- 空间物理探测卫星：研究地球与太阳之间的物理现象，如地球辐射带与磁层 (Allen et al., 2020)。
- 天文卫星：专门对恒星、星系、黑洞等天体进行科学观测 (Guo et al., 2019)。
- 空间微重力试验卫星：利用太空微重力环境研究物质的特殊行为 (马驰原等, 2021)。

随着技术进步，科学卫星的探测能力与轨道设计均实现飞跃。现代天文卫星的观测距离和分辨率已大幅提高 (Zeng, 2025)，轨道设计也从传统的低地球轨道 (LEO) 扩展至太阳同步轨道 (SSO) 等多样化选择，以满足不同探测需求 (Bai et al., 2021)。例如，中国的“天都一号”通导技术试验星成功完成了地月空间激光

测距技术试验，为深空探测提供了重要的技术支持 (Jiang et al., 2025)。

未来，科学卫星将向更高分辨率与智能化方向发展。通过集成先进设备与人工智能技术，卫星的自主数据处理与智能探测能力将显著增强 (Wei et al., 2023)。同时，构建全球科学卫星网络与开展多学科交叉研究成为重要趋势。此外，科学卫星将在空间天气预报和深空探索（如火星探测、小行星采样）中扮演更关键的角色 (Burke et al., 2021)。

2.2.1.3 技术试验卫星

技术试验卫星是专门用于新技术试验或为应用卫星进行前期技术验证的卫星 (赵志明等, 2021)。在昂贵、复杂的应用卫星发射前，利用成本相对较低的技术试验卫星在轨验证关键技术，可以有效降低风险、缩短研发周期，达到事半功倍的效果。技术试验卫星的任务可分为三类：

- 技术验证类：重点验证前沿卫星技术。例如，“济南一号”量子微纳卫星成功实现了星地密钥分发 (Vallone et.al., 2015)。
- 系统测试类：保障重大航天任务的安全与效能，如“天宫一号”目标飞行器为空间站建造验证了核心技术。
- 应用拓展类：探索航天技术的新应用。例如，高分专项卫星搭载的新型遥感器，在城市规划与农业监测等领域展现了巨大潜力 (Burke et al., 2021)。

当前，技术试验卫星的性能正通过新材料应用、智能化集成和多功能一体化获得巨大提升。例如，采用复合材料整流罩可提升任务适应性 (Domerg et al., 2024)；集成人工智能技术可实现卫星自主诊断与修复，提高运行效率 (Wang et al., 2025)；而单星集成多种试验功能则有效降低了任务成本 (Koushik et al., 2020)。

未来，航天任务将更加依赖智能化和自主化的技术试验卫星 (Asaduzzaman et al., 2025)。这些卫星将与人工智能、大数据等新兴技术深度融合 (Bai et al., 2021)，并为火星探测、小行星采样等深空任务提供通信中继、导航等关键支持

(Gui et al., 2025)。

2.2.2 传感器类型

搭载于应用卫星中的遥感传感器是获取卫星遥感数据的关键部件。为使读者更深入全面理解卫星遥感数据，本小节将对遥感传感器进行分类介绍，内容涵盖主要传感器的观测能力指标(如空间分辨率、光谱穿透力、重访周期等)，通过实际案例和图表，帮助读者直观理解遥感数据在政策制定与投资决策中的意义。传感器类型总结请见表 2-3。

表 2-3 卫星传感器类型及其典型应用场景总结

传感器	功能	典型卫星	典型应用场景
可见光传感器 (Visible Sensor, VIS)	探测 0.4–0.7 μm 太阳反射光；昼间自然彩色成像，夜间可用 DNB 观测人造光	VIIRS(SNPP)、Landsat 8 OLI	城市扩张、零售停车场统计、夜间经济活动
红外传感器 (Infrared Sensor, IR)	近/短波红外反射 & 热红外自辐射成像；反演温度与水分	Landsat 8/9 TIRS、Sentinel-3 SLSTR、MODIS	工业炉温监测、作物水分/干旱评估
紫外传感器 (Ultraviolet Sensor, UV)	利用紫外吸收测大气臭氧、NO ₂ 等痕量气体	Aura OMI、Sentinel-5P TROPOMI、GF-5 EMI	空气污染追踪、疫情/封锁期间经济活跃度评估
多光谱传感器 (Multispectral Imager, MSI)	10+ 离散波段成像；计算植被/水体指数、地物分类	Sentinel-2 MSI、Landsat OLI	耕地变化、城市化率监测、湖库水位

高光谱传感器 (Hyperspectral Imager, HSI)	上百窄波段连续光谱；识别物质成分	PRISMA、GF-5 AHSI	找矿蚀变带制图、病虫害早期诊断
星载激光雷达 (Spaceborne LiDAR)	激光点云获取三维结构；估算高度/生物量	GEDI(ISS)	森林碳储量、城市建筑三维建模
激光高度计(Laser Altimeter)	沿轨垂直测距，厘米级高程	ICESat-2 ATLAS	极地海冰厚度、湖泊/水库水位
多频微波成像辐射计(Multi-frequency Microwave Radiometer)	6-89 GHz 亮温；海面风、降水、海冰	AMSR-2(GCOM-W)、GMI(GPM)	台风结构透视、北极航道冰情、全球降雨
L 波段土壤湿度辐射计(L-band Soil Moisture Radiometer)	1.4 GHz 亮温；5 cm 表层土壤湿度	SMAP	干旱/洪涝预警、农情产量预测
微波大气探空仪 (Microwave Atmospheric Sounder)	50-60 GHz / 183 GHz 垂直温湿廓线	AMSU-A/B、ATMS	数值天气预报骨干数据、台风路径预报
合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR)	主动微波成像；米级分辨率、InSAR 形变	Sentinel-1、RADARSAT-2、TerraSAR-X	城市沉降、滑坡监测、洪水淹没制图
散射计 (Scatterometer)	多角度 Ku/C 波段；反演 10 m 海面风矢量	QuikSCAT Seasat、MetOp ASCAT、HY-2B	航运航线优化、台风实时风场
雷达高度计(Radar Altimeter)	Ku/C 双频正下测距；厘米级海平面	TOPEX/Poseidon、Jason-3、Sentinel-6	全球海平面上升、波高与港口设计

温室气体光谱仪 (Greenhouse Gas Spectrometer, GHG)	0.76/1.61/2.06 μm 高光谱; CO_2/CH_4 柱浓度	OCO-2、TanSat	碳排放核查、碳交易基线、排放异常溯源
臭氧/痕量气体监测仪(Ozone & Trace Gas Monitor)	270–500 nm UV-VIS; $\text{O}_3/\text{NO}_2/\text{SO}_2$	Aura OMI、Sentinel-5P TROPOMI	臭氧层恢复评估、城市 NO_2 周末效应
气溶胶多通道成像仪(Aerosol Multi-channel Imager)	可见-红外多波段; AOD & 颗粒类型	MODIS(Terra/Aqua)	$\text{PM}_{2.5}$ 趋势、沙尘传输、健康风险评估

2.2.2.1 被动光学传感器 (Passive Optical Sensors)

被动光学遥感是通过卫星传感器接收地物反射的太阳光或自身辐射的热红外能量来获取信息的技术。这类传感器覆盖从紫外、可见光到红外的电磁波段，能够在不干扰地面目标的情况下连续观测大范围区域。主要的被动光学遥感传感器包括单光谱传感器(可见光、红外、紫外)、多光谱传感器(MSI)和高光谱传感器(HSI)(Sun et al., 2017)。

单光谱传感器

单光谱传感器是指每次观测仅使用一个光谱波段成像的传感器。这类传感器通常针对特定波段进行优化，用于探测特定目标或现象。按照光谱波段的不同，我们将单光谱传感器分为可见光、红外和紫外三类(Jensen, 2007)，并分别介绍。

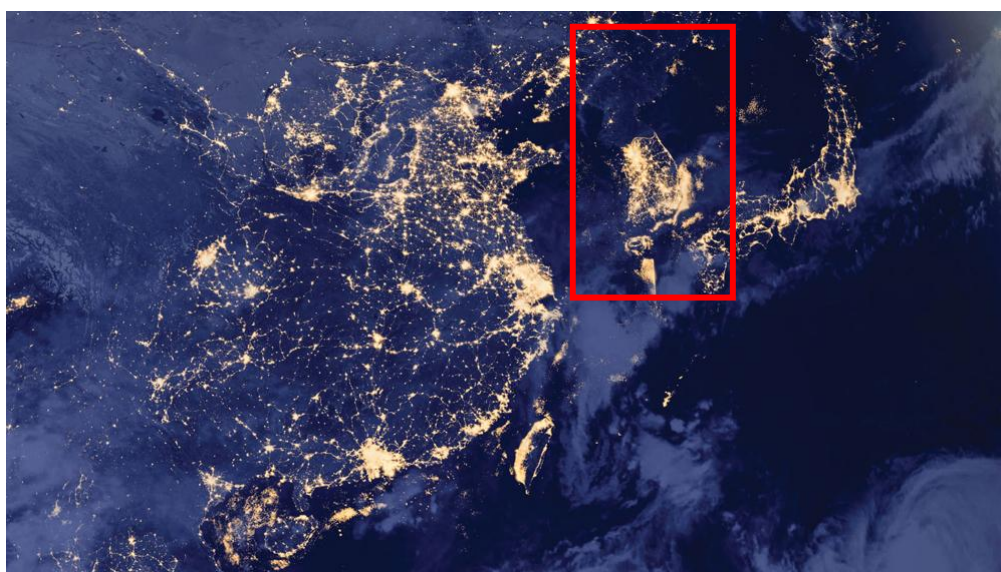
可见光传感器(VIS)

可见光传感器的工作范围约为 0.4–0.7 微米，与人眼视觉相符。大部分可见光传感器在白天工作：它通过探测太阳光在地表的反射来成像，可产生逼真的自

然彩色或黑白图像,直观展现地表形态与人类活动特征,广泛用于监测城市建筑、道路、植被覆盖等(NASA, 2014)。部分卫星还配备高灵敏度的可见光传感器用于夜间成像,例如可见光红外成像辐射仪(VIIRS)传感器的昼夜波段(Day/Night Band, DNB),能在微光条件下探测城市灯光、渔船灯等夜间人造光源(Kalb et al., 2023),实现全球夜间经济活动“点灯”地图,直观展示人类夜间活动的分布及强度。

如图 2-1 所示,从东亚地区夜间灯光卫星图像可见人口与经济活动密集区在夜间发出大量光亮。例如,图中(红框标注)朝鲜半岛南部的韩国灯光繁密,而北部的朝鲜大部漆黑(仅平壤有少许亮点),直观反映了区域间经济活力的巨大差异。

图 2-1 东亚地区夜间灯光卫星图像



图片来源: IMF

夜间灯光数据已被广泛用作经济活动的代理变量。研究表明,卫星观测的夜间灯光亮度与人口密度、地区生产总值(GDP)等经济社会指标高度相关(Su & Jia, 2023),因此也被作为宏观经济繁荣程度的替代测度。对于缺乏及时可靠统计数据地区,夜灯光数据可以帮助经济学家评估区域经济增长、能源消耗和贫困分布——灯光变亮往往意味着工厂复工、用电增加,经济活动在增强,反

之亦然。此外，可见光影像在白天也支持许多微观经济分析，例如金融机构通过高分辨率卫星照片统计零售商店停车场的车辆数量来推算销售业绩，分析企业厂区的库存堆场、建设进度等，从而提前获知企业运营状况。这种基于可见光遥感的“另类数据”如今成为对冲基金等获取超额收益的重要手段 (Counts, 2019)。

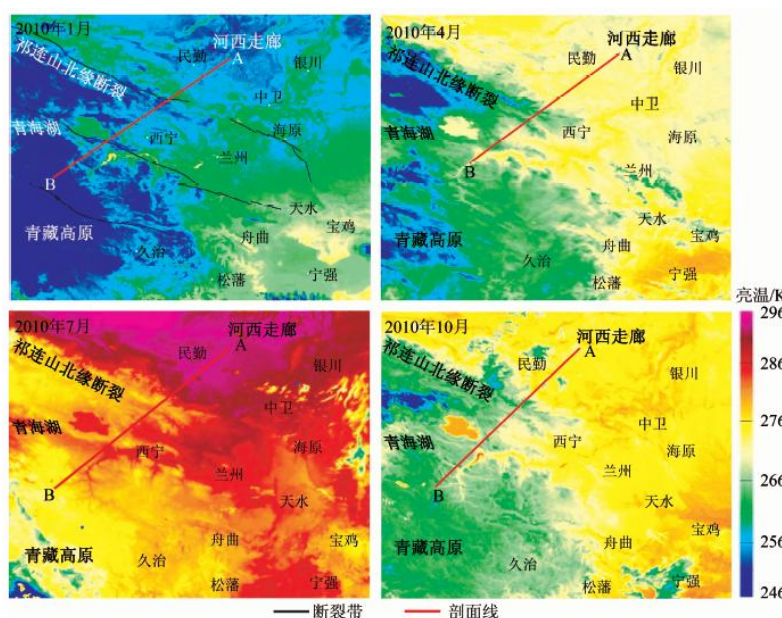
红外传感器(IR)

红外传感器涵盖近红外(NIR)、短波红外(SWIR)和热红外(TIR)等子类型(Jensen, 2007)。近红外/短波红外波段大致在 0.7–2.5 微米范围，主要探测太阳反射的中长波光(Edmund Optics)；而热红外波段通常位于 8–14 微米范围，属于大气窗口区，大气对该波段的吸收较弱。地物在该波段会持续释放因自身温度产生的红外辐射，TIR 传感器则通过探测这种辐射反演地表或目标的温度信息(Li et al., 2013)。简言之，近红外/短波红外反映“反射的光”，热红外反映“发出的热”。近红外传感器在白天工作，与可见光协同区分地表材料(如植被对近红外有强烈反射，因此在近红外影像中显得格外明亮，常见于量化植物的生长状况和覆盖度、监测作物和土壤湿润程度、识别植被健康与干旱胁迫。而热红外传感器则可昼夜工作，夜间利用地表散热成像，捕捉温度分布，不受可见光条件限制(Njambi, 2023)。因此可用于远程识别工厂运行状态、排放热量和产能利用，例如冶炼厂高炉温度升高将在图像中显现为强热源；而工厂停产时高温区将明显减弱，这为决策者提供了非接触式、全天候的工业活动监测手段。

许多常规的对地观测卫星都携带红外波段传感器。例如，美国 Landsat 8/9 的 TIRS 热红外传感器专门提供地表温度影像；欧洲 Sentinel-3 具备海陆温度仪(SLSTR)，双视角监测地表和海表温度(Coppo et al., 2010)；NASA 的 MODIS 和 VIIRS 等传感器也有多个中红外和热红外通道，可用于火点和温度监测。此外，新一代商业卫星开始专注高分辨率热成像，如英国 2023 年发射的 HotSat-1，可在数米级分辨率获取城市和工业设施的热红外图像(SatVu, 2023)。图 2-2 展示了 2010 年 1 月、4 月、7 月和 10 月祁连山及周边地区的热红外亮温分布，用于反

映地表温度的季节变化。图中红线为剖面线,黑线为断裂带。亮温越高颜色越红,反映气温越高,有助于分析植被生长环境和生态变化。

图 2-2 祁连山 2010 年 4 个月份的红外亮温背景场



图片来源: Wen, S., Qu, C., Shan, X., Yan, L., & Song, D. (2013). Satellite thermal infrared background field variation characteristics of the Qilian Mountains and the Capital Zone. *Remote Sensing for Land & Resources*, 25(3), 138–144.

红外遥感在经济金融领域的应用主要体现在工业与农业两方面。热红外遥感可用于监测炼油厂、钢厂等的炉温变化,判断产量波动和设备检修情况。例如一项权威研究中, Xue et al., (2025) 发现工厂热辐射值能够精准预测企业未来盈利表现。此外, Han et al., (2023) 通过发电厂冷却水温变化推测负荷状态,为大宗商品和能源市场提供先行指标。近红外遥感还能通过植被指数(如 NDVI)监测农作物长势与产量,广泛应用于农情预报和期货市场分析,可用于森林碳汇、水资源状况等环境经济评估 (Johnson et al., 2021)。

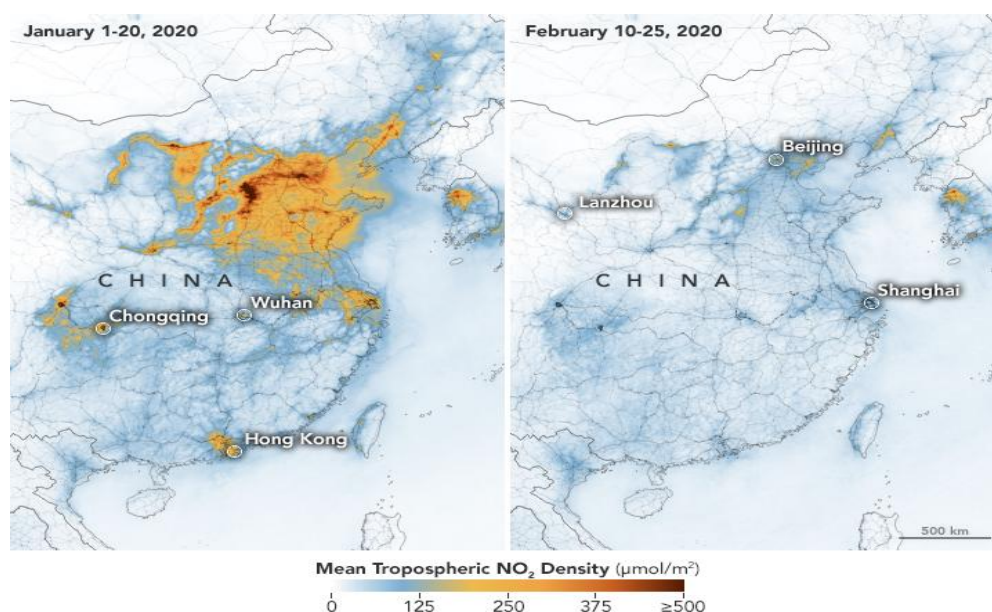
紫外传感器(UV)

紫外传感器在大约 0.3 微米以下的紫外波段工作。来自太阳的短波紫外辐射大部分被地球大气所吸收,尤其是臭氧对 UV 有强烈吸收特性(Platt & Stutz, 2008)。

因此,紫外遥感多用于大气组分探测:通过测量大气对特定紫外波长的吸收程度,反演臭氧、二氧化氮(NO_2)、二氧化硫等痕量气体的含量和分布。紫外传感器往往以光谱仪形式存在,具备一定的光谱分辨能力,可分辨气体的吸收谱线特征。例如,臭氧主要在波长约 0.25–0.3 微米范围有强吸收, NO_2 在 0.4 微米附近(延伸到可见的蓝光区)也有特征吸收(Ruiz Villena et al.,2020),这些都可以通过紫外/可见光谱探测。

用于臭氧和气体监测的卫星传感器包括美国 NASA 的臭氧监测仪器(OMI, 搭载于 Aura 卫星) (Levelt, 2006), 欧洲的 TROPOMI(搭载于哨兵 Sentinel-5P 卫星) (Veefkind, 2012), 它们都覆盖紫外和可见波段以监测对流层和平流层的大气污染物。中国高分五号卫星亦配置了环境气体监测仪,对大气中的二氧化氮、二氧化硫等进行探测(Xia et al., 2021)。紫外大气传感器能够绘制出全球或区域的大气污染气体分布图,识别污染源和传输路径。

图 2-3 中国上空 NO_2 浓度卫星遥感图(2020 年 1 月 1–20 日平均)



图片来源: NASA earth observatory

紫外遥感在经济金融领域的价值主要体现在环境与经济活动的关联分析和政策效果评估上。工业生产和交通出行越繁忙，污染物排放往往越多，NO₂浓度因此被视为经济活动的“尾气指标”。例如，疫情期间中国各地采取封锁措施后，卫星监测到上空 NO₂浓度相较往年同期大幅下降，这是经济放缓的直接体现。下面的卫星地图(图 2-3)对比了 2020 年 1 月初与 2 月中下旬中国上空 NO₂的平均浓度：可以看到疫情前华北、长三角等工业密集区(图中橙红色表示高 NO₂浓度)污染显著，而封锁期间这些地区几乎变为蓝色，意味着二氧化氮含量骤减。这种显著变化印证了工厂停工、交通锐减对大气排放的影响，量化了经济活动断崖式下跌的程度。

多光谱传感器(MSI)

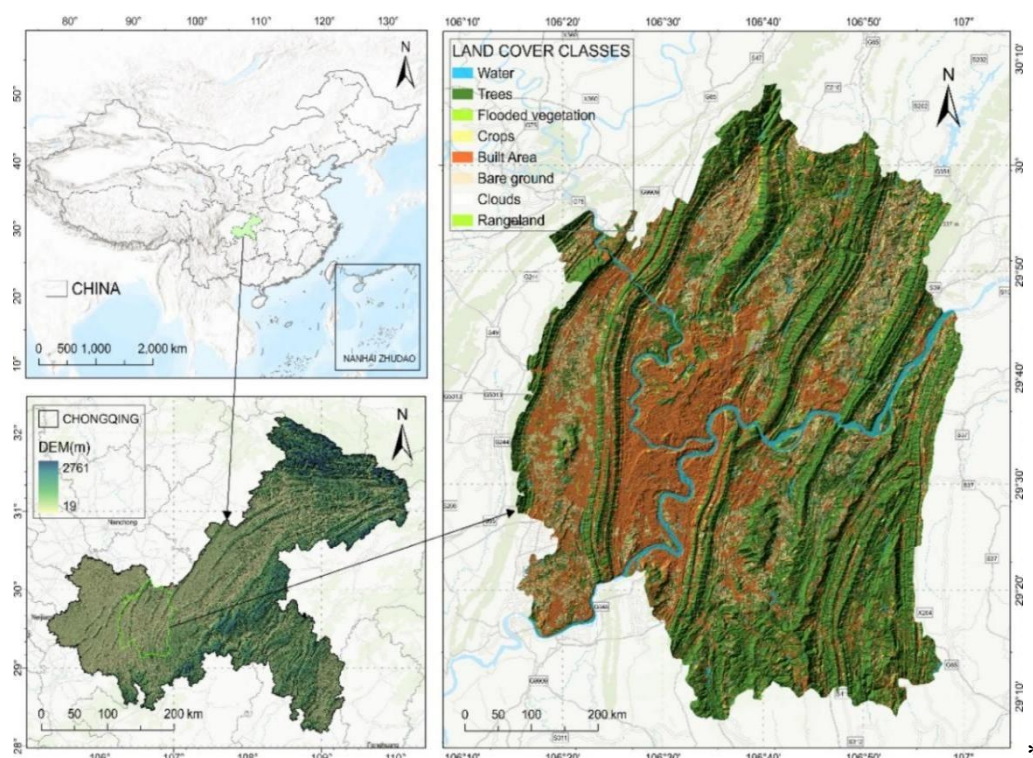
多光谱传感器能够在多达数十个离散光谱波段上同时成像。与单光谱相比，多光谱传感器覆盖可见光、近红外乃至短波红外的多个波段，每个波段具有一定宽度。例如 Landsat 8 的 OLI 传感器包含 9 个波段(覆盖蓝、绿、红、近红外、短波红外等)以及一个全色波段；欧洲 Sentinel-2 的 MSI 拥有 13 个波段(涵盖可见光到短波红外，其中包括特殊的红边波段)。多光谱数据的特点是在空间上每个像元都有一串多波段的反射率值，可综合用于计算植被指数、识别地物类型等。虽然波段光谱分辨率不如高光谱精细，但多光谱传感器在覆盖范围、时间分辨率和数据体量方面往往更具优势，非常适合大尺度连续监测(Chaves et al., 2020)。

多光谱传感器以广谱视角记录地表信息，其典型能力包括土地覆盖分类与变化监测。不同地物(城市建筑、森林、农田、水体等)在多光谱空间上形成各自的“颜色”特征组合，便于分类制图。例如利用近红外波段可以清晰地区分植被与非植被覆盖，城市建筑在可见和短波红外反射较高而植被在近红外反射高、红光反射低。由此，可对区域土地利用类型进行自动分类制图，并监测随时间的变化(如城市扩张、耕地抛荒、森林砍伐等)，为宏观经济中的城镇化率、资源利用状况评估提供数据支撑。多光谱传感器还能支持诸多环境与资源指标的遥感估算。例如利用归一化水体指数(NDWI)或短波红外-可见光的组合，可以监测湖泊、水库的

水位变化和湿地蓄水情况，服务水资源管理和水利发电调度。

图 2-4 利用 Sentinel-2 多光谱仪提供的 2017 年至 2022 年间重庆市的多时相土地利用/土地覆盖(LULC)遥感监测数据，研究区域及其土地利用类型的空间分布。在重庆的土地覆盖数据集中，主城区内的城市用地、农村住宅区以及其他建设用地是典型的不透水地表类型 (Wei et al., 2025)。

图 2-4 重庆的 Sentinel-2 不透水面分布图



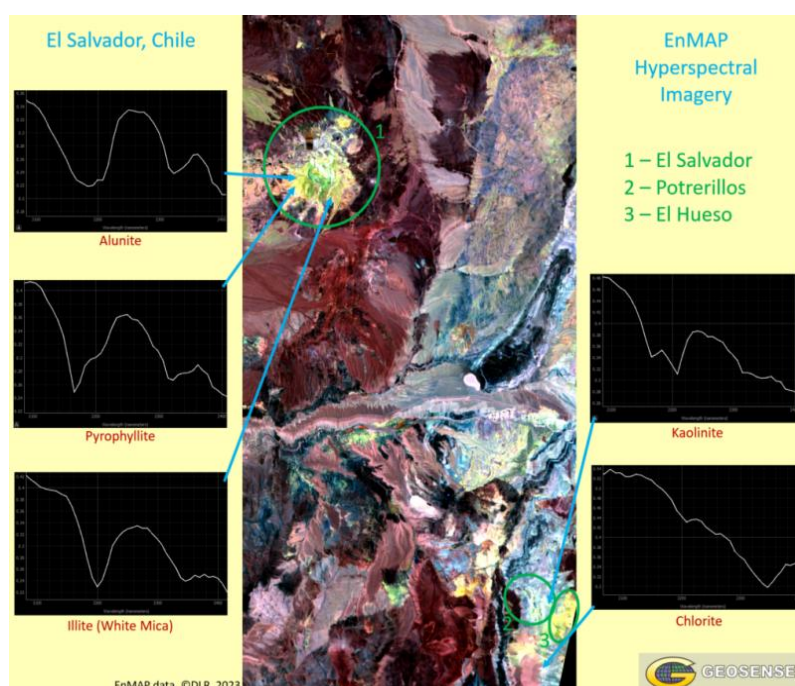
图片来源： Wei, D., Chang, Y., & Kuang, H. (2025). Extraction and spatiotemporal analysis of impervious surfaces in Chongqing based on enhanced deeplabv3+. *Scientific Reports*, 15(1).

高光谱传感器(HSI)

高光谱传感器在工作时可同时获取数十到数百个连续的窄波段光谱信息。相较于光谱的“粗采样”，高光谱实现了对可见光-红外光谱的精细描绘。典型高光谱

成像仪覆盖可见光到短波红外(约 0.4–2.5 μm)范围, 包含上百个波段, 每个波段带宽仅几纳米(Vangi et al., 2021)。例如意大利 PRISMA 卫星覆盖 400–2500nm 共 240 个波段, 中国高分五号的“先进高光谱成像仪(AHSI)”则覆盖了可见光到短波红外 60 公里宽幅、30 米分辨率的 330 个波段(Liu et al., 2020)。如此高的光谱分辨率使其能够区分许多地物材料的特征光谱, 从而实现精准识别物质组成的能力, 这是多光谱和单光谱难以企及的。

图 2-5 EnMAP 高光谱影像 智利-萨尔瓦多矿产分布



图片来源: Geosense

高光谱遥感最突出的能力就是物质成分分析, 主要体现在以下几方面:

地质矿产勘查: 高光谱数据可以通过识别矿物的光谱特征直接绘制矿物分布图。例如, 在含有羟基基团的黏土矿物(如高岭石、蒙脱石)会在 2.2 μm 左右产生特征吸收(Stack & Milliken, 2015), 高光谱影像能分辨不同类型黏土矿物及其晶体结构差异。对于金属矿藏, 高光谱可识别氧化铁染色、高温蚀变矿物组合等找矿线索。德国 EnMAP 卫星的测试表明, 它可以在区域尺度上精确映射出热液蚀变带中不同类型的黏土、铁质矿物的分布, 为早期矿产勘查提供极有价值的线索

(Bedini, 2023)。在金融上，这意味着人们可以从太空发现潜在的矿产资源：比如通过卫星高光谱图锁定一片可能蕴含铜矿的蚀变带，矿业公司据此决定投资勘探，从而影响相关公司股票和金属市场预期。上图 2-5 展示了 EnMAP 卫星获取的智利 El Salvador 地区的高光谱遥感影像，用于识别地表不同矿物的分布特征，特别是热液蚀变带中的黏土和含铁矿物。图中以彩色影像显示矿区地貌，并标注了三个典型矿区位置(El Salvador、Potrerillos、El Hueso)，左右两侧则展示了从这些区域提取出的矿物光谱反射曲线，包括明矾石(Alunite)、叶蜡石(Pyrophyllite)、白云母(Illite)、高岭土(Kaolinite)和绿泥石(Chlorite)，通过其在可见光至短波红外波段中的吸收特征对矿物类型进行精确识别。

精细农业与林业：高光谱对植物的细微差异非常敏感，可用于区分作物种类、监测作物健康和病虫害，甚至估算作物营养和品质。例如，通过分析不同作物在近红外到红边波段的反射光谱的差异，高光谱数据可以在混种田地分辨出小麦、玉米、大豆等作物的空间分布，这对农业普查和产量预测很有帮助。又如，植物遭受病虫害或养分缺乏时，光谱曲线形态会发生改变，高光谱可以在早期发现这些异常，指导农户及时采取措施。

环境污染监测：一些环境污染物可借助高光谱遥感发现。例如工矿企业排放的固体废弃物往往含有特征矿物，高光谱可以帮助识别非法倾倒的有毒矿渣；水体中的藻华和悬浮污染物也有光谱特征，虽然多光谱可粗略监测藻类，高光谱能够进一步区分藻类种类以及浓度估算。特别是在城市环境中，高光谱用于识别屋顶和地表材料，有助于评估城市热环境和面源污染。

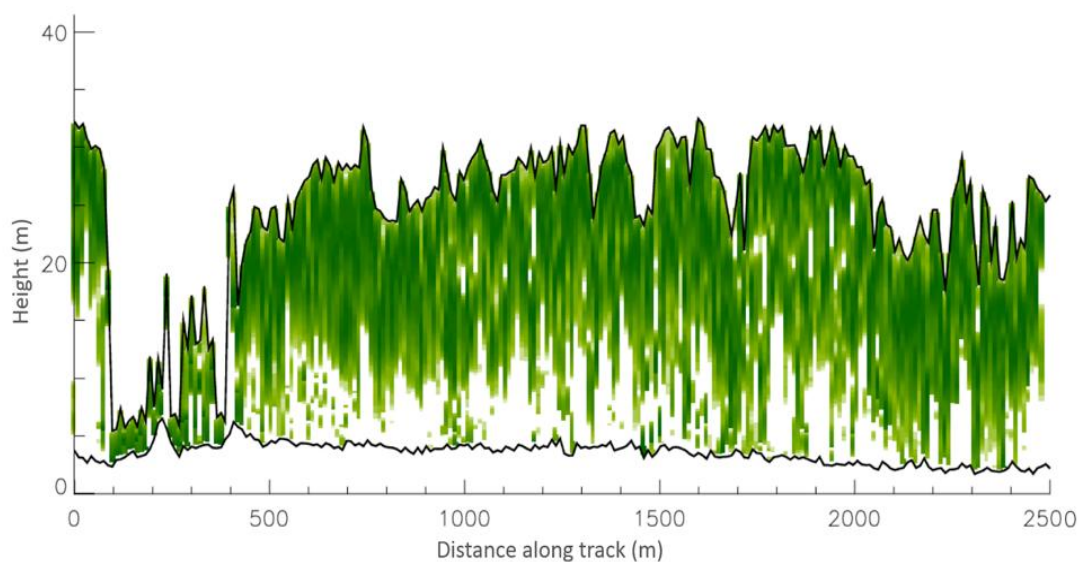
2.2.2.2 主动光学传感器 (Active Optical Sensors)

不同于被动光学传感器，卫星搭载的主动光学传感器不依赖阳光，而是通过主动发射激光并接收回波来测量目标特征，具有穿透一定介质和获取高精度三维信息的能力。其主要类型包括星载激光雷达和激光高度计。

星载激光雷达(Spaceborne LiDAR)

专指卫星搭载的激光雷达，通过发射激光脉冲并接收其返回信号来精确测量目标的距离、形状等信息。星载激光雷达被广泛应用于地球环境与资源监测。在生态与气候研究中，其可获取地表高程与植被垂直结构信息，用于估算森林生物量、碳储量与生态系统变化(Jiang et al.,2022)；在地形测绘方面，激光雷达可穿透稀疏植被，提供精确的数字高程模型(DEM)(Bigdeli et al.,2018)，为水文模拟、土地利用规划和自然灾害评估提供数据支撑；在城市与基础设施管理中，三维点云数据有助于建筑物建模、交通网络分析及风险监测；此外，激光雷达也应用于考古调查、极地冰盖厚度监测以及海面高度测量(Vinci et al.,2024)，展现出在多学科领域的综合价值。表 2-2 总结了星载激光雷达的用途。NASA 的 GEDI 是最具有代表性的激光雷达系统，图 2-6 展示了其沿轨道激光回波能量显示植被的垂直分布图。

图 2-6 GEDI 沿轨道激光回波能量显示植被的垂直分布图



图片来源：GEDI

表 2-2 星载激光雷达应用领域一览

应用领域	用途	意义
森林	森林高度、结构、生物量	碳监测、生态评估
地形	地表高程测量	构建 DEM、防灾
冰川	冰盖厚度、流动变化	海平面监测
水体	湖泊水位	水文模型、干旱预警
城市	建筑物结构	三维建模
农业生态	作物高度、植被结构	精准农业、生态建模

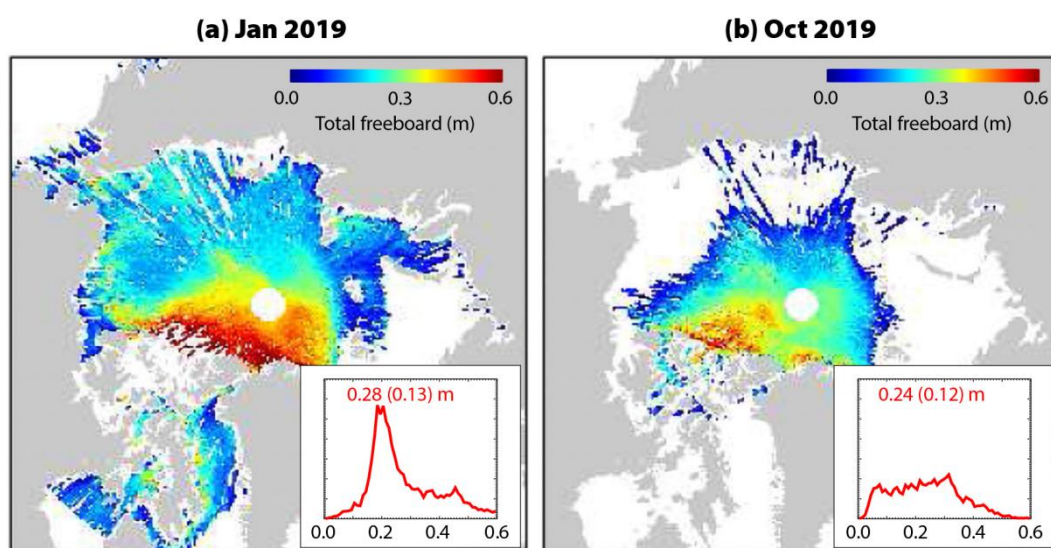
激光高度计(Laser Altimeter)

激光高度计是发射单一方向的脉冲(点对点测距)，专精于测量地表高度变化的 LiDAR。例如，美国 NASA 的 ICESat-2 卫星搭载 ATLAS 激光高度计，每秒发射上万束激光脉冲，测定冰盖、海冰、陆地表面的高度，精度可达厘米量级(NASA, 2018)。激光高度计的应用领域与星载激光雷达类似，可以用于监测两极冰层消融情况，记录全球森林和城市的高度变化，测量内陆水体高等。ICESat-2 的数据就被用于揭示湖泊、水库水位变化，帮助评估水资源供给和灌溉潜力(Ryan et al., 2020)。这对农业和电力部门意义重大，在监控主要灌区水库的蓄水量变化以预判农田灌溉供水等方面应用广泛。此外，激光高度计数据可与其他传感器数据协同作用，比如验证和补充雷达高度计(后述)的观测，提高地形和海平面监测精度(NASA, 2014)。图 2-7 展示的是 ICESat-2 卫星测量的北极海冰厚度随季节的变化情况。图中对比了 2019 年 1 月和 10 月的情况：颜色越偏红表示冰层越厚，偏蓝表示越薄。可以看出，1 月(冬天)的海冰明显比 10 月(秋天)更厚。

主动光学遥感技术最大的优势在于能够获取精确的三维空间信息。与被动光学传感器依赖自然光不同，激光雷达通过主动发射激光脉冲并接收其反射信号，可以探测地表的高度差异，甚至在一定程度上穿透稀疏的植被层，直接“看到”地面。这使它特别适合绘制高精度的地形图和复杂结构的轮廓图。在经济和社会管理中，激光雷达的应用价值日益显现。例如，它可以帮助估算森林的木材储量、

冰川的水资源储备,也可以监测矿区或城市地表的形变,对评估财产风险和基础设施安全至关重要。由于其测量精度极高(垂直精度可达厘米级),主动光学遥感技术也常用于水资源管理(如追踪地下水位季节性变化)、城市规划(如掌握建筑高度分布)等需要精细量化的场景中。

图 2-7 ICESat-2 探测的 2019 年两幅北极海冰自由高度月度合成图示例



图片来源: NASA Scientific Visualization Studio

不过,激光遥感也有局限性。由于激光束较窄,空间采样是“点状”的,不能像传统光学成像那样提供连续覆盖。例如, NASA 的 GEDI 卫星激光雷达每次只能在轨道正下方形成若干“光斑”,彼此间距可能达到数百米。因此,得到的是条带状、离散的三维数据,而不是完整的区域图像 (Hakkenberg et al., 2023)。为了克服这一局限,激光雷达常常与其它遥感手段搭配使用,如可见光、多光谱或雷达成像传感器。前者提供广域、连续的“面状”信息,后者提供精细的“点状”结构信息,二者互为补充,共同构建出既全面又高精度的地表图景。

2.2.2.3 被动微波传感器(Passive Microwave Radiometers)

与波长较短、易受云层与夜间影响的光学或热红外遥感不同，微波遥感(microwave remote sensing)通过在约 0.3–300 GHz (厘米至米波段)范围内的卫星/航天器微波传感器，捕获并分析地表和大气的天然辐射或散射微波信号，从而实现穿云、昼夜的全天候观测(Ulaby et al., 1981)。微波波长较长，能够穿透云层和降水，对昼夜及恶劣天气条件不敏感(Natural Resources Canada, 2025)，因此尽管其空间分辨率通常比光学遥感低(数公里至数十公里)，但其在水文循环监测、气象预报、海洋风场分析和灾害监测等领域具有独特优势。根据是否主动发射微波，微波传感器可分为被动微波遥感和主动微波遥感，其中被动微波系统仅接收地球天然辐射的微波亮温，用于反演土壤湿度、海面温度、大气水汽等参数(Plant, 2001)。

被动微波传感器主要分为不同频段和用途的子类，以下将重点介绍两种具有代表性的类型及其应用。

多频成像辐射计(Multi-frequency Microwave Imaging Radiometers)

多频微波辐射计是微波遥感的子集，在实际载荷中运用广泛。它们通过多个离散频率通道和双极化(V/H)同时接收地表与大气天然辐射的亮温信号，用于反演降水率、海面风速、海冰覆盖、土壤湿度等多种地球环境参数。例如，AMSR2(高级微波扫描辐射计 2 号)作为 GCOM-W1(Global Change Observation Mission-Water)卫星的主载荷，在 6.9–89 GHz 等多频通道执行圆锥扫描，被动接收海洋和陆地的微波辐射，实现全球水循环(海表风、降水、列水汽、土壤湿度、海冰等)连续成像观测；GMI(GPM Microwave Imager, GPM 微波成像仪)作为全球降水测量(GPM)核心卫星的主要传感器，为降水和台风监测提供了关键微波视角(UN-SPIDER, 2015)。

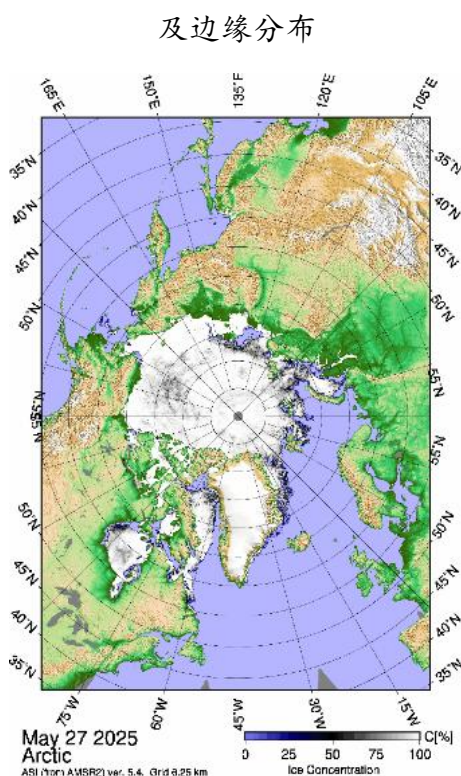
多频成像辐射计目前有以下几种主要运用场景：

航运安全与港口运营：在空旷的远洋，船只缺乏就地气象观测，多频微波辐射计填补了这一空白，其通过 36 GHz 等频段遥测海面粗糙度，反演出 10 米高度处的海表风速场，可实时绘制海面风场和降雨分布图 (Lindstrom, 2018)。航运公司据此优化航线，避开风浪危区，提高航行安全和准点率。可以说，多频微波遥感提供的高时空分辨率海洋气象数据，正在成为航运和港口运营的“天气雷达”，保障了全球海上物流链的安全高效。

台风风险预估、防范与理赔：被动微波辐射计在热带气旋(台风、飓风)监测中同样发挥独特作用。GMI 等传感器的高频率(例如 89 GHz)微波通道能够穿透台风厚厚的云墙，直接观测风暴内部的降水结构和云中冰粒分布，为判断台风眼墙和雨带结构提供“透视”图像。这一能力弥补了传统红外云图的不足，已被纳入高级卫星台风强度估计技术(ADT)，用于提升台风中心定位和强度测定的准确性 (Olander & Velden, 2019)。对于金融领域，这也意味着保险公司和再保险公司可以获取更准确的台风实况参数，用于动态评估潜在损失。

海冰监测与航道规划：微波成像辐射计还是高纬度海冰监测的主力军，可每日提供极地海冰覆盖率分布图。对于政策制定者而言，长期海冰数据还有助于评估气候变化对极地航道开发、渔业和沿岸社区的影响，从而制定相应的应对策略和保险安排。在再保险领域，极地海冰的年度消长趋势也是衡量能源开发和运输风险的重要依据。因此，多频微波遥感凭借全天候观测能力，已经成为极地环境监测和商业航运决策不可或缺的技术支撑。

图 2-8 AMSR2 5 月下旬北极海冰的空间范围(白色区域为高浓度海冰)



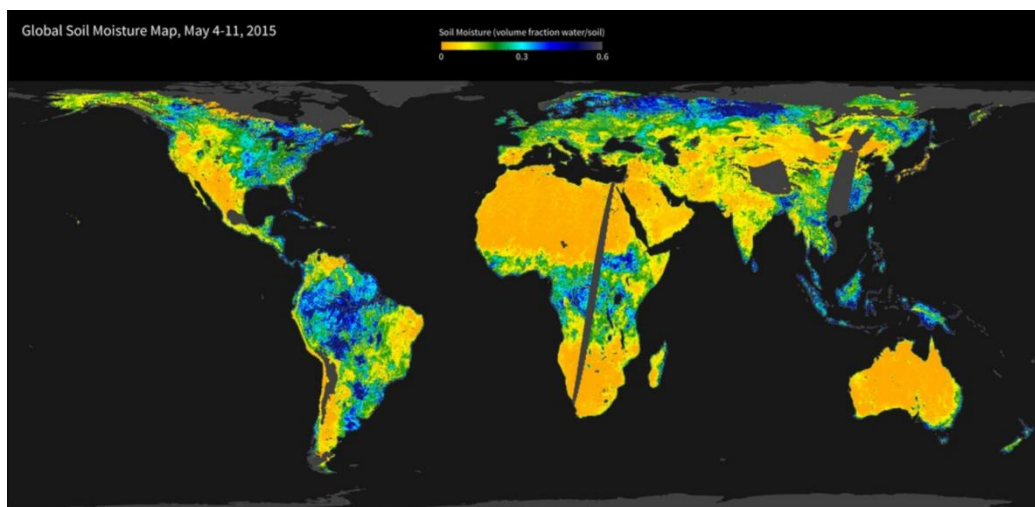
图片来源：University of Bremen Sea Ice concentration

L 波段土壤湿度辐射计(L-band Soil Moisture Radiometers)

L 波段(约 1.4 GHz)的微波辐射计专门用于探测地表浅层土壤湿度，其代表探测器是美国 NASA 于 2015 年发射的 SMAP(土壤湿度主动被动卫星)。SMAP 是全球首颗专门测量土壤水分含量的卫星，通过被动微波辐射计获取全球表层 5 厘米土壤的亮温图，并辅以同步旋转的雷达进一步提高分辨率 (NASA, 2024)。SMAP 每 2-3 天可以通过辐射计数据绘制一次全球的土壤湿度图，空间分辨率为 36km，而雷达和辐射计测量相结合将产生空间分辨率为 9 km 的土壤湿度图 (NASA, 2018b)。

图 2-9 是在 2015 年 5 月 4 日至 11 日 SMAP 调试阶段获取的土壤分布图，清晰地描绘了当时土壤含水情况。其中橙色和黄色代表干燥土壤湿度条件，而绿色和蓝色代表潮湿土壤湿度条件。陆地上的灰色区域表示没有数据，因为仪器在测试期间会反复开关。

图 2-9 5 月 4 日至 11 日 SMAP 调试阶段获取的土壤分布图



图片来源：NASA Scientific Studio

L 波段非常适合探测农田土壤的含水状况。这使 SMAP 等传感器能够定量描绘全球农作区的“土壤水地图”，为农业生产和食品安全提供前所未有的数据支撑。土壤湿度的准确监测直接影响了农业生产情况。土壤墒情是一个地区干湿情况的直接表征，也是作物生长的命脉，直接决定了农作物的收成情况。在遥感辐射计出现之前，人们只能依赖传统模型推算土壤湿度(如 USDA 依赖地面雨量和温度模型间接推算土壤湿度)，往往会在缺乏高精度数据的区域产生较大的误差；如今土壤湿度检测的直接观测则弥补了这些空白，同时还使得更高频度的采样成为了可能，使分析员能更准确地判别全球主要产粮带是否面临干旱或过涝，从而帮助预测旱涝对农作物产量的影响(NASA, 2024)，并做出相应的预防措施。例如，SMAP 的土壤湿度数据显示出比美国国家农业统计局用于评估作物生长供水能力的数据更高的空间分辨率和时间采样率，同时在投入运行后，已经成功监测到多起“闪旱”——短时间内土壤水分急剧下降的事件——以及大风暴(洪水)，为相关部门争取了缓冲时间。

其他被动微波传感器

除了成像辐射计，被动微波遥感领域的重要设备还包括微波大气探空仪(Microwave Atmospheric Sounder)，其典型代表包括美俄联合卫星上的 AMSU 系列——AMSU-A 和 AMSU-B/MHS(EUMETSAT)——以及美国极轨气象卫星 JPSS 上的 ATMS(National Oceanic and Atmospheric Administration, 2013)。这些仪器在卫星上以固定扫描角度横扫大气层，不同频率通道监测氧气或水汽的吸收：在 50–60 GHz 附近，氧气分子吸收最强，所测亮温主要反映对流层和高层大气温度廓线；在 183 GHz 左右，水汽吸收最明显，所测亮温则体现各高度层次的湿度分布。探空仪将这些多频亮温按层组合，就像把大气“切成”一层层，从上到下依次记录每层的温度和湿度特征。然后，地面上的处理系统根据这些层层分明的亮温差异，运用物理计算方法，就能还原出对应高度的温度和水汽含量曲线。由于这种技术不受云雨和夜间影响，它可以连续、稳定地为天气模式提供大气垂直结构的关键信息。这些垂直探测数据对于数值天气预报至关重要。

展望未来，干涉式微波辐射计(Interferometric Microwave Radiometer)等新技术有望进一步拓展被动微波遥感的应用边界。传统微波辐射计受天线口径限制，空间分辨率较低，而采用干涉合成孔径技术可以在较小平台上实现较大等效天线。例如，欧空局 SMOS 卫星通过 2-D 干涉合成孔径技术，在未使用大型抛物面天线的情况下，把 L 波段原生分辨率提高到 35–50 km——与使用 6 m 实孔径(规模大于 SMOS)的 SMAP 辐射计(见 L 波段土壤湿度辐射计，原生分辨率 ~36 km)相当(SMAP 之所以最终可以实现 9km 的分辨率，是因为存在后续算法的处理)(European Space Agency, 2017)，大幅减轻了平台负荷。

Copernicus 计划中的哥白尼微波成像辐射计(CIMR)将采用 8 m 大口径实孔径 + 圆锥扫描方案，通过高频通道实现 ≤ 5 km(18.7/36.5 GHz)和 < 15 km(6.9/10.65 GHz)的海冰与海表观测精度，为极地航运和气候研究提供更精细的数据支撑(Ciani et al., 2019)。与此同时，新的频段和更低噪声接收技术将提高微波遥感对弱信号的探测能力(例如对高空大气微量气体或更低含水量土壤的测量)。可以预见，下一代被动微波传感器将具备更高分辨率、更强灵敏度和更多极

化信息，这将催生更加丰富的应用场景，如城市热岛精细监测、精细农业灌溉决策支持、海洋极端天气的早期探测等，都有望从中受益。

2.2.2.4 主动微波传感器 (Active Microwave Sensors)

卫星遥感中的主动微波传感器指主动发射微波信号并接收回波的雷达类仪器。主动微波传感器自带发射微波源，和被动微波传感器一样，也可实现全天候、全天时观测，即使在夜间或云雾遮蔽下也能获取数据。在经济活动监测中，主动微波遥感以其独特优势提供可靠的数据洞察，帮助政府决策者和金融机构评估宏观经济趋势、基础设施风险和自然环境对经济的影响。

从对地表观测几何方式来说，主动微波传感器可以分为侧视成像、宽幅散射、正下方测距三大类，其中代表探测器分别为**合成孔径雷达**、**散射计**(Scatterometer)和**雷达高度计**。因此，这里主要从这三类探测器展开说明。

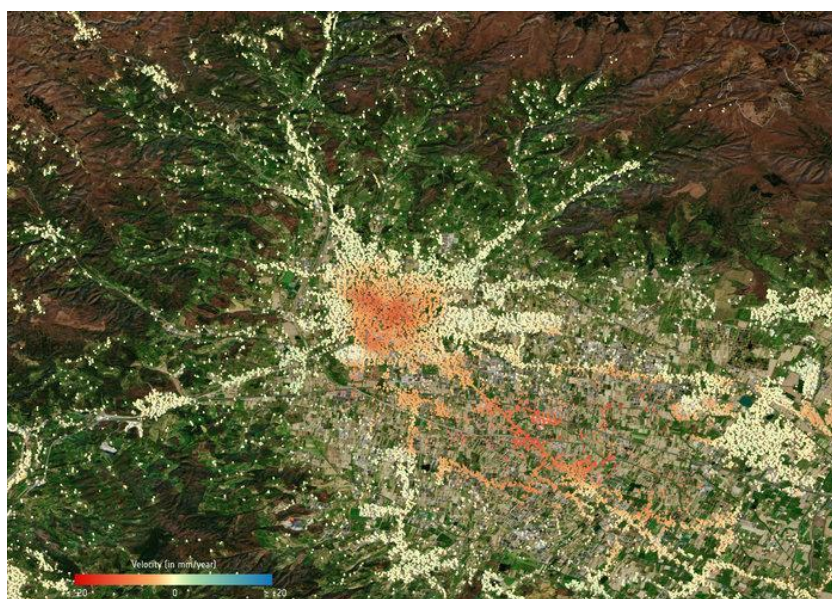
合成孔径雷达

合成孔径雷达是一种成像雷达，它通过天线发射微波脉冲并接收地表反射回波，以此获取地物影像。之所以被称为“合成”孔径雷达，是因为它巧妙地利用卫星平台的运动，将小天线在飞行过程中的多次回波记录合成为等效大天线，从而获得高分辨率影像。SAR 的典型工作波段包括 X 波段(~8-12 GHz，波长约 3 厘米)、C 波段(~4-8 GHz，波长约 5 厘米)和 L 波段(~1-2 GHz，波长约 20 厘米)。其中，较高频率(如 X 波段)可实现亚米级精细成像，但穿透植被能力较弱；较低频率(如 L 波段)穿透力强，可探测植被下地表或林冠结构。SAR 影像的典型空间分辨率在数米级(视工作模式而定)，单幅影像可覆盖数十公里到数百公里宽度不等的条带区域。许多 SAR 卫星同时具备干涉测量能力(InSAR)，通过比较不同时间段的 SAR 复影像相位，可以检测毫米级的地表形变。这种高精度形变监测能力是 SAR 在经济领域的重要价值所在。

全球有多颗卫星搭载 SAR 成像仪。例如，欧洲航天局的 Sentinel-1A/B 卫星

采用 C 波段监测，分辨率可达 5 米级(Copernicus Programme, 2024)；加拿大的 RADARSAT-2/RCM 雷达卫星采用 C 波段，分辨率为 3 米左右(CSA, 2021)；中国的高分三号系列卫星 C 波段，分辨率 1 米左右(European Space Agency, 2024)；德国的 TerraSAR-X 和 TanDEM-X 卫星则采用 X 波段，分辨率优于 1 米(DLR, 2025)。

图 2-10 意大利托斯卡纳大区皮斯托亚市的沉降监测



图片来源：Copernicus Programme

SAR 在生活和工作中应用广泛，其中一个重要的应用是地表沉降监测与房地产风险评估。SAR 的干涉测量广泛用于监测城市地面沉降等缓变灾害，以评估对建筑和基础设施的潜在风险。图 2-10 展示了利用 SAR 干涉测量生成的地表形变图示例，展示了意大利托斯卡纳大区皮斯托亚市的沉降监测。结果图中，红色表示地面下沉区域，蓝色表示地面抬升区域。红色区域就意味着风险较高，需要进一步分析。在实际生活中，利用 2015–2021 年的卫星 InSAR 数据，研究人员绘制了美国 28 个主要都市区的精细沉降速率图，结果发现所有城市中至少 20% 的城区土地正在下沉，主要由于地下水过度开采，引发的地面沉降影响约 3,400 万人，并有超过 29,000 栋建筑处于高风险区域。这些信息为城市规划和房地产风险管控提供了重要依据 (Ohenhen et al., 2025)。同样，在北京、上海等

城市，InSAR 监测也揭示了局部地面沉降热点区域，有助于提前识别潜在的地基下沉对楼宇和市政设施的威胁，便于政府制定地下水管理和城市建设规划。政府决策者可以将 SAR 沉降数据作为风险预警工具，在城市更新和基础设施投融资时考虑地质稳定性因素，金融机构亦可据此评估房地产资产的地基风险溢价。

散射计(Scatterometer)

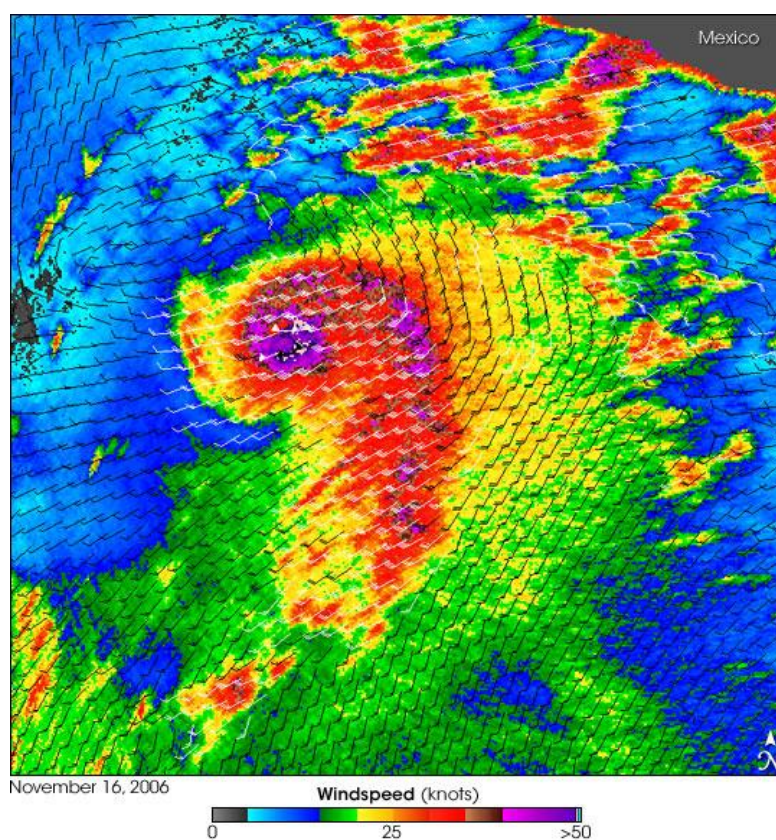
卫星散射计是一种搭载在极轨卫星上的主动微波雷达。它向海面发射 C 波段(~5.255GHz)或 Ku 波段(~13.4GHz)的微波脉冲，测量海面将信号反射回卫星的能量强度(称为后向散射系数)。海面越粗糙(风越强)，散射回波就越强；反之，风平浪静时散射回波弱。通过多角度、多极化的观测，散射计可以反演得到被照射区域的海表风速和风向，即风矢量数据 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2010)。这一过程类似“遥测海面波纹”，利用海浪扰动程度推算近地表的大气运动。最终，仪器以十几到几十公里的网格形式生成全球海面风场图。

散射计有以下代表性的载荷。美国 NASA 于 1999 年发射的 QuikSCAT 卫星搭载“海风”(Seas)散射计，开创了高分辨率全球海表风场观测的先河。QuikSCAT 的 Ku 波段散射计每天可获取 90%以上海洋区域的风速风向，有效填补了气象观测空白。欧洲发射的 EUMETSAT 的气象卫星 MetOp 系列上的 ASCAT 散射计工作于 C 波段，提供长期连续的海面风场监测(NASA, 2025)。此外，中国的海洋二号系列卫星(HY-2A/B 等)同样搭载了微波散射计和配套的高度计，能够监测海表风场、海浪和流场，用于海洋环境预报。

散射计数据通常每天更新，能以 6~12 小时的时效向数值天气模型和航运部门提供最新的风场信息(Hoffman & Leidner, 2005)，因此它充当了大范围海上“风场探测器”，尤其在远洋缺少实测气象浮标的区域，卫星散射计提供了宝贵的风场实况。通过散射计获取的全球海表风场数据，气象部门可以实时监测海上风暴系统并改进数值天气预报。美国国家海洋和大气管理局(NOAA)指出，基于 QuikSCAT 散射计的全球海表风数据已被广泛用于海上天气预警，包括飓风和冬季风暴强度和路径预测，对应急响应、近海石油作业和商业航运具有重要价值。

图 2-11 就展示了 NASA 的 QuikSCAT 卫星散射计获取的 2006 年 11 月的一场东太平洋飓风(Sergio)的近海表面风场(颜色表示风速大小, 箭头(风羽符号)表示风向, 其中白色箭头指示了降雨区的位置)。另外, 风场实况数据也被用于预报海浪高度和洋流, 有助于船只选择安全高效的航线 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2010)。可以说, 散射计在航运市场分析、航线规划和风险管控等方面具有巨大潜力。

图 2-11 雷达散射计测绘的飓风风场示意图



图片来源: NASA QuikSCAT

雷达高度计(Radar Altimeter)

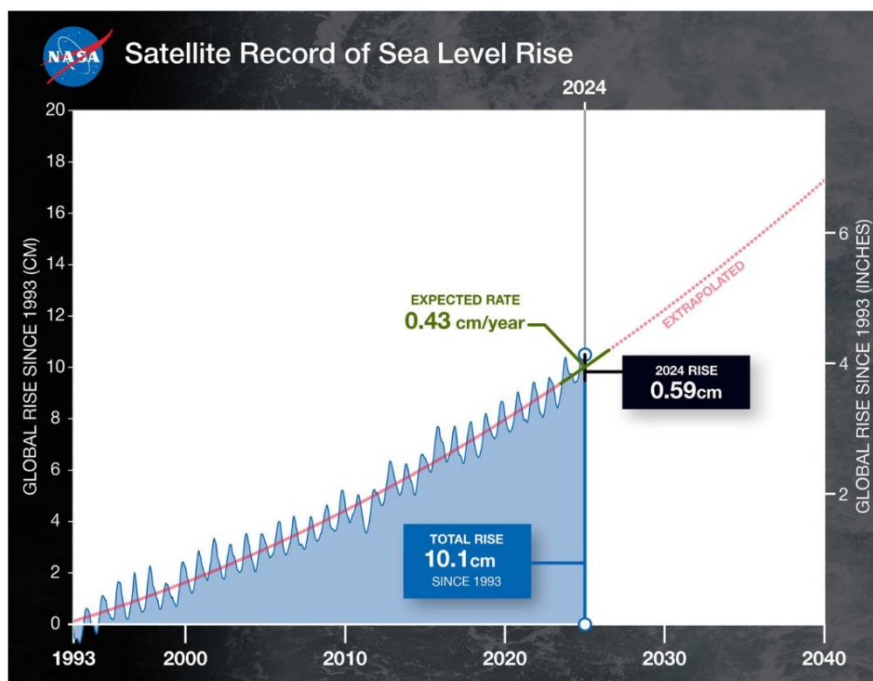
雷达高度计是一种主动式微波传感器, 通过向正下方发射脉冲并精确测量其往返时间, 来计算卫星到地球表面的距离, 从而测定海平面高度 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024)。除了核心的高度测量, 其回波信号还能反演出显著波高 (SWH) 和海面风速 (U10), 为气象与海洋模型提供关

键数据 (ECMWF, 2021)。为达到厘米级的测量精度，现代高度计采用高频脉冲（通常为 1-2 kHz）并对上千个回波进行平均，以抑制随机误差(Cipollini, 2013)；同时，采用 Ku 和 C 双频段设计来校正电离层延迟，确保了长期数据的准确性 (CSIRO, 2024)。

卫星高度计的发展是全球航天合作的典范。自 1970 年代的 Seasat 和 ERS-1 奠定技术基础后，1992 年由美法合作的 TOPEX/Poseidon 任务是真正的里程碑，它首次将海平面测量精度提升至厘米级，开创了全球海洋动力环境监测的新纪元。其后续任务，包括 Jason 系列及新一代的 Sentinel-6 卫星，不仅延续了这一高精度观测记录，还将其应用拓展至海冰厚度和内陆水体监测。

高度计最重大的贡献之一，是为全球海平面上升提供了无可争议的权威观测证据。自 1993 年以来的连续监测数据显示，全球海平面正以约 3.4 毫米/年的平均速度上升，30 年间累计升高超过 10 厘米，这与全球变暖导致的海洋热膨胀及冰盖加速融化直接相关。这一持续且加速的上升趋势对全球沿海经济体构成了重大长期风险。基于高度计的精确数据，科学家和决策者能够量化高潮淹没、海水倒灌和海岸侵蚀等风险，从而为沿海防洪工程（如海堤）、港口基础设施加固以及气候适应性规划提供直接的科学决策支持 (Srinivasan & Tsonetos, 2023)。同时，在港口运营、航运、基础设施投资乃至保险业的风险精算模型中，这些精准的海平面基准和波高信息都已成为不可或缺的核心依据。在低洼地区，如太平洋岛国或大型河口三角洲的港口，卫星监测揭示的加速上升趋势已促使投资者和规划者将未来海平面上升情景纳入基础设施项目的可行性研究之中，进行长期投资风险评估。此外，保险公司也积极利用这些数据，以完善针对沿海洪水和风暴潮灾害的风险精算模型。

图 2-12 1993 年至 2024 年全球平均海平面高度变化曲线(卫星高度计观测)



图片来源：NASA EARTHDATA Sea level change

2.2.2.5 大气化学与成分专用传感器 (Atmospheric Composition Sensors)

本章重点介绍用于监测大气成分(如臭氧、二氧化氮、二氧化碳、PM_{2.5}等)的卫星遥感传感器及其应用。这些传感器主要采用被动光学遥感手段(如前所述),但因其观测结果应用广泛、对宏观决策具有重大意义,特单列一章进行阐述。通过这些传感器,决策者能够量化空气污染物和温室气体的时空分布,并将其与人类活动和经济指标关联起来,用于政策制定以及金融投资评估等。下面分别介绍三类具有代表性的大气成分传感器及应用案例。

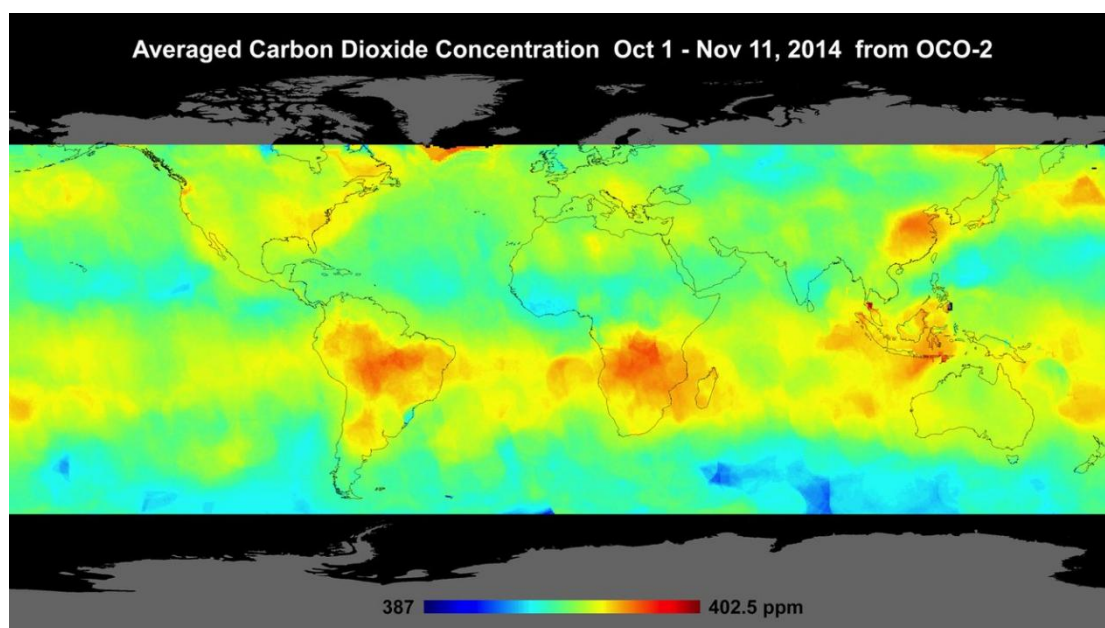
温室气体光谱仪 (GHG Spectrometer)

温室气体光谱仪是一类星载被动光学遥感载荷,利用米歇尔逊干涉、光栅光谱、法布里-珀罗或空间异调干涉等高光谱技术,在近红外与热红外波段被动测

量大气对太阳辐射的吸收特征,以实现 CO_2 、 CH_4 等温室气体柱浓度的全球监测(Wu et al., 2024)。原理上,白天太阳光照到地球表面,再被反射回太空,卫星上的传感器就会接收到这些光。二氧化碳和甲烷等温室气体在某些特定颜色(波长)的光上有“吃光”的特性,卫星通过检查这些波段的光被吸收了多少,来判断空气中含有多少温室气体。具体来说,轨道温室气体光谱仪可以在 O_2 A $0.76\mu\text{m}$ 、弱 CO_2 $1.61\mu\text{m}$ 与强 CO_2 $2.06\mu\text{m}$ 三个窄带内同步记录反射太阳辐射,通过比较吸收深度计算柱平均 CO_2 或 CH_4 (WMO, 2024)。为了让计算更准确,卫星还会校正大气中的杂散干扰,比如云和灰尘。

美国 NASA 的 OCO-2 和 OCO-3 卫星,以及中国的碳卫星 TanSat 是本领域的代表。其中,OCO-2 与 TanSat 均为太阳同步轨道,搭载三个高分辨率光栅光谱仪,在前述三个近红外波段同时观测 CO_2 和 O_2 吸收(European Space Agency, 2024)。如图 2-13 所示,OCO-2 卫星提供了全球的大气 CO_2 柱浓度分布,颜色越暖表示 CO_2 浓度越高(ppm)。从图上可以看出南半球春季受生物质燃烧影响,澳大利亚、非洲南部和南美东部上空的 CO_2 明显升高(NASA, 2014)。

温室气体光谱仪的经济与政策应用主要体现在支撑碳减排政策和碳交易体系。首先,在国家层面减排核查方面,卫星实现了对各国温室气体排放的独立监测。2015 年《巴黎协定》规定各国自主贡献(NDC)目标,并自 2023 年起每 5 年开展全球碳盘点;2019 年 IPCC 大会明确提出利用卫星遥感验证温室气体排放清单的方法(Liu et al., 2022)。OCO-2、TanSat 等卫星监测空间覆盖广、更新及时,可用于比对各 国温室气体浓度变化,评估减排承诺履行进度。其次,在碳市场与城市排放监测方面,精细化的卫星数据可定位主要碳排放源。通过卫星观测绘制的城市 CO_2 浓度地图,研究人员可以量化交通拥堵和工业区对城区 CO_2 的贡献,为地方政府制定减碳措施提供依据。此外,在排放事件追踪方面,GHG 光谱仪还能帮助发现异常排放,例如某发电厂升级脱碳设备后,其上空 CO_2 柱浓度趋势相对周边下降,表明减排确有实效。这种空间信息为碳交易和监管提供了独立第三方数据支撑。

图 2-13 2014 年 10–11 月全球平均大气 CO₂柱浓度分布

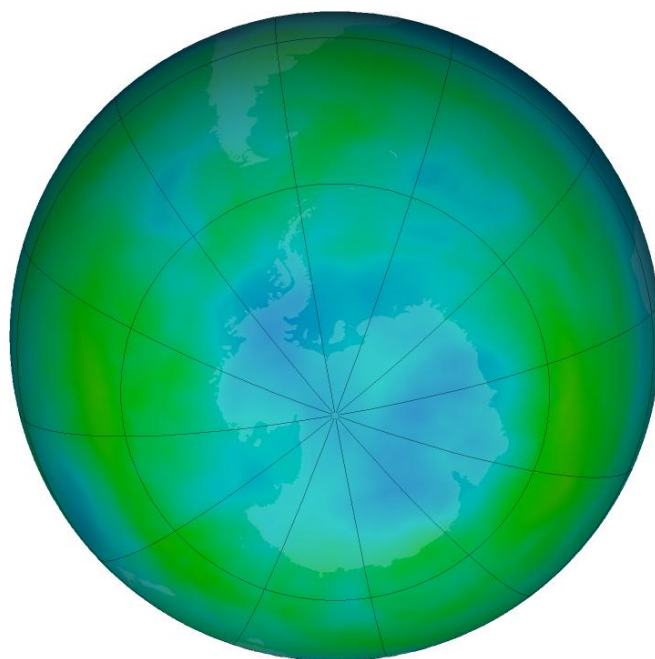
图片来源：NASA Jet Propulsion Laboratory

臭氧与痕量气体监测仪 (Ozone & Trace Gases)

臭氧与痕量气体监测仪侧重于探测对流层和平流层中的次级成分，包括臭氧(O₃)、二氧化氮(NO₂)、一氧化碳(CO)、二氧化硫(SO₂)等，其工作原理与温室气体光谱仪类似，但聚焦的波段不同。以 Aura-OMI 为例，仪器在 270–500nm、0.45nm 光谱分辨率获取臭氧与 NO₂吸收峰，并实现 13×24km 空间采样；类似设计的 Sentinel-5P-TROPOMI 将光谱扩展至 710nm 和 SWIR 通道，用于高精度对流层污染监测。

臭氧和痕量气体监测仪在环境监管中发挥着重要作用。臭氧层监测方面，早在 1970-80 年代科学家就利用卫星发现南极臭氧空洞。如今臭氧监测仪延续对全球臭氧的每日观测(如图 2-14 所示)，记录平流层臭氧的长期恢复趋势，为国际公约成效提供证据。在城市污染方面，痕量气体监测数据揭示了许多地区 NO₂的周末效应和季节变化：例如欧洲和北美的大城市，周末 NO₂水平常比工作日低 30%左右，反映车流和工业排放的周期性减弱(Ialongo et al., 2016)。这一现象从太空清晰可见，表明交通活动对城市空气质量有直接影响。

图 2-14 NASA 2025 年 6 月臭氧层空洞监测图

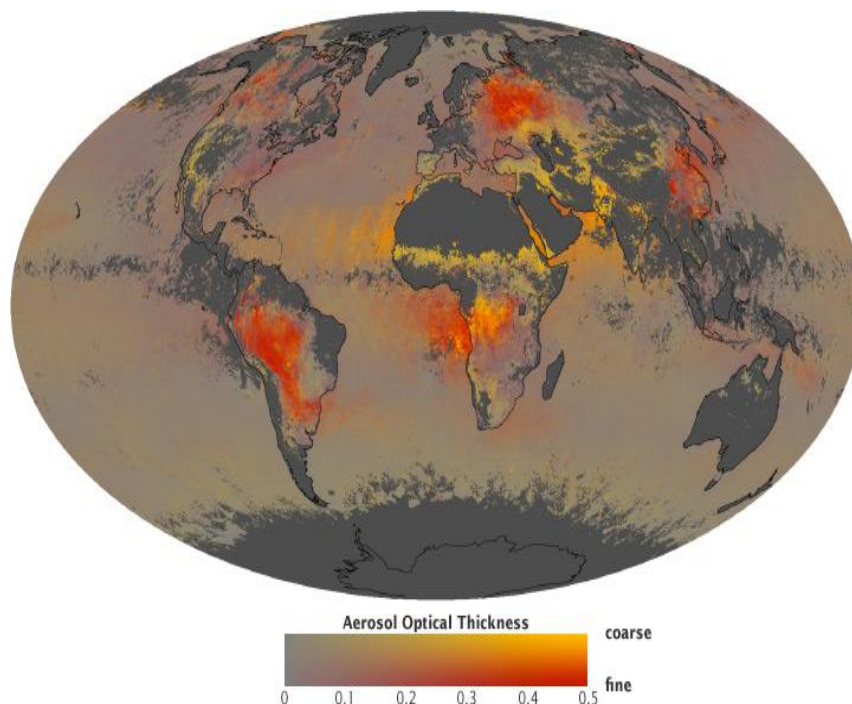


图片来源： NASA Goddard Space Flight Center

气溶胶与多通道成像仪 (Aerosol & Multi-channel Imager)

多通道成像仪(multispectral imager)依托可见-近红外多个波段对地反射率差异，利用气溶胶光学厚度(AOD)与波长依赖性(λ 指数)等参数表征沙尘、烟霾等粒子浓度与类型(Eisinger et al., 2023)。由于大气中的气溶胶(如沙尘、烟雾、 $PM_{2.5}$ 等细颗粒物)会影响光的反射和传播，多通道成像仪可以通过比对不同波段的亮度变化，识别空气中悬浮颗粒的多少和类型。例如，工业烟尘、农烧烟雾等细颗粒物更擅长吸收蓝光，而沙尘、海盐等粗颗粒则在红外波段反射更强。多通道成像仪正是通过这些波段之间的“亮度差异”建立算法，来反推出大气中气溶胶的浓度(通常以光学厚度 AOD 表示)以及大致类型。其中典型代表是 NASA Terra/Aqua 卫星搭载的 MODIS 传感器。它通过多个可见光和红外波段，连续监测全球气溶胶的分布和变化。为适应不同地表环境，MODIS 采用了“暗目标”算法(适用于海洋、植被等暗背景)(Levy et al., 2025)和“深蓝”算法(适用于沙漠、城市等明亮区域)(Tao et al., 2017)，有效提取空气中颗粒物的信息。

图 2-15 全球气溶胶光学厚度及粒子大小的分布示意(2010 年 8 月平均)



图片来源：NASA earth observatory

图 2-15 中，颜色深浅表示气溶胶总量(光学厚度)，色调表示粗细粒子占比：红色为细粒气溶胶为主(如工业污染烟雾、生物质燃烧烟尘)，黄色表示粗粒为主(如沙漠扬尘、海盐气溶胶)。可见北非、中东和中亚的沙尘带，以及南亚平原和中国东部的细颗粒污染都非常突出。这些特征与当地自然条件(沙漠、季风)和人类活动(工业、农烧)密切相关。

气溶胶和 $PM_{2.5}$ 的卫星监测在环境治理和宏观分析中提供了独特视角。首先，在污染趋势评估方面，卫星解决了地面站不足的问题，可比较不同区域长期 $PM_{2.5}$ 变化。例如中国在 2013 年实施“大气十条”治理后， $PM_{2.5}$ 年均浓度显著下降。卫星反演显示 2013–2017 年中国东部地区 AOD 平均下降约 0.07(绝对值)，与地面 $PM_{2.5}$ 下降趋势一致 (Dang & Liao, 2019)。这些成果为政府空气质量改善政策的有效性提供了直观证据。其次，在跨界污染追踪方面，气溶胶具有较长大气寿命，易于远距离传播。多光谱卫星可以追踪沙尘暴和烟霾的跨区域输送路径，评估源地和下风地的影响。例如，每年春季西北沙尘经偏东气流影响京津冀，MODIS 影

像就会经常拍到沙尘向东飘移的黄色云带(Voiland, 2010)。最后, 在公共健康与保险领域, $PM_{2.5}$ 暴露数据与人群健康风险密切相关。保险和投资机构开始引用卫星 $PM_{2.5}$ 数据评估城市人群的污染暴露水平及其医疗支出风险, 从而将环境因素纳入经济模型。这体现了气溶胶遥感数据的跨领域价值: 不仅服务环保部门, 也为金融市场提供洞察。

2.3 卫星数据的获取

● 数据来源:

本章节旨在系统性地梳理金融经济分析中所应用的卫星数据来源。我们将数据源划分为两大类别。第一类是由美国、欧洲及中国主导的**开源数据**, 它们由政府背景的航天机构运营, 以其覆盖全球、免费开放和拥有长期历史档案的特点,



成为进行宏观经济趋势、长期环境变化以及区域发展研究的基石。第二类是由全球领先企业运营的**商业数据**, 它们凭借高空间分辨率、高重访频率、定制化服务能力, 在微观层面的企业活动监测和高频经济指标构建中发挥着核心作用。我们将深入探讨每个数据源的历史背景、搭载的核心传感器、关键技术特征, 并提炼其在金融经济领域的应用场景。详细数据源总结请见表 2-4 与 2-5

表 2-4 开源数据卫星数据源分类与应用总结表

国家/机构	卫星系统	发射时间	主要传感器/技术	分辨率	重访周期	核心数据产品	金融经济应用场景
美国 NASA/USGS/NOAA	Landsat 8/9	2013/2021	OLI-2（光学）、TIRS-2（热红外）	30 米（多光谱） 100 米（热红外）	8 天	地表反射率影像、地表温度（LST）	都市圈扩张监测、工业设施生产状况监测
	MODIS (Terra/Aqua)	1999/2002	中分辨率成像光谱仪（36 波段）	250 米-1 公里	每日	植被指数（NDVI）、旱情图、洪水淹没范围	大宗农产品供给预测、洲际灾害影响评估
	VIIRS (JPSS)	2011 至今	日夜波段（DNB）	星下点 742 米	每日	夜间灯光强度图、火点监测	宏观经济复苏评估（夜光变化）、工厂开工率预警

欧洲 ESA	Sentinel-1	2014	C 波段合成孔径雷达 (SAR)	5 米	6 天 (双星)	地表形变图、船舶航迹、溢油范围	基础设施风险评估 (桥梁沉降)、全球供应链拥堵监测 (如港口拥堵)
	Sentinel-2	2015	多光谱成像仪 (含红边波段)	10 米	5 天 (双星)	作物健康图、土地覆盖分类	农业保险定损 (如俄乌冲突作物减产)、农业信贷风控
	Sentinel-5P	2017	对流层监测仪 (TROPOMI)	7.5×7.5 公里	每日	大气污染物分布图 (NO ₂ /SO ₂ /CH ₄)	企业 ESG 独立验证 (工业园区排放热点识别)
中国 CNSA	高分系列 (GF)	2013 至今	光学/雷达/高光谱 (如 GF-3 SAR)	最高 2 米 (光学)	1-4 天	中国及周边地表覆盖图、基础设施进度图	“一带一路”项目投资评估、中国城市群规划成效分析

表 2-5 商业数据卫星数据源分类与应用总结表

企业	卫星系统	核心技术	分辨率	覆盖能力	核心数据产品	金融经济应用场景
Planet Labs	PlanetScope	低成本小卫星星座	3 米（光学）	每日全球覆盖	经济关键点（POI）高频活动指数	港口集装箱堆积预警、短期经济拐点预测
	SkySat	按需拍摄	50 厘米（光学/视频）	按需定制	超高分辨率影像	\
Maxar/Airbus	WorldView/SportMode	高分辨率光学成像	30 厘米级	按需定制	地物识别（车辆/飞机/机械）、3D 模型	并购尽职调查（矿山设备核实）、企业产能评估（如特斯拉工厂）

ICEYE/Capella	小型 SAR 星座	主动微波成像	亚米级 (SAR)	高频重访 (按需)	储油罐液位高度、露天堆场库存体积	原油库存估算、供需情报分析
长光卫星	吉林一号	超过 100 颗卫星星座	亚米级 (光学)	每日 10-30 次 (特定目标)	中国区域高频影像	政策落地成效分析 (如智慧城市)、A 股行业景气度监测
航天宏图	“女娲星座”	PIE (Pixel Information Expert) 系列软件平台	宏图一号 SAR 卫星: 分辨率范围在 0.5 米至 5 米之间	全球	PIE-Engine 云服务平台	为我国对地观测与空间信息应用提供重要支撑
中国四维	新一代商业遥感卫星系统	高分辨率光学与 SAR 卫星技术 & “四维云”平台	高景一号 03、04 星: 提供优于 0.5 米的高分辨率影像	全球	高分辨率光学及 SAR 卫星影像产品	智慧城市、地理信息平台软件、卫星导航定位、地理信息应用等重点领域, 服务于城市管理和资源监测的应用间接支撑经济决策。

表 2-6 卫星遥感数据应用厂商总结表

企业	卫星系统	核心技术	分辨率	覆盖能力	核心数据产品	金融经济应用场景
尔特数科	国内领先专注于卫星遥感数据应用商，与多个领先卫星厂商建立深度合作关系	多源数据融合+AI 分析	全球数据源，可定制化服务	全球	标准化行业指数（库存/生产活动/供应链）	为政府、金融机构提供宏微观监测数据与分析报告(如企业运营状况监测、原油储量)

2.3.1 开源数据

(1) 美国 (NASA / USGS / NOAA)

作为世界航天领域的长期领导者,美国的国家航空航天局(NASA)、地质调查局(USGS)和国家海洋和大气管理局(NOAA)联合提供了一系列世界上应用最广泛、历史最悠久的地球观测数据。

Landsat 系列 (陆地卫星)

自 1972 年第一颗地球资源卫星成功发射以来, Landsat 计划已不间断运行超过半个世纪,是全球持续时间最长的地球观测计划(Wulder & Coops, 2014)。这一工程为全球变化研究积累了无可替代的宝贵历史档案,使得长周期的趋势分析成为可能。当前,该计划的主力是在轨运行的 Landsat 8 和 Landsat 9 卫星, Landsat 8 卫星搭载了 OLI (Operational Land Imager) 业务陆地成像仪和 TIRS (Thermal Infrared Sensor) 热红外传感器; Landsat 9 卫星搭载了 OLI-2 (第二代业务陆地成像仪) 和 TIRS-2 (第二代热红外传感器)(Montanaro et al., 2022; Reuter et al., 2015)。

在技术上,该系列卫星能提供 30 米空间分辨率的多光谱影像与 100 米分辨率的热红外数据, Landsat 8 和 Landsat 9 二者配合能以 8 天一次的周期对全球任意地点进行重访观测(Barsi et al., 2014)。其核心数据产品是一套经过严格科学定标的、时序最长的中等分辨率(30 米)地表多光谱反射率影像,以及基于其热红外传感器生成的 100 米分辨率地表温度(LST)产品(Montanaro et al., 2022)。基于这些基础数据,分析师可以进一步生成更为丰富的衍生指标,例如从宏观到微观层面的热辐射(TIR)指标、各类植被健康指数(NDVI、EVI)、水体指数(NDWI)、地表不透水层覆盖图以及历史土地利用与土地覆盖的年度或多年度变化图(彭燕等, 2020)。此外, Landsat 核心价值不仅在于数据质量,更在于其跨越数十年的光谱稳定性和数据格式的高度一致性,确保了不同时期数据的可比性(Wulder & Coops, 2014)。这为分析师提供了一台“时间机器”,能够“倒回”并

审视地球上任何地点的历史变迁，为严谨的量化分析奠定了基础。

对于经济发展观测而言，Landsat 长达半个世纪的连续观测记录意味着能够以极高的可靠性，量化和分析以 5 到 10 年为尺度的长周期经济地理演变，例如精准绘制出京津冀或长三角等都市圈的建成区扩张边界，客观评估城镇化速度（Mi et al., 2019; Chen et al.）；或监测特定区域内森林与耕地的此消彼长，为粮食安全和土地利用政策的制定提供历史依据（彭燕等, 2020）。此外，利用 TIRS 传感器的热红外数据，可以对大型工厂、发电厂、数据中心、炼钢厂等进行非接触式温度监测。这些设施产生的热异常是其能源消耗和生产活动的直接反映（Barsi et al., 2014）。在光学影像无法穿透厂房的情况下，热力监测为判断工业活动的真实水平提供了一个独特的、不受干扰的独立指标（Montanaro et al., 2022）。

NASA 地球观测系统 (EOS) - MODIS 产品

作为 NASA 地球观测系统(EOS)的旗舰传感器，MODIS（中分辨率成像光谱仪）分别于 1999 年 12 月 18 日和 2002 年 5 月 4 日搭载在 Terra 和 Aqua 科研卫星上升空。在近二十年的时间里，MODIS 以其广阔的覆盖范围和高频的重访能力，成为全球宏观尺度环境与气候研究的主力工具，堪称“宏观经济学家的卫星”。MODIS 的核心数据产品是其每日覆盖全球的中低分辨率(250 米至 1 公里)影像，包含多达 36 个丰富的光谱波段（Wang et al., 2018）。这种设计牺牲了局部细节，换来的是对地球系统大范围动态变化的卓越捕捉能力。

在金融经济应用中，MODIS 的高频特性使其成为全球大宗农产品宏观监测的利器。它是监测全球主要“面包篮”地区（如美国中西部、巴西、黑海地区）植被健康指数(NDVI)和旱情的最佳工具（Gao et al., 2018）。国际粮商（如 Cargill、ADM）和对冲基金能够利用其每日更新的数据，在全球官方农业报告发布前，提前判断全球宏观供给形势，从而在期货交易中获得先机。同时，其宽阔的扫描幅宽（2330 公里）能快速评估洲际性灾害，如澳大利亚或加拿大的森林大火、密西西比河或长江流域的大范围洪水对区域交通、农业生产和矿业运输的宏观影响（Khan & Gilani, 2021）。在经济探测方面，MODIS 具备地面夜间灯光强度探测

能力，被广泛用于评估和预测经济增长。然而，其扫描方式导致图像边缘分辨率下降（“蝴蝶结效应”），且在城市等高亮区存在“饱和”问题（细节丢失），因此在夜光遥感领域，之后所讨论的 VIIRS 被视为其技术的迭代和升级（Dai et al., 2017）。

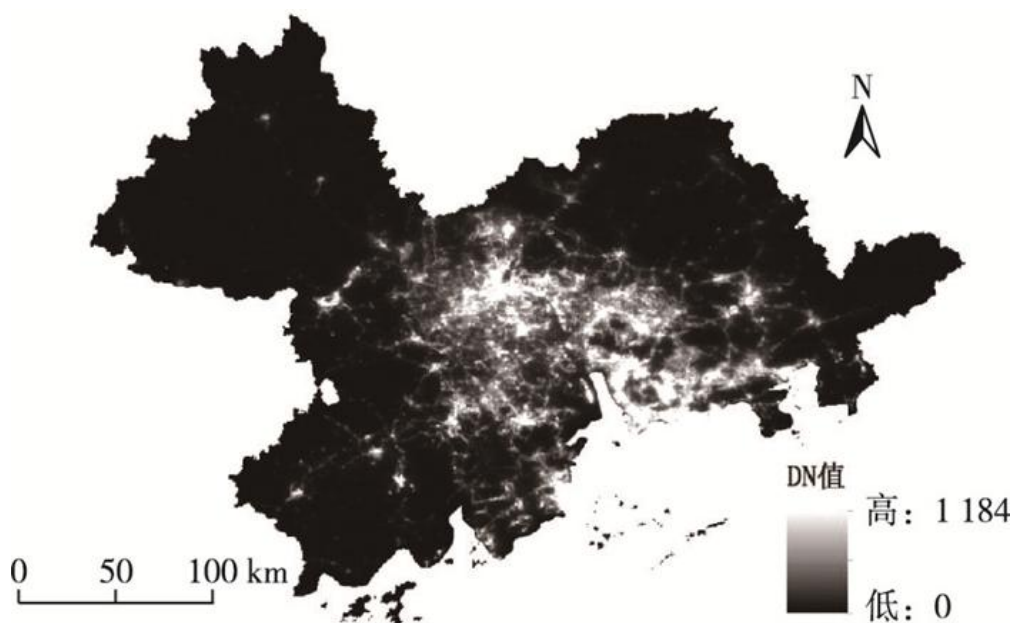
NOAA/NASA 联合极地卫星系统 (JPSS) - VIIRS 夜间灯光产品

VIIRS（可见光红外成像辐射仪）是搭载于美国 NOAA 与 NASA 联合运行的联合极地卫星系统(JPSS)系列业务气象卫星上的核心仪器(Xiong & Butler, 2020)。JPSS 系统的首要任务是为全球提供业务化的气象和环境监测，是改进天气预报、追踪风暴和监测气候变化的主力。然而，其搭载的 VIIRS 仪器中一个被称为“日夜波段”（Day/Night Band, DNB）的通道，具备极高的光线探测灵敏度，使其在完成夜间地表低光信号探测（如城市灯光、自然光源）等主要任务之余，能够产出一系列极具价值的衍生数据产品（如夜间灯光分布图、渔业活动监测数据等）（Link et al., 2025）。最著名的莫过于基于其“日夜波段”（DNB）生成的全球高精度每日夜间灯光强度栅格数据，基于此可进一步汇总计算出任何区域或城市的夜光亮度总值与均值（Jhamb et al., 2025）。除此之外，VIIRS 也能提供全球范围的火点监测（Active Fire Detection）和大气气溶胶光学厚度（AOD）等关键环境指标（Garrigues et al., 2023）。VIIRS 数据每日更新、覆盖全球，其热红外波段的空间分辨率约为 750 米，而“日夜波段”（DNB）的星下点分辨率约为 742 米。并成功克服了其 MODIS 在城市中心等高亮区域的“信号饱和”问题（Elvidge et al., 2017）。

VIIRS 夜间灯光数据的战略价值，在于它为经济分析提供了一个高频率、广覆盖、强客观性的经济活动代理变量（Proxy Variable），弥补了传统经济统计数据频率低、发布滞后且在部分地区缺失的短板（Chen & Nordhaus, 2019）。它赋予了决策者和投资者一种近乎实时的、自上而下的宏观经济“脉搏监测”能力。分析师可以通过追踪一个国家或地区夜间灯光的逐月乃至逐周变化，来评估其经济复苏的力度。除了在宏观层面的应用，VIIRS 数据的稳定性也使其具备了在微观

层面监测特定企业运营状况的潜力。通过持续追踪大型工业园区、24 小时运营的工厂、主要港口或矿区的夜间灯光强度变化，分析师可以推断该设施的开工率和运营强度（Chen et al., 2024）。例如，某汽车制造厂夜间灯光亮度若持续下降，可能预示其生产订单减少或面临停产，为关注该公司股票的投资者提供了领先于季度财报的宝贵预警信号。

图 2-16 2018 年珠三角地区 NPP-VIIRS 夜间灯光图



*图片来源：徐嘉源等人 (2021).

(2) 欧洲 (ESA - 哥白尼计划)

欧盟发起的哥白尼计划(Copernicus Program)是目前主要的地球观测计划，其“哨兵(Sentinel)”系列卫星免费提供高质量、高频次的观测数据，已成为全球经济分析的重要数据来源。

哥白尼计划 - Sentinel-1 (哨兵一号)

作为哥白尼计划的首发星，Sentinel-1 于 2014 年启动，其双星星座旨在提供稳定、高频的全球雷达数据，革命性地开启了高质量 SAR 数据免费开放的新纪元（Torres et al., 2012）。其搭载的 C 波段合成孔径雷达赋予了 Sentinel-1 全天

时、全天候（可穿透云雨）的成像能力，最高空间分辨率可达 5 米，并具备先进的干涉测量(InSAR)能力（Cigna et al., 2021）。Sentinel-1 核心数据产品是 C 波段合成孔径雷达影像。基于这种全天候、全天时的观测能力，可生成一系列不受云雨影响的衍生指标，包括高精度的地表形变速率图（通过 InSAR 技术）、船舶位置与航迹图、石油泄漏范围图以及洪水淹没图（Twele et al., 2016）。Sentinel-1 最独特的价值是利用 InSAR 技术，持续监测桥梁、大坝、矿区、高铁线路乃至城市地表的沉降或形变（Cigna et al., 2021）。

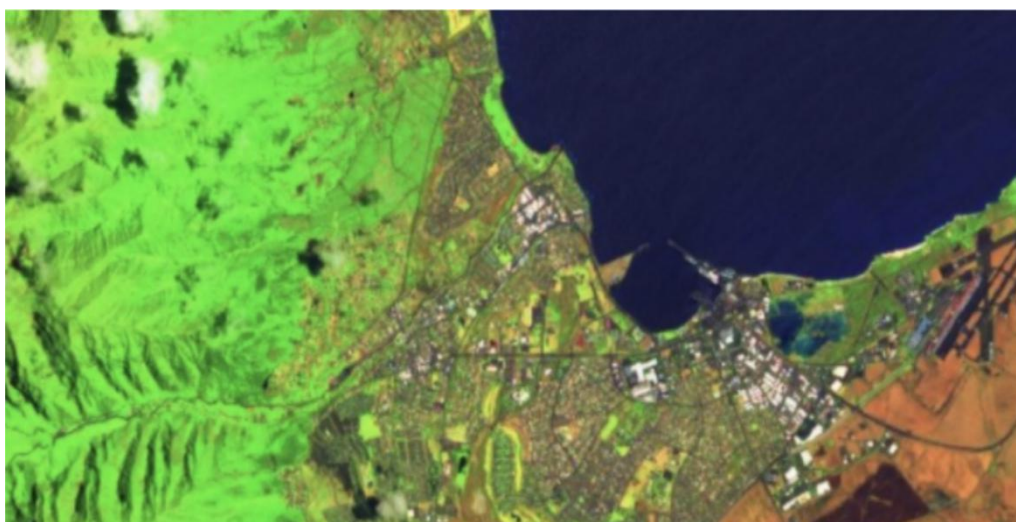
对于金融机构而言，这意味着一种全新的风险管理工具。在对大型基础设施项目进行投资前，可以利用 InSAR 数据评估项目所在地的地质稳定性。地表形变速率图对于基础设施的风险管理至关重要。在房地产和保险领域，通过该数据可以识别出因过度开采地下水或地质活动导致的城市地面沉降热点区域，评估楼宇、桥梁、铁路等资产的地基稳定性风险（Larsen et al., 2017）。例如，对意大利皮斯托亚市的监测清晰地显示了沉降区域，为城市规划和资产风险定价提供了科学依据。其全天候的船舶监测能力，使其成为评估苏伊士运河等关键航道拥堵状况的理想工具，为全球供应链分析提供稳定数据输入。在灾害响应方面，Sentinel-1 能够在第一时间穿透风暴云层，精确绘制洪水淹没范围，为农业保险的快速定损提供支持（Twele et al., 2016）。

哥白尼计划 - Sentinel-2 (哨兵二号)

Sentinel-2 于 2015 年启动，其双星星座的设计目标是提供与 Landsat 功能相似但时空分辨率更高的全球光学影像，因此常被誉为“新一代的 Landsat”（Drusch et al., 2012）。其搭载的多光谱成像仪(MSI)提供最高 10 米的空间分辨率，在全球大部分地区能实现 5 天的重访周期，并且包含了对植被健康状况变化尤为敏感的“红边”波段（Delegido et al., 2013）。基于此，其核心数据产品是高分辨率（10 米）的光学多光谱影像，通过其丰富的波段信息，可以生成各类精细的植被健康指数（如 NDVI）、水体指数（NDWI）、土地覆盖分类图以及作物类型分布图（Imran et al., 2020）。

相比于 Landsat 侧重于长周期历史分析，Sentinel-2 以其更高的时空分辨率在战术层面的农业精细监测上更具优势。10 米的分辨率足以清晰分辨多数商业农田的边界和内部状况，“红边”波段能比传统 NDVI 更早地捕捉到作物因干旱、病虫害等产生的胁迫信号（Delegido et al., 2013）。这使得 Sentinel-2 的数据可以为农业保险公司提供更精准、及时的作物受灾评估；同时，也能为农业供应链金融服务提供关于作物长势的客观信用支持，降低信贷风险（Imran et al., 2020）。例如，在 2022 年，基于 Sentinel-2 的植被指数清晰地揭示了俄乌冲突地区冬作物的长势受到了明显抑制，直接量化了战争对全球粮仓的冲击（田欣媛等, 2022）。

图 2-17 Sentinel-2 红边波段显示的作物健康差异图



图片来源：Sentinel 2 Bands and Combinations

哥白尼计划 - Sentinel-5P (哨兵五号 P)

2017 年发射的 Sentinel-5P 是哥白尼计划中专注于大气成分监测的卫星。其搭载的对流层监测仪(TROPOMI)极大地提升了全球主要空气污染物监测的精度和时效性，能够每日生成全球二氧化氮(NO₂)等污染物的浓度分布图（Veefkind et al., 2012）。因此其核心数据产品是每日更新的、全球大气主要污染物（如二氧化氮 NO₂、二氧化硫 SO₂、甲烷 CH₄等）的柱浓度分布图。

由于 NO₂是工业生产和化石燃料燃烧的直接副产品，Sentinel-5P 因此成为了

一个客观的“天空之眼”，用于独立验证企业 ESG 报告。分析师可以通过其数据，精准地“点名”特定工业园区、大型工厂或矿山的排放热点，为投资者提供独立于企业自身报告之外的 ESG（环境、社会与治理）环境绩效（E）验证数据，从而更客观地评估企业的环境风险和可持续发展承诺（van Geffen et al., 2022）。

（2） 中国 (CNSA / CRESDA)

中国通过“高分专项”等国家级项目，也已建立了强大的对地观测能力，其数据在区域经济分析中扮演着日益重要的角色。

中国高分系列 (Gaofen, GF)

“高分专项”全称为“高分辨率对地观测系统”，是中国《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中确定的 16 个重大专项之一。自 2013 年发射首星 GF-1 起，中国已成功构建了一个覆盖光学、雷达、高光谱等多种类型传感器的高分卫星星座（Zhong et al., 2021）。高分光学卫星可提供最高 2 米的光学数据，而 GF-3 卫星则是功能对标 Sentinel-1 的 C 波段雷达卫星。

高分系列数据对中国及周边地区的覆盖频率和数据获取的便利性具有天然优势，是研究中国区域经济发展、农业政策影响、城市群规划实施情况、环境治理成效等议题的最直接、最权威的开源数据源。此外，它也被广泛用于系统性监测“一带一路”沿线国家的大型基础设施项目进度，为相关投资的效益评估和风险管理提供支持。

2.3.2 商业数据源

商业数据提供商将卫星转变为一种高频、高精度的“另类数据”生产工具，主要参与者包括美国、欧洲和中国的新旧航天企业。这些公司通过出售数据、分析服务和解决方案获取收益，其产品是金融市场进行微观洞察和高频交易决策的关

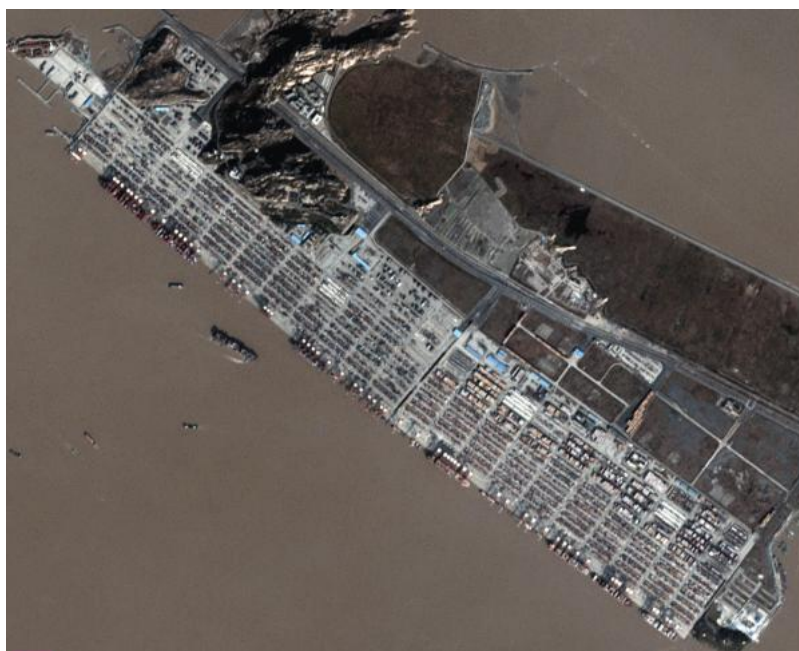
键。以下列举几家主流卫星商业数据提供商。

Planet Labs (美国)

Planet 成立于 2010 年，是“新航天(NewSpace)”革命的杰出代表。它通过发射由数百颗低成本小卫星组成的“鸽群(PlanetScope)”星座，并辅以高分辨率的 SkySat 星座，以颠覆性的理念和成本结构，实现了前所未有的全球高频观测。

PlanetScope 核心数据产品是基于“鸽群”星座生成的全球每日光学影像快照（约 3 米分辨率），以及由 SkySat 星座提供的按需定制的超高分辨率（50 厘米）光学影像和视频。基于此，可衍生出针对数千个经济关键点（POI）的高频活动指数。PlanetScope 每日全球覆盖是其最强的护城河。基于此能力，数据分析公司能够为全球数千个工厂、港口、大型商场、矿山堆场等经济关键点构建每日的活动指数，从而在月度或季度的官方统计数据发布前，捕捉到经济活动的短期拐点，获得宝贵的信息优势。

图 2-18 2019 年 12 月 15 日在中国上海外洋山深水港拍摄的 3 米自然色
PlanetScope 影像



图片来源：Apollo Mapping

Maxar / Airbus (美国/欧洲)

Maxar 和 Airbus 均是传统的光学影像服务商，其技术部分源于冷战时期的军用侦察卫星，拥有目前商业市场上最顶尖的光学成像技术和卫星工程能力。其核心数据产品是最高分辨率（可达 30 厘米级）的光学影像。基于强大的 AI 模型，可从这些影像中提取出特定地物的自动识别与计数结果，例如车辆、飞机、建筑机械等，还可以通过立体影像对生成高精度的 3D 模型（Hamilton, 2020）。

这种无与伦比的细节分辨能力，使其在并购(M&A)、私募股权投资的尽职调查中，能够用于核实目标公司资产（如矿山设备数量、厂房实际状况、在建工程进度）的真实性与质量，是进行高额投资决策时不可或缺的关键依据。在工业与供应链监测中，通过监测机场停放的飞机数量，可以直观评估航空业的景气度；通过追踪特斯拉超级工厂等重点项目的建设速度，则可以为评估企业资本支出和未来产能提供客观依据（Airbus Defence and Space, 2025）。

ICEYE / Capella Space (芬兰/美国)

在 2018 年之后，以 ICEYE 和 Capella Space 为代表的初创公司均成功部署了灵活、低成本的小型合成孔径雷达卫星星座，将以往笨重昂贵的雷达卫星变得灵活快速，开启了高分辨率商业雷达数据的新时代，是高频雷达影像服务的新兴力量。其核心数据产品是按需定制的、亚米级高分辨率的 SAR 影像。通过对特定目标的持续观测和专门算法，可生成浮顶式储油罐的液位高度和储量估算，以及露天堆场的库存体积估算。这项技术在金融市场最成熟、最具价值的应用便是全球原油库存的精确测量（ICEYE, 2025）。

由于 SAR 可以穿透用于遮挡的帐篷式顶盖，并能精确识别浮顶式储油罐顶盖的高度变化，数据分析公司能够以此为基础，以极高精度和频率测量全球主要地区的原油库存，为原油交易员提供关键的市场供需情报（ICEYE, 2025）。

图 2-19 2021 年 3 月 19 日荷兰鹿特丹港浮动油罐顶部的运动情况延时
SAR 图像



图片来源：[ICEYE](#)

长光卫星技术有限公司 (中国)

长光卫星成立于 2014 年，是中国第一家商业遥感卫星公司。其运营的“吉林一号”是中国目前规模最大、功能最全的商业卫星星座，是国家“新基建”战略在空天信息领域的重要组成部分。“吉林一号”星座的核心产品是面向全球、具备高频重访能力的亚米级分辨率光学影像和视频数据。其超过 100 颗在轨卫星的星座规模使其能够对特定目标实现每日 10 至 30 次的高频重访 (eoPortal, 2025)。凭借其对中国境内无与伦比的覆盖能力，长光卫星数据能够为中国各级政府的区域经济规划、资源管理、智慧城市建设等提供高频数据支持，是洞察中国宏观政策落地执行情况及其成效的一个独特窗口。同时，对于投资中国股市 (A 股) 的国内外机构而言，“吉林一号”也提供了分析特定行业和公司景气度的全新另类数据。

航天宏图信息技术股份有限公司（中国）

航天宏图信息技术股份有限公司（简称“航天宏图”）作为我国科创板首批上市企业及领先的卫星互联网服务提供商，正在积极推进“女娲星座”，这一中国规模最大的多层次、多模式混合遥感卫星星座的部署与建设。截至 2025 年 9 月，根据航天宏图官方披露的信息，“女娲星座”在轨卫星数量已达到 12 颗，已成为全国最大的业务化运行雷达遥感星座。根据最新规划，公司预计从 2025 年底起持续实施后续发射任务，进一步扩展星座规模与观测能力。

航天宏图的核心技术是构建了自主可控的 PIE（Pixel Information Expert）系列遥感图像处理软件为核心技术底座，并持续推动其云服务平台 PIE-Engine 的升级与人工智能融合（如“天权”视觉大模型）（Li et al. 2021），提升在遥感 AI 领域的智能化水平。因此，其“核心数据产品”并非传统意义上的单一数据集，而更多是指其软件平台、算法模型和由此产生的处理结果。其业务能力已向全卫星产业链拓展，涵盖了卫星设计制造、星座运营、遥感数据处理与应用服务等多个环节，为我国对地观测与空间信息应用提供重要支撑。

中国四维测绘技术有限公司（中国）

在遥感基础设施领域，中国四维测绘技术有限公司（简称“中国四维”），隶属于中国航天科技集团有限公司，是其发展遥感卫星应用产业的专业公司。中国四维主要负责运营我国高分辨率遥感卫星星座，并提供相关的时空信息服务。主营业务涵盖测绘技术研发、遥感卫星系统建设及地理信息服务，拥有甲级测绘资质并统筹运营国内外多颗商业遥感卫星资源。

公司以构建全球领先的商业遥感卫星系统为核心战略。公司自成立以来持续推进卫星遥感技术发展，于 2025 年 8 月推出四维天穹低空航路系统，积极布局低空经济与智慧航行服务新赛道。当前正推进 28 颗卫星系统建设，致力于构建全球遥感数据服务体系（Tao et al., 2022）。目前，中国四维正积极推进新一代商

业遥感卫星系统的建设。该系统建成后，将具备全球范围的高效重访、高分辨率观测及快速响应能力，为各行业应用提供稳定、可靠的时空数据基底。

中国四维是国家队中专注于高分辨率遥感卫星运营与应用的重要力量，作为国家民用空间基础设施的核心建设与运营方，中国四维通过持续扩增卫星资源、提升数据服务能力，强化了我国在全球遥感领域的自主可控性与竞争力。

尔特数科（中国）

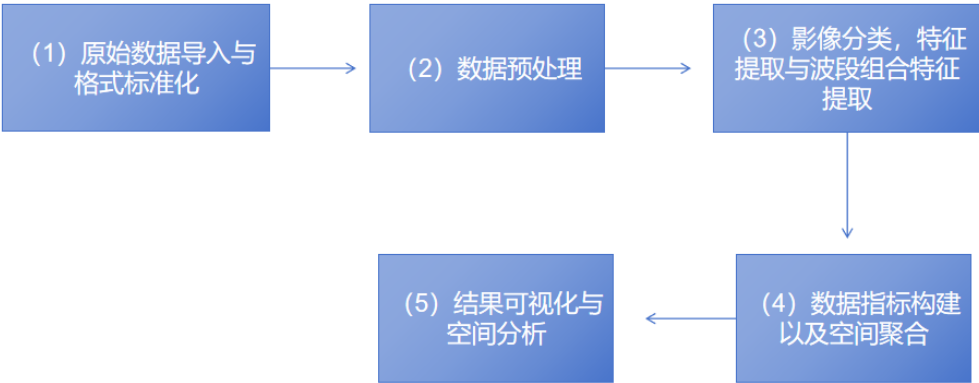
尔特数科是专注于将卫星数据转化为金融市场另类数据产品的专业分析公司的典型代表。与卫星运营商不同，这类公司的核心业务并非生产原始影像，而是作为“数据翻译官”，采购来自全球各类卫星的原始数据，利用自身的行业知识、模型算法和 AI 技术，将其加工成可直接被金融机构（如对冲基金、资产管理公司、研究机构）使用的、标准化的行业监测指数和分析报告。

其数据产品通常聚焦于特定垂直领域，例如大宗商品库存监测报告，通过雷达和光学影像持续追踪港口和工厂的煤炭、铁矿石库存；工业生产活动指数，通过热红外和夜灯光数据监测工厂、工业园区、区域的生产活动状况；以及基于光学影像和雷达影像相互补充的供应链拥堵警报等。对于金融客户而言，订阅这类服务可以省去自行处理海量、非结构化卫星数据的复杂过程，直接获取能够融入其投资决策模型的“干净信号”，从而在市场中建立信息优势。

2.4 卫星遥感数据处理基础

卫星遥感数据的处理是经济金融应用的核心，其复杂性体现在从原始数据到高价值信息转化的技术过程中。这一过程涵盖预处理、数据解译与多源融合三个关键阶段，涉及物理模型、机器学习、统计学与领域知识的深度融合（图 2-20）。以下将展开详述。

图 2-20 卫星遥感数据处理步骤



(1) 原始数据导入与格式标准化

此阶段的目标是将卫星下发的原始、带有噪声和畸变的二进制数据，转化为具有准确地理位置和真实物理意义、可供科学分析的标准数据产品。

首先，需要将原始数据导入与格式标准化。此步骤首先将卫星专用的二进制码流（Level 0 级产品）解码，读取其内部存储的原始数字量化值（DN 值）、辐射定标系数、传感器姿态参数及地理定位信息等关键元数据。这一过程高度依赖于特定传感器的数据组织规范，需借助官方提供的解码工具或开源库（如 GDAL）实现数据解析。

在国内，相关研究如龚健雅院士团队在《测绘学报》发表的《高分辨率遥感卫星图像精确处理综述》中系统阐述了国产高分系列卫星数据的解码与初级几何处理流程，为处理国产遥感数据提供了重要参考。在此基础上，格式标准化旨在将解析后的异构数据转换为遵循开放地理空间联盟（OGC）标准的、具有统一地理坐标参考系和规范组织结构的通用数据格式（如 GeoTIFF、NetCDF 或 HDF），以实现数据的互操作性与大规模共享分析。

国际上的权威实践广泛参考了美国地质调查局（USGS）在其 Landsat 数据产品手册中定义的标准化处理流程，该流程将原始数据系统性地转换为具有一致空间参考和元数据结构的 Level 1 级产品，这一方法论已成为全球遥感数据标准

化的事实标准，被大量研究间接引用（如见于《Remote Sensing of Environment》等多篇高影响力论文）。因此，原始数据导入实现了从专有格式到可读数据的转化，而格式标准化则完成了从可读到统一、可互操作的升华，二者共同构成了遥感大数据应用不可或缺的基石。

（2）数据预处理

卫星遥感数据的预处理是确保后续定量分析和应用可靠性与可重复性的关键环节，构成了数据质量控制的基石。其核心目标在于系统性消除或显著减少原始数据中由传感器特性、大气条件、几何畸变以及噪声等因素引入的误差。高质量的预处理将原始的、包含干扰的表观辐射值转化为具有明确物理意义（如地表反射率）且空间位置精确的地理空间信息产品。

预处理的核心环节包括辐射校正、几何校正、云与阴影去除（针对光学数据）以及噪声抑制（针对 SAR 数据）。

辐射校正旨在将传感器记录的原始数字量化值（DN）转换为具有明确物理意义的表观反射率或地表反射率，从而消除太阳高度角、大气散射与吸收（如瑞利散射和气溶胶效应）的影响，这一过程的标准化流程在全球范围内被广泛采用（Chander et al. 2009）。

之后，几何校正则通过系统性和精密的几何变换来修正由地球曲率、传感器姿态、地形起伏等因素造成的像元位置偏差，最终将影像精确配准到规定的地图投影坐标系下，实现与其它地理空间数据的无缝集成，其高精度算法是生成可用 Level 1T 级产品的关键（Toutin, 2004）。

最后，云及其阴影的检测与去除。基于物理模型与机器学习相结合的方法（如 Fmask 算法及其后续发展）被能够有效识别并修复被云层污染的像元，极大提升时间序列数据的可用性（Zhu, 2015）。对于合成孔径雷达数据，预处理的核心在于噪声抑制，主要表现为消除固有的相干斑噪声（Speckle）。基于统计模型的

滤波算法，如 Lee、Frost 滤波以及更先进的非局部均值方法，被广泛用于在平滑噪声的同时尽可能保留边缘与纹理等细节信息，这是后续任何定量反演与分类分析不可或缺的前提（Lee, 1986）。

综上所述，卫星数据预处理是一个标准化、系统化的流程，通过严谨的辐射校正、几何校正、云与阴影去除以及噪声抑制等关键步骤，将原始卫星数据转化为可靠、精确、可比的信息产品。这一过程不仅依赖于成熟的理论模型（如大气传输模型、有理函数模型），也受益于强大的工具平台（如 LEDAPS、GDAL、GEE、SNAP）的发展，显著提升了处理效率和自动化水平，为后续的地表参数反演、变化检测及各类定量分析奠定了坚实的数据基础。

（3）卫星遥感图像解译

卫星遥感影像的解译，本质上是一个将原始像素数据转化为具有明确地理意义信息的系统性工程。这一过程通常遵循一个环环相扣的核心技术链条，主要包括信息增强、特征提取和智能分类三个关键步骤。

第一步：信息增强 —— 波段组合与指数构建

信息增强是解译的基础，其目的是通过数学运算突出特定地物的物理化学属性。最经典的方法是构建衍生指数。例如，通过组合近红外与红光波段，构建出的归一化植被指数（NDVI），能够极大地增强对绿色植被生命活力的量化能力，已成为植被遥感的基石（Rouse et al., 1974）。类似地，还可构建归一化差异水体指数（NDWI）、归一化差异建筑指数（NDBI）等，以高亮显示水体、建筑等人造地物。

第二步：特征提取 —— 从像素到多维描述符

仅有光谱信息（即像素的“颜色”或亮度值）往往不足以区分复杂地物。例如，一片低矮的灌木丛和一片新生的玉米田在光谱上可能极为相似。因此，特征提取旨在超越单一的光谱维度，通过挖掘影像中更深层次的信息，构建一个能够全面

描述地物的多维特征集。

这一过程不仅关注“是什么颜色”（光谱特征），更进一步分析“内部长什么样”（空间纹理特征，即像素的排列模式与粗糙度）和“有多大/高”（三维结构特征，即物体的立体形态）。通过整合这些互补的特征，才能为后续的精准确分类提供坚实的基础。

- **空间纹理特征：**它描述的是图像中像素灰度值在空间上的排列、重复与分布规律，反映了地物表面的平滑、粗糙或规律性等模式。这对于区分那些光谱信息相似但内部空间模式不同的地物至关重要。例如，基于灰度共生矩阵（GLCM）计算得出的纹理特征（如对比度、熵），能够有效区分光谱相似但空间结构不同的目标，比如一片自然林地与一块人工种植园（Haralick et al., 1973）。
- **三维结构特征：**这类特征超越了传统的二维平面视角，描述了地物在垂直方向上的几何与形态信息，如高度、体积、剖面形状及内部层次等。激光雷达（LiDAR）等主动遥感技术则可以提供地物的垂直结构信息，如冠层高度、建筑高程等，为区分不同类型的森林或城市建筑提供了关键的三维特征（Ozesmi et al., 2002）。

第三步：智能分类 —— 赋予数据语义标签

这是将数据转化为信息的最后一步。该步骤利用前两步构建的多维特征集（光谱、空间、纹理、结构等），采用机器学习（如随机森林、支持向量机）或深度学习（如 U-Net）算法，为影像中的每个像素或对象分配一个预定义的语义类别标签（如“水体”、“林地”、“耕地”）。例如，随机森林（Random Forest）算法因其在高效融合高维特征、处理噪声以及提供稳健分类结果方面的卓越性能，已成为土地覆盖制图等领域的首选工具之一（Maxwell et al., 2018）。

（4）数据指标构建以及空间聚合

在卫星遥感影像分析中，从像元级信息到可用的地理空间知识通常需要两个

关键步骤：数据指标构建与空间聚合。数据指标构建旨在将原始数字数值 (DN) 或表观反射率转化为具有明确生物物理或地球化学意义的指标，从而定量描述特定地表属性。

在此基础上，空间聚合则是为了将高分辨率的指标数据转换到目标区域或全球尺度分析的空间单元上。该过程通过定义明确的统计规则（如均值、中值或总和），将精细网格内的像元值汇总到更大的地理单元（如行政区划、流域或规则网格）中，从而有效克服数据冗余、减少噪声并匹配辅助数据的尺度。有影响力的综述研究指出，这种聚合策略对于确保基于多源遥感数据进行的全球环境变化评估的一致性至关重要（参见如，Townshend & Justice, 1988）。因此，指标构建实现了从“光谱”到“参数”的转化，而空间聚合则完成了从“高分辨率”到“适用尺度”的转化，二者共同构成了遥感大数据转化为科学洞察力的核心方法论。

（5） 结果可视化与空间分析

在卫星遥感研究流程中，结果可视化与空间分析是最终将数据转化为科学洞察与决策支持的核心环节，二者构成一个从视觉探索到定量验证的完整分析链条。结果可视化超越了基础的地图制图，它是一门融合了地理学、认知科学和图形设计的艺术，旨在通过多层次、多维度的视觉变量（如色调、明度、饱和度表示连续数值，形状与尺寸表示分类或等级）来直观传达复杂空间信息的内在模式、趋势与异常。例如，利用经过优化的色带（如 viridis 或 plasma 色带）来渲染大气气溶胶光学厚度 (AOD) 的全球分布，不仅能有效避免视觉误导，还能凸显污染传输路径 (Thyng et al., 2016)。这种可视化的成果为假设生成提供了至关重要的空间语境。

在此基础上，空间分析则提供了严格的量化工具，用于检验这些视觉模式是否具有统计显著性，并揭示其背后的空间过程与驱动力。它依赖于一套成熟的空间统计学与地理计算学方法，例如，采用 Getis-Ord G_i^* 或 Anselin Local Moran's I 等局部空间自相关指标来精确识别碳排放或城市热岛的热点与冷点区域 (Anselin, 1995)；运用空间回归模型（如地理加权回归 GWR）来探讨环境因子

与地表参数（如植被覆盖度）之间非平稳的空间关系。有综述研究指出，将可视化探索与空间统计建模相结合，是理解和解释地理现象尺度依赖性与空间异质性的关键（Goodchild, 2004）。

因此，可视化是发现故事的“窗口”，而空间分析则是验证故事并阐明其机制的“罗盘”，二者缺一不可，共同将海量遥感像素提升为可靠的地理知识与空间智能。

三、卫星遥感数据在经济金融市场应用

前文系统阐述了卫星遥感的主流传感器、数据源及处理方法。在此技术基础之上，本章将聚焦于具体应用，通过若干案例深入剖析遥感数据在经济金融领域的实践价值。案例总结请见表 3-1。

3.1 卫星遥感数据助力宏观层面监测分析

3.1.1 经济监测

经济决策的质量高度依赖于对经济活动的精准衡量。然而，以国内生产总值（GDP）为核心的传统宏观经济核算体系，在实践中面临着数据质量参差不齐、发布时效性滞后以及空间维度缺失等固有挑战。这些局限性在部分发展中国家和地区尤为突出，不仅影响了宏观政策的制定，也给区域投资和风险评估带来了较大的不确定性。为了应对这些挑战，卫星遥感数据为监测宏观经济活动提供了全新的、客观的补充视角。

案例一：夜间灯光——经济活动的地理足迹与轮廓

夜间灯光是人类经济活动直接、可见的足迹，Henderson 等人(2012)开创性地利用夜间灯光卫星遥感数据监测宏观经济发展，为观测经济活动提供了全新的、客观的视角。他们通过分析美国国防气象卫星计划（DMSP）自 1992 年以来持续记录的全球夜光影像数据，构建了一个高时空分辨率的经济活动测量指标。

首先，夜间灯光能够直接呈现经济脉络与事件冲击，直观地揭示宏观经济趋势和突发事件的影响。在宏观层面，图 3-1 反映了韩国与朝鲜半岛数十年间的灯光差异，其清晰反映了两国迥异的经济增长轨迹；在短期层面，在 1997 年亚洲金融危机期间，印尼的灯光亮度变化准确捕捉了经济遭受重创的短期冲击；而在微观层面，该数据甚至能精确识别出马达加斯加因发现蓝宝石矿而从无到有、迅速崛起的局部经济热点，这是任何官方统计都无法企及的颗粒度。

第二，卫星遥感数据的客观性使其能够量化修正国家经济增长数据。在研究中(Henderson et al., 2012)，他们建立了一个将卫星灯光数据与官方 GDP 数据进行融合的统计框架，旨在为官方统计数据质量较差的国家提供更可靠的经济增长估算。其基本原理是将官方 GDP 增长率和灯光数据预测的增长率视为对“真实”增长率的两个独立测量，通过优化权重进行组合，从而有效降低单一数据源的测量误差。研究发现，对于统计体系最薄弱的国家，最优的增长率估算模型应给予官方数据和灯光预测数据近乎相等的权重。这一方法论的应用产生了显著的修正效果，它将缅甸 1992-2006 年间官方报告的 10.0% 年均增长率，修正为更审慎的 6.48%；同时将布隆迪同期 -0.71% 的经济衰退，修正为 1.13% 的正增长，彻底扭转了对该国经济基本面的判断。

第三，夜间灯光数据最独特的价值在于其打破了行政区划的限制，能够对任意自定义地理空间进行经济分析。例如在对撒哈拉以南非洲的研究中，分析结果挑战了传统认知，发现内陆地区在研究期间的经济增长活力并不逊于沿海地区，广大腹地的增长速度也与资源集中的“首要城市”基本持平。这表明卫星遥感数据能够为区域发展战略的制定和评估提供全新的、基于地理空间的客观依据。

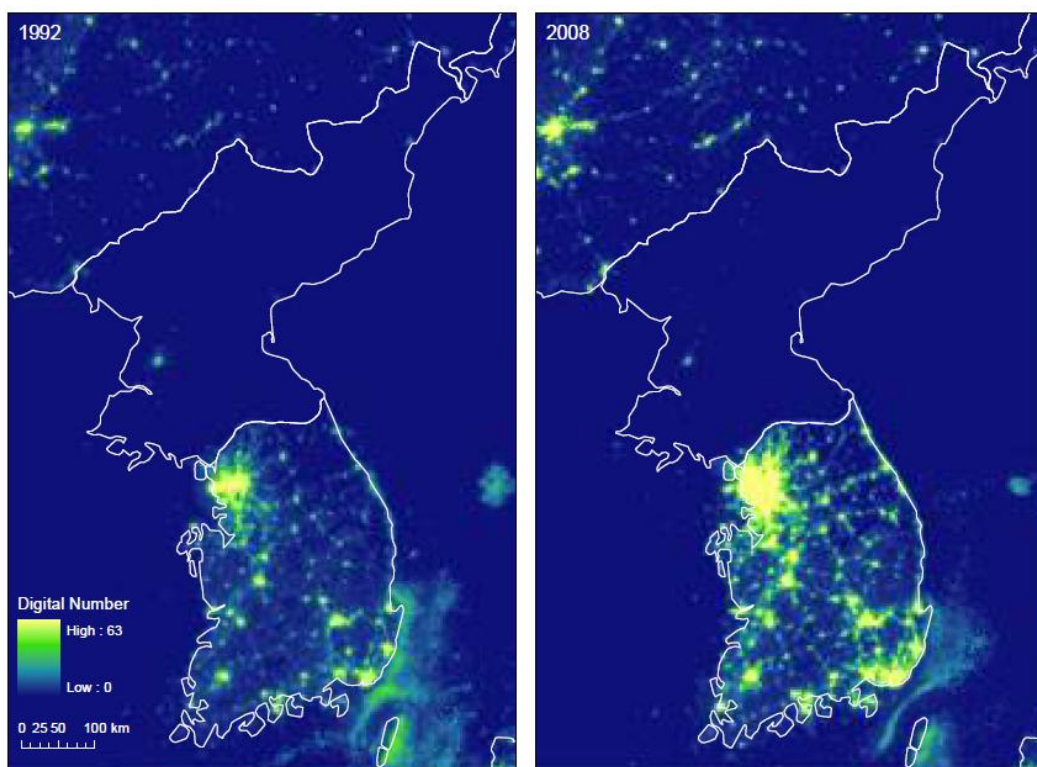
夜间灯光数据的战略价值，在于它精准地解决了传统经济统计的核心痛点，为决策者提供了不可或缺的增量信息。首先，它解决了数据质量与可靠性的问题。对于统计能力薄弱或透明度不高的国家，夜间灯光数据提供了一个客观、独立的第三方参照系。如缅甸和布隆迪的案例所示，它能够验证或挑战官方数据，帮助国际组织、评级机构和投资者做出更审慎的判断，有效规避“信息陷阱”。

其次，它解决了空间维度缺失的问题。传统 GDP 数据止步于省级层面，无法衡量城市群、经济带或具体项目的影响。夜间灯光数据则将分析尺度精确到公里级别，使得评估一项大型基建项目对沿线经济的带动效应、或是一个新开发区的真实产业聚集情况成为可能，为区域政策的制定与评估提供了“显微镜”式的工具。

最后，它提升了决策的科学性与前瞻性。综合来看，夜间灯光数据以其低成

本、高时效、广覆盖和客观性的特点，为公共部门和私营部门提供了强大的决策支持。政府可以利用它进行更精细的政策评估和区域规划；投资者则可以利用它在数据匮乏地区进行市场分析、风险识别和机会挖掘，有效穿透“数据迷雾”，从而在全球化的竞争中占得先机。

图 3-1 1992 年（左）和 2008 年（右）韩国与朝鲜半岛的灯光差异



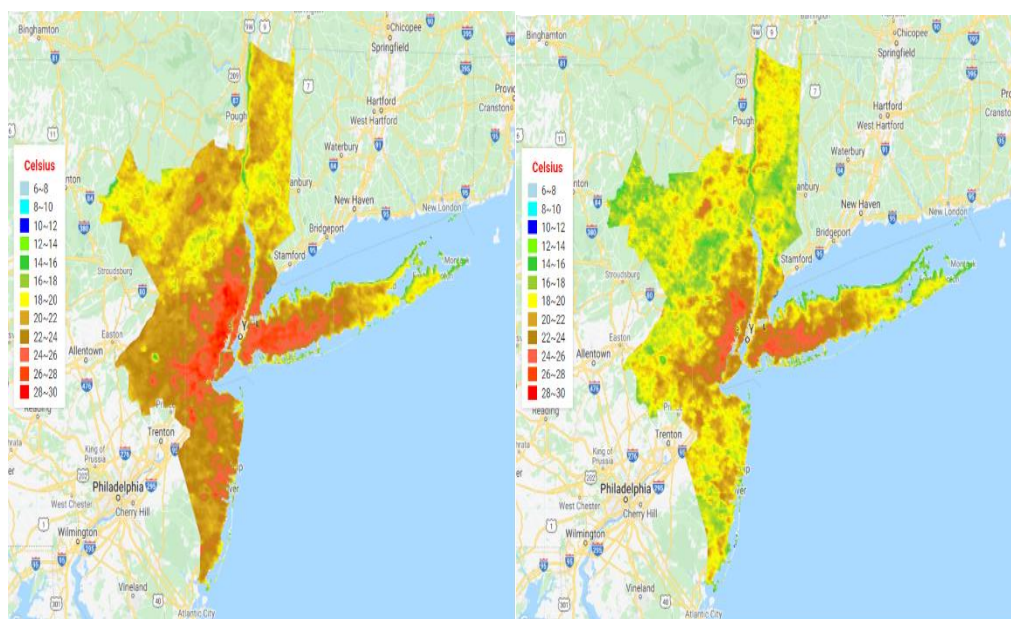
图片来源： J. Vernon Henderson/Adam Storeygard/David N. Weil

案例二：尔特数科热红外辐射——衡量经济体系的代谢强度

在夜间灯光数据开辟了卫星俯瞰经济发展这一前沿领域之后，新的研究进一步探索了基于更基本物理原理的监测方法，即通过测量经济活动的必然产物——热量，来“感受”经济运行的本质——能量的流动。基于物理学基本定律，开创性地利用卫星观测的热红外辐射(TIR)，为监测经济动态提供了更深层次的视角。其核心逻辑根植于热力学第二定律：任何人为的生产和经营活动，本质上都是一个能量转换过程，在此过程中，废热的产生是不可避免的物理结果。这些废热以热红外辐射的形式从地表散发，可以被遥感卫星精确捕捉 (Huang et al., 2023)。

因此，一个区域的 TIR 强度可以被视为其整体经济活动“新陈代谢”强度的直接物理表征。该方法具备普适性，能够捕捉所有类型的经济活动，包括室内生产、无灯光的工业过程、交通运输乃至人类活动本身的发热，覆盖了传统 GDP 统计可能遗漏的范围。

图 3-2 纽约新冠病毒疫情前（左）后（右）城市热辐射强度呈现显著变化



图片来源：TIR for New York-Newark-Jersey City, NY-NJ-PA MSA (Huang et al., 2023)

将原始的热量信号转化为可用的经济洞察，需要一整套严谨的分析方法以构建高频、高敏感度的增长指标。为精确分离经济活动信号，采用“异常热辐射”（Abnormal TIR）作为核心度量指标。该指标通过计算城市区域的 TIR 与其周边非城市化自然环境 TIR 的差值来获得，从而有效剔除了季节性、气候性等自然因素的干扰，隔离出纯粹由人类经济活动产生的热信号。基于对全球 G20 国家 99 个主要城市在 2004 至 2019 年间的数据分析，研究证实了 TIR 与经济活动之间存在显著且稳健的关联。分析揭示出清晰的量化关系，即年平均异常 TIR 每增加 1 开尔文（Kelvin），对应城市年化 GDP 增长率提升 3.4%。同时，TIR 对 GDP 的弹性系数约为 0.61，表明经济总量与热辐射强度高度相关。与夜间灯光相比，TIR 展现出更强的解释力，其对 GDP 的弹性是夜间灯光的两倍以上。该指标的有效性在多次全球性经济冲击事件中得到验证，在 2020 年新冠疫情爆发（见图 3-2）、2010 年欧洲主权债务危机以及 2007 年全球金融危机期间，受影响区域的

TIR 水平均出现了与经济下行同步的显著下降，展示了其作为高频监测工具的强大能力 (Huang et al., 2023)。

测量经济的“温度”之所以至关重要，是因为它解决了传统经济监测在全面性、时效性和深刻性上的三大痛点，为决策者提供了独特的战略价值。首先，它解决了数据覆盖不全的问题，实现了对经济活动的“全景式”扫描。不同于夜间灯光只反映“发光”的经济，或官方 GDP 难以覆盖非正规经济，TIR 作为能量消耗的物理结果，理论上涵盖了所有经济活动。这使得决策者能够获得一个更全面、无偏的经济活跃度总览，为判断真实经济状况提供了更坚实的依据。其次，它解决了动态追踪的难题，提供了高敏感度的“经济脉搏”。传统数据的滞后性使其难以用于早期预警。TIR 数据则可以实现高频更新，其变化与 GDP 增长率的紧密关系，以及在历次经济危机中的灵敏反应，证明了它是一种有效的即期和短期预测指标。这使得监管机构和投资者能够更早地识别经济拐点，把握决策窗口。最后，它超越了简单的“代理变量”，提供了评估经济“质量”的独特视角。TIR 与 GDP 的关系（即“GDP-TIR nexus”）本身就是一个衡量经济效率的指标。研究发现，技术水平更高、产业结构更优、化石能源依赖度更低的经济体，能够以更少的能量消耗（即更低的 TIR）创造出更高的经济价值。这意味着，TIR 不仅告诉我们经济“有多热”，更能揭示其增长方式是否高效、绿色和可持续，为评估产业升级和能源转型政策的成效提供了全新的量化标尺。

3.1.2 物流监测

遥感影像是衡量全球供应链韧性与地区经济活力的“快照式”数据源。光学与合成孔径雷达卫星不受恶劣天气、云层覆盖等影响，可持续地捕捉港口泊位利用率、集装箱堆场面积及干线公路车流密度等关键指标，为宏观经济预判和政策评估提供高频、客观的信息支撑。由于成像流程标准化且辐射定标一致，遥感影像具备跨区域、跨时段直接对比的优势，有效避免了传统人工统计可能存在的主观偏差。同时，伴随着高分辨率影像成本的持续下降，发展中经济体也得以用低于地面传感器网络的投入，获取精准的全国性物流监测能力。本报告将通过以下两个案例展示卫星在监测港口集装箱拥堵方面的应用场景，以及其在经济金融市场

中的应用。

案例三：尔特数科卫星港口监测直击盐田港拥堵

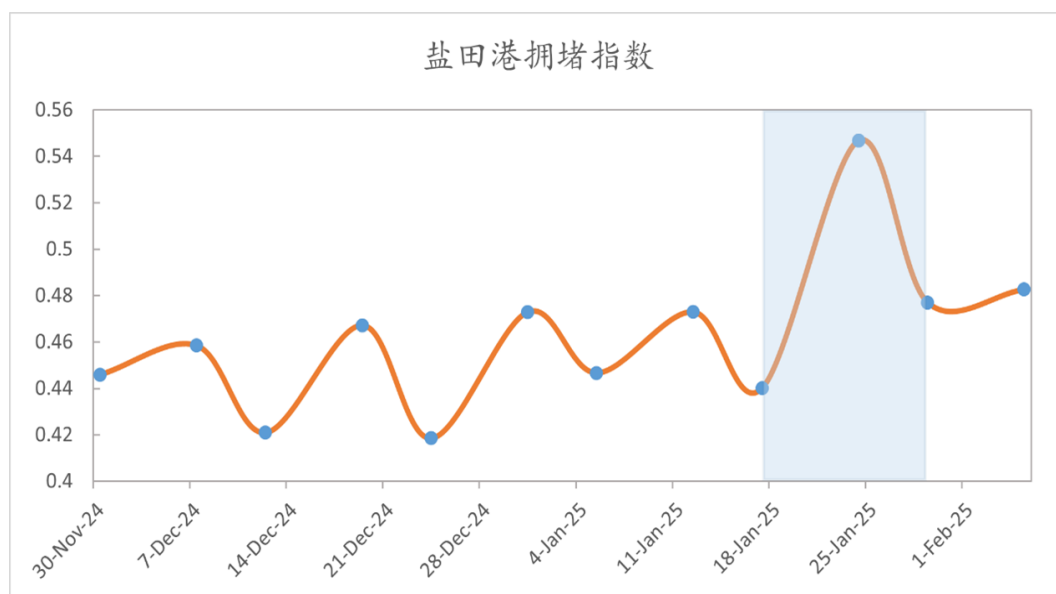
在全球供应链体系中，港口作为核心枢纽，其运营效率是国际贸易的晴雨表。然而，传统用于评估港口状态的统计数据往往存在显著的滞后性，而局部运营信息又难以反映全局态势。当面临地缘政治冲突、贸易政策不确定性等外部冲击时，这种信息不透明使得管理者 and 市场参与者无法及时进行风险预判与资源调度，构成了供应链管理中的关键痛点。为应对这一挑战，尔特数科（AltData）开发了一套基于卫星遥感的港口智能监测系统，旨在提供一种高频、客观且量化的“天基”监测方法，穿透信息迷雾，赋能供应链风险管理。

该系统的应用价值在 2025 年盐田港拥堵预测中得到了充分体现。深圳盐田港作为全球贸易战略枢纽的地位愈发凸显。该港不仅是华南区域唯一能常态化接泊 20 万吨级超大型集装箱船舶的核心节点，更承担着广东省三分之一的外贸进出口及中美贸易四分之一的货运量。然而，其高效的运营系统在特定时期仍面临巨大压力。一个典型的系统性挑战发生在 2025 年春节前夕。2025 年 1 月份，受美国新政府拟对华加征 10% 惩罚性关税的政策预期驱动，大量出口企业为规避风险而集中“抢运”，导致港口短期内作业量激增，拥堵状况迅速加剧。港口运营方为缓解压力，于 1 月 20 日至 28 日将出口集装箱的日配额临时上调 15% 至 1.5 万个，但港口拥堵仍是对物流运输造成了显著影响：卡车司机作业时间大幅延长，货运费用也一路飙升，从深圳物流枢纽福永到盐田港的卡车运输费用从原本的 1000 元暴涨至 2500 元以上。在这种复杂的拥堵背景下，如何快速、精准获取港口拥堵状况显得尤为重要。针对该类需求，尔特数科基于卫星遥感技术的港口智能监测系统展现出其独特的应用价值。

该系统实时调取高精度 SAR 卫星影像。SAR 具备全天候、全天时成像能力，不受云雨天气影响，确保了数据获取的稳定性和连续性。之后，通过自主研发并已获得发明专利的算法，系统自动解译影像，并对港口运营的多个物理状态进行量化分析，主要包括自动识别并计算集装箱堆场的占用面积与堆叠密度等。通过

量化分析，构建出一个直观、标准化的港口拥堵指数。在此次事件中，该指数在关税政策传闻发酵的 48 小时内，由 0.44 的基准值陡增至 0.55（图 3-3 所示），创下近三季度峰值，与港口面临的实际作业压力实现了高度同步。此外，该系统不仅能进行事中监测，还能进行事后分析与事前预警。例如，在春节假期后复工阶段，它成功预测了堆场空间恢复的节奏和速率，为航运公司合理优化船舶靠泊计划、避免无效等待提供了关键的数据支撑。

图 3-3 盐田港拥堵指数



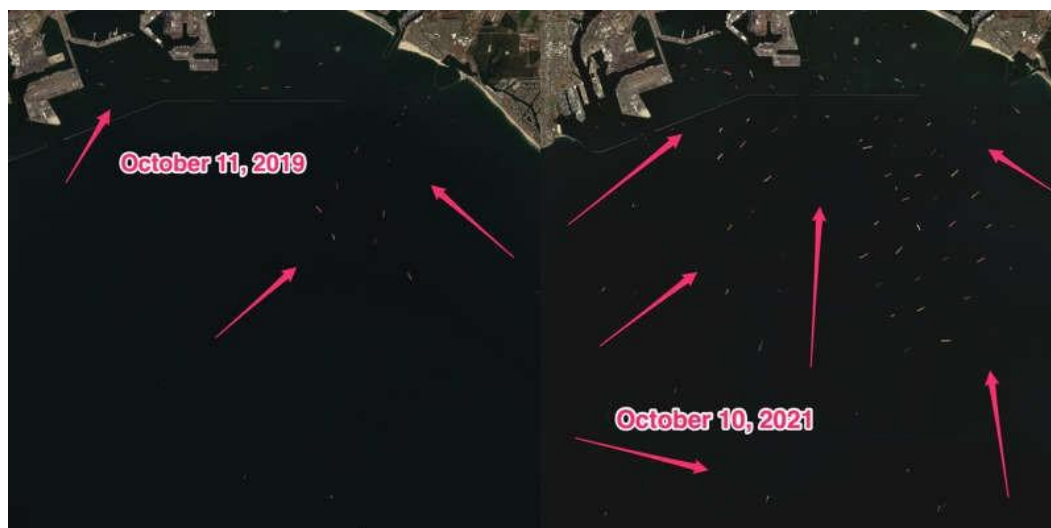
图源：尔特数科 - 盐田港拥堵指数变化

案例四：从新闻热点到金融信号 —— 洛杉矶长滩港拥堵事件

2021 年，受疫情和全球供应链瓶颈的双重影响，美国洛杉矶长滩港爆发了历史性的拥堵事件，一度出现超过 60 艘大型集装箱船在港外锚地“排队”等待泊位的极端情况。这一事件不仅是物流危机，也成为了卫星遥感应用价值的公开展示。Maxar 的 WorldView-3 与欧空局的 Sentinel-2 等多时相光学卫星影像，直观地记录了锚地占用情况的演变：从 2021 年 8 月中旬的零散停泊，到 9 月下旬圣佩德罗湾两大锚地被船只密集占据，形成了蔚为壮观的“海上停车场”。影像还显示，港内集装箱堆场的颜色也随着堆叠高度的增加，其光谱反射率由浅灰色向深红色

变化。《华盛顿邮报》和《商业内幕》（Business Insider）等国际主流媒体，创新性地将这些卫星影像与 AIS 船舶位置数据叠加，制作了交互式可视化报道，首次让全球公众直观地感受到了供应链“大动脉”堵塞的真实规模。

图 3-4 卫星图片显示 2021 年 10 月 10 日洛杉矶长滩港外海面停留的货轮大幅高于 2019 年 10 月 11 日的水平。



图源：Business Insider

这一事件的价值并未停留在新闻层面。随后，Yu 等人（2023）跟进并深化了这些现实世界的经济学内涵。研究人员基于 2019-2021 年间全球 48 个主要枢纽港口的 83,672 幅 Sentinel-2 影像，采用 U-Net 语义分割算法自动提取集装箱覆盖面积，并构建了“港口拥堵指数”。随后检验结果表明，拥堵指数能够在日度频率上有效预测 27 个国家股票市场的超额收益。这一发现意义重大，它表明港口集装箱的堆积密度已经超越了单纯的物流指标，成为了反映全球需求波动和市场情绪的另类高频信号。

上述两个案例共同展示了卫星遥感在全球物流监控中的三大核心增值场景。港口卫星监测的战略价值在于，它为不同层级的决策者解决了以往无法解决的核心问题，创造了显著的经济与管理效益。首先，对于港口管理者与政府监管部门，它实现了从“被动响应”到“主动干预”的转变。传统的港口管理依赖内部运营数据和人工上报，信息存在延迟和局部性。而卫星提供了全局、统一的客观视角，使

管理者能提前识别拥堵风险，在问题恶化前主动调整泊位分配、优化堆场管理、协调集卡进出港节奏，从而提升港口的整体运营效率和应对外部冲击的韧性。

其次，对于航运公司、物流企业和进出口商，它提供了规避风险、降低成本的新工具。供应链的稳定性和可预测性是其核心竞争力。通过获取高频港口拥堵数据，航运公司可以更科学地规划航线和挂靠港序，避免将船舶派往已严重拥堵的港口；物流公司和货主则可以据此调整运输计划，选择最优的出货时机和路线，避免因港口延误产生的巨额滞期费和仓储成本，显著提升经济效益。

最后，对于金融分析师和宏观研究者，它提供了一个全新的、高频的实体经济领先指标。港口的繁忙程度是全球贸易和实体经济需求的“晴雨表”。一个覆盖全球主要港口的拥堵数据库，其数据波动可以作为预测通货膨胀、贸易差额、特定行业（如零售、制造）景气度的重要输入变量，帮助投资者更早地捕捉到宏观经济的拐点，从而做出更精准的资产配置决策。

3.1.3 交通监测

卫星遥感技术正日益应用于交通监测领域，以跨区域、高频率、全天候的独特优势捕捉各类交通活动信息。借助亚米级(分辨率小于1米)光学影像与合成孔径雷达，研究者可以观测机场跑道使用情况（如停机架次和跑道起降频率）、监测城市道路拥堵（识别道路车辆密度和排队长度）、评估轨道交通密度（例如地面列车运行频次）以及量化公路运输活跃度（如高速公路卡车流量）等。与传统地面传感器或点位监测相比，卫星可以在一次拍摄中覆盖整个城市乃至多个区域，提供同步、宏观的交通状况快照。“全天候”合成孔径雷达卫星更可穿透云层并实现昼夜成像，即使在夜间或恶劣天气下也能持续监测（Hajkova,2024）。这些遥感观测数据还能与航班数据库（如 ADS-B 航班轨迹）或交通拥堵指数等结合，交叉验证和丰富交通分析的维度。以下，本报告将通过两个案例展示卫星在监测交通方面的应用场景，以及其在经济金融市场中的应用。

案例五：新冠疫情机场停机潮

2020年3月，新冠疫情导致全球航空出行骤停。大量现役客机无处可飞，不得不集中封存于机场空地。传统的宏观航空数据，如OAG的航班计划、TSA的旅客吞吐量以及FlightRadar24的实时航班数，虽然能够准确反映航空活动量（Activity Volume）的断崖式下跌，但它们无法捕捉到另一个关键的物理现实：全球数万架现役客机的物理状态与空间分布。这些数据回答了“有多少航班在飞”，却无法回答“停飞的飞机在哪里、有多少、对机场运营造成了多大压力”。这一数据维度的缺失，限制了对此次危机物理规模和基础设施压力的实时、精准评估。

图3-5 2020年3月的巴黎戴高乐机场，大量客机被密集拖入跑道、滑行道与远机位

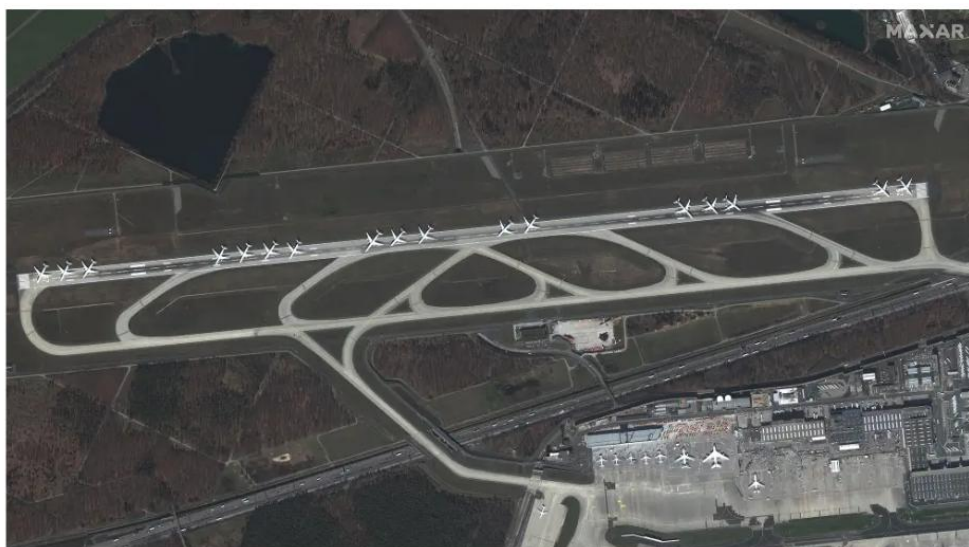


图源：Satellite image ©2020 Maxar Technologies

在此背景下，卫星遥感提供了一个无可替代的“天基”视角，将抽象的行业危机转化为直观的视觉证据。全球多家商业卫星公司发布的影像记录了欧洲多座枢纽机场罕见的“停机潮”景象。如图3-5和图3-6所示，2020年3月，巴黎戴高乐机场（CDG）与法兰克福机场（FRA）的卫星图像清晰显示，大量客机被密

集停放在跑道、滑行道乃至维修区，昔日繁忙的航空动脉俨然沦为巨大的“露天停机坪” (Slotnick, 2020)。这种高分辨率的直观证据，以前所未有的方式揭示了危机的严重程度，弥补了传统微观数据的空缺。

图 3-6 2020 年 3 月，法兰克福机场的 07L/25R 跑道上停满了等待复飞的航班



图源：Satellite image ©2020 Maxar Technologies

更重要的是，学术界与业界迅速将这些定性观察转化为定量分析，其应用可分为宏观经济和微观运营两个层面：（1）宏观层面：构建与金融市场联动的“航空活动指数”。Minetto 等人(2020)从全球 300 余幅高分辨率影像中自动提取飞机、轨道车厢等经济活动目标，构建了一个全新的高频“航空活动指数”。研究证明，该指数与官方发布的航班架次、航空燃油需求量以及相关上市公司的股票收益呈现出显著的同步关系。这展示了遥感影像能够作为一种有效的另类数据，驱动宏观经济与金融市场的联动分析，为投资者和政策制定者提供了领先的洞察视角。（2）微观层面：机场运营效率的精细化监测。Pulella 和 Sica (2021)以罗马-菲乌米奇诺机场为例，融合多源卫星数据（Sentinel-1 SAR 雷达、Sentinel-2 多光谱等），提出了一套名为“STAND-OUT”的全自动遥感流程。该方法能够自动分割停机飞机与空闲机坪，精确计算停机位占用率，甚至利用热红外数据评估机场基础设施的运转强度。该模型在像素级验证中误差低于 10%，为评估机场在

危机下的运力损失和后续的恢复节奏提供了可靠的量化依据。

总结而言，在这次全球性危机中，卫星遥感不仅以其独特的视觉冲击力揭示了航空业停摆的物理规模，更通过与先进算法的结合，催生了能够量化运营压力、洞察宏观经济、并与金融市场相关联的新型分析工具，充分展示了其在现代经济监测中的重要价值。

案例六：虚拟新加坡交通仿真平台

“虚拟新加坡 (Virtual Singapore)” 由国家研究基金会 (National Research Foundation, NRF) 与新加坡土地管理局 (Singapore Land Authority, SLA) 牵头，于 2014 年立项，总预算约 7,300 万新元，旨在打造覆盖全国、精度约 0.3 米的三维数字孪生平台 (SLA, 2014; Stone, 2017)。项目首先通过航拍影像与机载激光雷达采集地形表面数据，形成“新加坡高级地图 (Singapore Advanced Map)”骨架；随后使用车载移动测绘对约 5,500 km 公路网进行扫描，获取超三百万张全景照片与逾 6 亿个 LiDAR 点云，并借助 Bentley MicroStation 将模型精度提升至 0.3 m。在此基础上，平台还融合“智慧国 (Smart Nation) 部署的物联网 (IoT) 实时传感器流（如交通流量、环境监测数据），以及政府多部门业务数据，使三维模型可持续动态更新，为交通仿真与城市管理提供高可信度的数据底座 (Geospatial World, 2022; van Wegen, 2022)。

凭借精细完整的数字城市模型，“虚拟新加坡”平台能够支持多层次的交通仿真和政策演练。一方面，在交通领域，平台允许用户模拟不同条件下的城市交通状况。例如，规划部门可以在虚拟环境中分析道路交通流量变化、测试各类公共交通优化方案（如公交线路调整、地铁增容等），识别潜在拥堵点并评估缓解措施。平台还支持自动驾驶路径测试：相关企业可在数字孪生城市中试跑自动驾驶车辆，上线新算法，在不影响现实交通的情况下检验其对复杂城市路况的适应性。据报道，新加坡政府就曾表示计划利用该平台让企业“在不实际上路的情况下，于虚拟新加坡中测试无人驾驶汽车”。另一方面，在政策演练与城市治理方面，虚拟新加坡可模拟多种假想情景，从大型活动人群疏散、交通管制一直到突发灾

害应对。比如，安全部门可以演练如果在体育馆发生炸弹威胁时如何调度警力疏散人群（这一功能也引发了安全部门对于平台可能被不法分子恶用的担忧）。而且，城市管理者能够模拟极端事件对交通的影响——平台内置的模型可对风暴、洪水等灾害情景进行推演，评估道路、桥梁在不同灾害下的受损和阻塞情况，以改进应急预案。通过这些仿真功能，虚拟新加坡成为城市规划者和决策者的“数字试验场”，可以在虚拟环境中提前发现问题、优化方案，然后再指导现实世界的执行。

基于相同的数字孪生框架，新加坡陆续将空域网格、飞行限制区和无人机航迹整合进平台，在已有地面交通模型之上拓展“空中维度”，对载人 eVTOL (electric Vertical Take-Off and Landing) 与配送无人机的空地协同进行仿真、冲突检测与噪声影响评估。平台可实时模拟飞行密度在高层建筑之间的分布特征，结合地面环境噪声数据库，评估 UAM (Urban Air Mobility) 运行对城市居民日常生活的潜在干扰，从而探索低空经济在高密度城区中的安全边界与环境阈值 (Yiu et al., 2021)。最新研究进一步表明，借助数字孪生驱动的城市空中交通模型，不仅可以在分钟级尺度上实时更新空域容量，还可根据历史与实时需求数据动态优化 UAM 航线网络结构，并预测未来起降时段的容量峰值，从而支撑城市在高密度航班条件下的飞行时隙分配、地面联运接驳和能源供给调度 (Bubalo, 2024)。这一融合地-空一体化的三维孪生系统正成为支撑低空经济精细化治理、绿色飞行路径设计及城市空域立法的重要基础设施。

综上，卫星遥感交通监测在政府、企业和金融市场分析中展现出多元且实用的价值。对于政府治理，它提供了宏观视角下的实时交通态势感知，支持交通管理部门进行主动调度和应急指挥。例如，管理者可依据卫星监测到的高速公路拥堵分布，及时调整信号配时或引导分流，从而缓解区域交通压力。对于企业决策，遥感数据有助于物流和运输企业进行运力优化：通过分析卫星追踪的卡车线路和港口集疏运动态，企业可以改进供应链路线选择和车队调度，降低运输成本并提高准时率。此外，遥感所生成的交通指标还能反映整体经济活跃度，成为金融领先指标的一部分。例如，一些投资机构将城市夜间灯光强度和白天交通繁忙程度

纳入宏观模型，用以预测消费需求和工业生产的变化趋势（Lee, 2025）。这种由遥感大数据衍生的领先指标可为资产配置和政策制定提供前瞻信号，有效弥补传统数据发布滞后的不足。总而言之，卫星遥感交通监测以其“天空视角”的独特优势，正在从提升城市治理到赋能商业决策再到丰富金融分析工具箱等方面发挥日益重要的作用。它既可以帮助城市打造更智能高效的交通体系，又能够为投资者和决策者提供洞察经济运行的新型指标，其综合效益在实践中已得到逐步验证和体现。

3.1.4 环境检测

近年来，卫星遥感技术的发展为环境检测提供了全新的技术路径，尤其是在大气污染与温室气体排放的空间识别方面展现出前所未有的优势。例如，欧洲空间局发射的 Sentinel-5P 卫星搭载 TROPOMI 高光谱传感器，能够在紫外-可见光（270–500 nm）与短波红外（2305–2385 nm）波段下，通过差分吸收光谱技术（DOAS）精准反演大气中 CO₂、CH₄等温室气体的柱浓度分布。其 7×7 公里的高空间分辨率与每日全球覆盖能力，使得对工业点源的排放量化误差控制在±15%以内。更重要的是，这类遥感数据正在被碳金融市场直接采纳，如欧洲能源交易所（EEX）已将基于卫星观测的月度排放强度纳入 EUA 期货定价模型，2023 年使碳价波动率降低 22%。以下，本报告将通过三个案例展示卫星在环境检测方面的应用场景，以及其在经济金融市场中的应用。

案例七：卫星量化观测全球工业排放

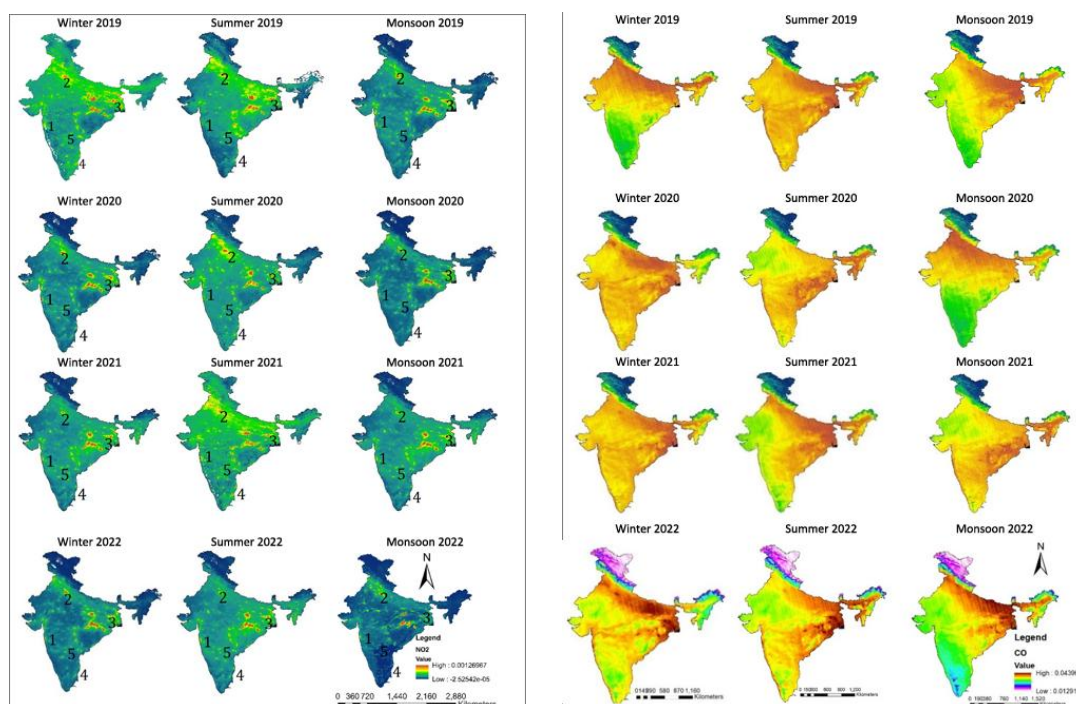
2020 年 3 月 11 日，世界卫生组织（WHO）宣布新冠肺炎（COVID-19）构成全球性大流行。各国为抑制疫情传播，陆续实施封锁与隔离政策，大量工业活动与交通出行陷入停滞。在疫情对经济、民生造成剧烈冲击的同时，突如其来的“人为减排”也为研究污染源识别与环境干预成效提供了前所未有的“准自然实验”窗口。

在这一背景下，如何在缺乏地面观测网的地区、以高时效性和广覆盖性手段监测大气排放水平，成为政策制定者和科研机构的共同诉求。2020 年，为应对新

冠疫情带来的影响，欧洲空间局（ESA）启动了名为“新冠病毒与地球观测快速响应行动”（Rapid Action on Coronavirus and Earth Observation, RACE）的计划。在该框架下，ESA 基于 Sentinel-5P 卫星搭载的 TROPOMI 高光谱传感器系统，对全球工业排放动态展开了高频次、全球覆盖的遥感监测。TROPOMI 具备 $3.5 \times 7 \text{ km}^2$ 的空间分辨率和每日全球覆盖能力，能实时捕捉 NO_2 、 SO_2 、 CO 与 O_3 等关键污染物的对流层柱浓度变化，监测数据以 Column Number Density (CND) 表示，单位为 mol/m^2 。项目团队结合 Google Earth Engine (GEE) 平台与 ArcGIS 空间分析算法，开展跨年度（2019–2022）的大气污染热点识别、时序变化评估与区域异质性分析。研究方法包括热区提取、季节分布分析与 Zonal Statistics 等工具，通过将污染物栅格数据与城市边界矢量图层叠加，量化不同城市及区域的污染浓度变化趋势。

图 3-7

2019 - 2022 年印度五大城市的二氧化氮（左图）一氧化碳（右图）柱密度图



图源：<https://www.nature.com/articles/s41598-024-72276-4>。

该研究在印度五大城市的分析结果提供了典型佐证：2020 年在封锁最严格的时期， NO_2 浓度较 2019 年显著下降——孟买下降 20%、德里下降 18%、加尔

各答下降 14%、钦奈下降 12%、海得拉巴下降 15%。以德里为例，其 2020 年 NO_2 平均柱浓度为 0.000135 mol/m^2 ，较 2019 年 0.000165 mol/m^2 下降明显，且远低于 2022 年解封后的反弹值 0.000185 mol/m^2 (Mathew et al., 2024)。监测数据也清晰呈现出疫情爆发初期多个工业核心区的污染物排放大幅下降的特征：2020 年 1–3 月，中国长三角地区 NO_2 对流层垂直柱浓度的均值从 $2.5 \times 10^{15} \text{ molecules/cm}^2$ 骤降至 $1.2 \times 10^{15} \text{ molecules/cm}^2$ ，降幅达 52%；同期，意大利伦巴第大区的降幅亦高达 47%。

这一系列观测结果得益于 TROPOMI 系统在多光谱波段上的高灵敏度成像能力和 DOAS 算法对气体浓度的精确反演。通过连续、同轨的高频扫描，系统可实现日尺度、全球级别的大气柱浓度捕捉，并在 $3.5 \times 7 \text{ km}^2$ 的空间分辨率下实时捕捉 NO_2 、 SO_2 、 CO 与 O_3 等关键污染物的对流层柱浓度变化。相比传统地面监测依赖站点布设与人工上报的模式，该方式不仅在覆盖范围与数据一致性上具备天然优势，更大幅提升了突发冲击背景下的响应速度与区域识别精度。

上述遥感结果不仅在科研层面引发关注，也迅速进入国际环境治理的政策框架。联合国环境规划署 (UNEP) 在《空气质量行动报告》(Actions on Air Quality: A Global Summary of Policies and Programmes to Reduce Air Pollution) 中，正式采纳了 ESA 提供的遥感数据作为疫情期间工业排放变化的核心证据来源，确认封锁政策在短期内可使区域工业排放削减 40–60%。

案例八：遥感技术追踪甲烷排放

在全球气候议程中，甲烷减排已成为关键战场。作为仅次于二氧化碳的温室气体，甲烷的 20 年全球增温潜势 (GWP) 是二氧化碳的 80 倍。其中，石油和天然气行业是最大的人为排放源，占比超 40%，且其排放多为难以追踪的无组织、间歇性泄漏。与此同时，传统的碳资产核查（如碳信用）普遍依赖项目方申报与历史估算，难以捕捉突发泄漏等“非线性”排放风险，这构成了环境监测与碳市场诚信度的核心挑战。

为解决这一监测难题,加拿大 GHGSat 公司构建了全球首个专注于温室气体点源监测的商业遥感卫星星座。截至 2024 年 12 月,该星座已部署 12 颗卫星,均搭载高分辨率短波红外(SWIR)成像光谱仪,可提供 25 米的空间分辨率。该技术无需地面设备,即可直接对甲烷、二氧化碳等气体的排放羽流进行定位与独立量化。国际权威期刊《地理物理研究》(Journal of Geophysical Research)的评估指出, GHGSat 系统对柱浓度反演的测量精度高达 2-5%,其数据已被纳入 BP 等能源巨头的排放报告验证体系。

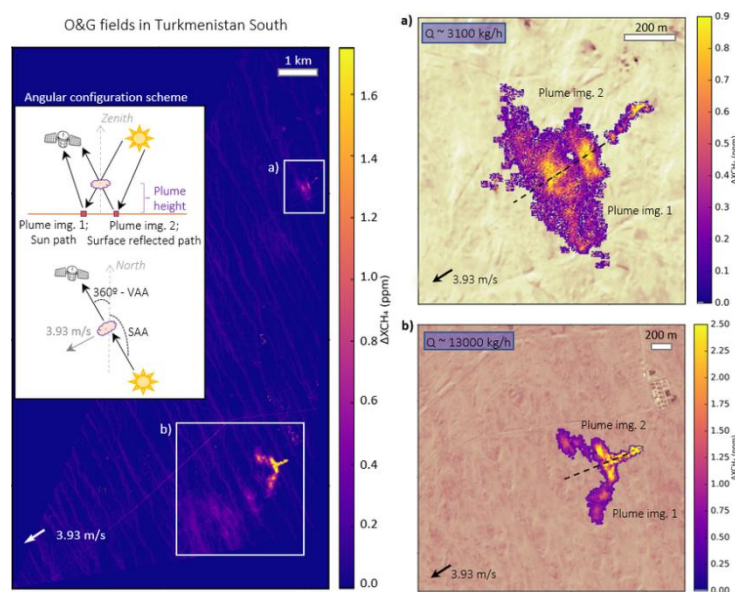
图 3-8 GHGSat 任务概述及结构设计图



图源：[GHGSat Constellation - eoPortal](#)

该系统的实战能力在 2021 年 2 月的一次意外发现中得到展现。GHGSat 的商业卫星在监测土库曼斯坦西部时,捕捉到邻近的 Korpezhe 油气田发生大规模甲烷泄漏。卫星影像清晰识别出 8 条排放羽流,最大泄漏速率超过 10,000 公斤/小时,单次事件总排放量超 60 吨。按 IPCC AR6 报告提出的 GWP 换算模型计算,该泄漏事件相当于燃烧约 1800 吨煤炭所带来的温室效应(Bloomberg News, 2021)。此次发现表明 GHGSat 系统能有效穿透复杂环境(如管线、火炬混合区域),识别出多源点混合排放,并在同一轨次内定位多个点源排放行为,证实了该技术能够穿透复杂的工业环境,精准定位并量化以往无法捕获的“隐性排放”,验证了其作为“超级排放”监测工具的高度敏感性与可靠性。

图 3-9 2021 年土库曼斯坦 Korpezhe 油田泄露卫星拍摄甲烷羽流图



图源：https://www.researchgate.net/figure/DXCH4-map-produced-from-the-real-image-of-Turkmenistan-South-Korpezhe-OG-field-on_fig11_367752017

高精度、高频次的卫星监测数据正在成为连接环境事实与金融资产的关键数据桥梁。一方面，它为企业碳管理提供了可靠依据。GHGSat 已为雪佛龙、壳牌等主要油气企业及多国政府提供数据服务，其远超常规科学遥感系统的分辨率，为企业的内部碳定价、ESG 信息披露和碳负债管理提供了前所未有的精确度。另一方面，它重塑了碳市场的信任机制。通过提供独立、客观的物理可观测指标，卫星遥感能够实时揭示高排放行为，为碳信用评级机构和碳金融产品设计者提供了高度可靠的基础变量，从根本上提升了碳资产的真实性与可验证性。

总的来说，上述两个案例共同展示了卫星遥感在全球环境监测与绿色金融中的三重增值价值。首先，在政策监管层面，遥感技术实现了从“滞后监测”到“实时响应”的治理跃迁。传统的工业排放与温室气体核查多依赖地面监测站点和企业自报数据，存在空间覆盖不足与信息滞后等问题。而高分辨率、全球覆盖、日尺度更新的遥感系统，则能够在封锁、突发泄漏等极端背景下实现高频观测，使监管机构可在第一时间识别排放热点、评估政策成效，从而将环境治理从“事后问责”前移至“事前干预”。

其次，在企业运营和风险控制层面，卫星遥感为能源、制造与交通等高排放行业主体提供了独立可信的测量工具。无论是通过 GHGSat 等商业平台进行点源排放自查，还是通过 ESA 等国际机构共享的数据进行行业基准对比，企业均可在信息透明基础上提升环境合规水平，并将排放数据嵌入自身的 ESG 绩效体系，降低未来碳监管或碳定价的制度性风险。

最后，在碳金融与绿色资产定价体系中，遥感数据正逐步成为连接环境事实与金融合约之间的“信息基础设施”。碳信用产品的核心价值在于“可验证的额外减排”，而卫星遥感通过提供物理可观测、不可篡改、可重复验证的排放指标，有效提升了碳资产的透明度与定价效率。这不仅增强了碳金融市场的抗操纵能力，也为未来碳价格信号更好地反映真实减排成本奠定了数据基础。

案例九：InSAR 技术在矿区安全与环境监测中的应用

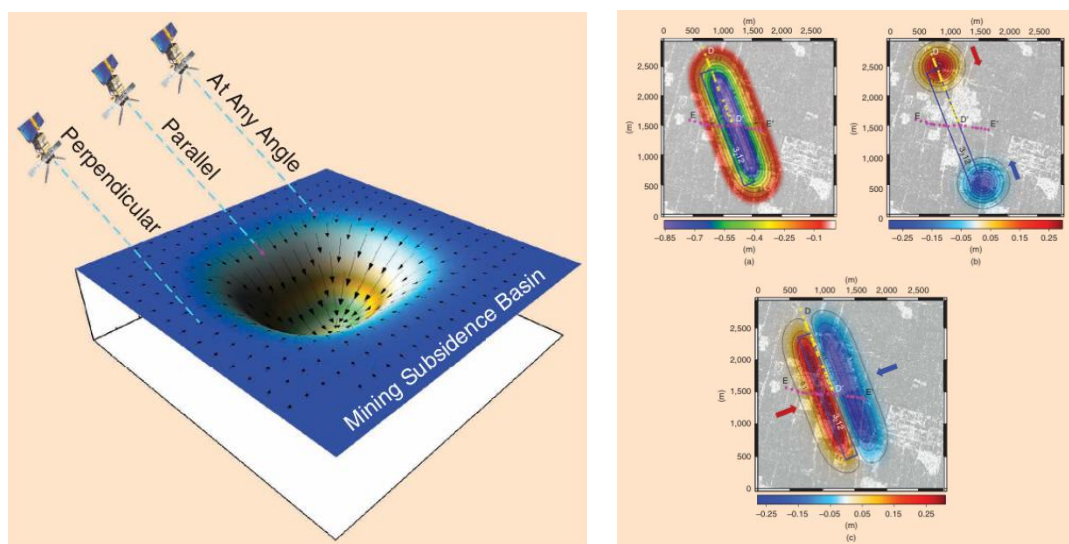
在大宗商品供应链的上游，采掘活动引发的地表沉降与边坡失稳是矿区面临的重大安全隐患。传统的监测手段如 GPS 或水准测量，虽精度高但覆盖范围有限、成本高昂，难以对广阔的矿区进行全面、连续的风险排查，导致许多“隐性”的地质风险难以被提前发现。

合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术为此提供了解决方案。其基本原理是利用卫星雷达对同一区域进行两次或多次成像，通过分析返回信号的微小相位差，反演出地表在两次成像期间发生的毫米级形变。与传统方法相比，InSAR 具备覆盖范围广（单景可达 250km）、空间分辨率高（5m×20m）、全天候工作且成本效益显著等优势，能够弥补地面监测的不足，为矿区的灾害评估和风险预警提供关键数据支持。

InSAR 技术的实战能力在西班牙 Riotinto 铜矿得到了充分验证。该矿地处全球最大硫化物矿带之一，地质断裂发育，地表滑移风险高，传统 GNSS 覆盖受限。Escayo et al.(2022)利用欧空局 Sentinel-1 卫星的雷达数据和先进的 A-DInSAR

处理方法，构建了覆盖整个矿区的三维形变监测系统。研究成功识别出 4 个主要变形区，其中一个废弃矿的东坡年均沉降速率高达 11 厘米，构成了严重的滑坡隐患。同时，Sentinel-1 卫星凭借 6 天重访周期与超 14,000 个有效监测点，相比前代 ERS (3,586 点) 与 ENVISAT (5,507 点)，显著提高了数据覆盖密度。研究验证了 SAR 数据在无现场设备条件下识别“隐性风险”的能力，为矿产安全开采与绿色金属供应提供了前瞻性工具，也展示了遥感数据对传统 PMI 与工业报告体系的有力补充。

图 3-10 SAR/InSAR 的矿业形变 3D 视图（左图）及利用概率积分法的沉降走向反演模型参数（右图）



图源：<https://html.rhhz.net/CHXB/html/2019-2-135.htm>

3.2 卫星遥感数据助力行业及微观层面监测分析

3.2.1 公司经营活动监测

在微观层面，企业是经济系统中资源配置与价值创造的基本单元，其生产状态直接反映出区域经济的活跃程度与产业运行的真实脉动。然而，传统企业运营监测依赖统计报表与抽样调查，不仅存在填报滞后与主观偏差等问题，更难以覆盖中小企业、边远地区及高频动态。面对全球供应链日益复杂与突发事件频发的挑战，如何以高时效性、高空间解析度的手段动态感知企业经济行为，成为提升政策响应速度与风险防控能力的关键所在。近年来，卫星遥感技术，尤其是热红

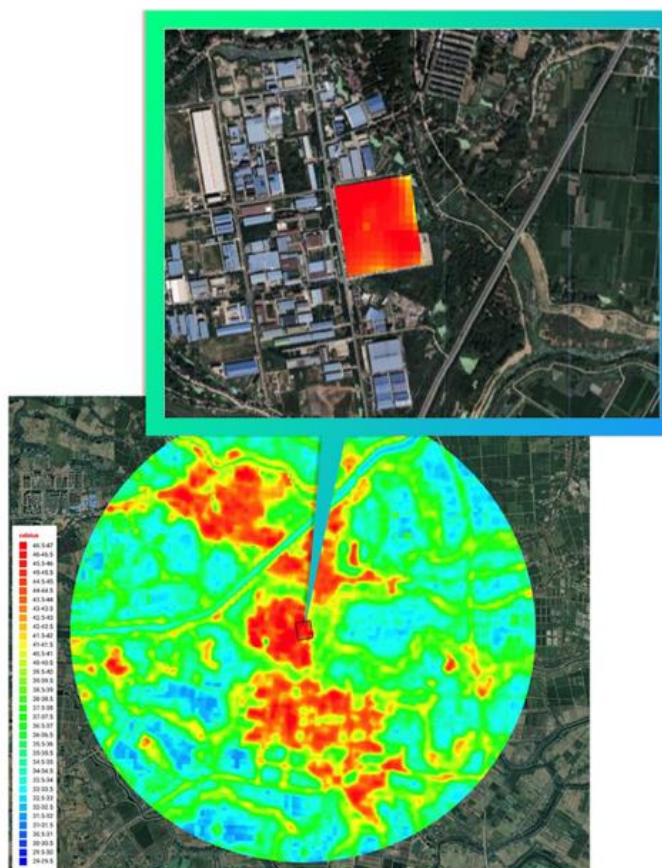
外成像与夜间灯光监测的不断成熟，为工业企业生产活动的非接触式感知提供了新的解决方案。通过捕捉企业厂区的热辐射特征与夜间照明强度变化，能够实时评估设备运转状态、产线活跃程度与用能效率，为企业运营状态构建出连续、动态的观测图谱，丰富了经济活动监测的工具箱。

案例十：尔特数科热辐射遥感识别企业生产经营状况——企业监测与恒力石化检修事件

企业经营活动的实时监测一直是投资者面临的核心挑战，传统的财务报告存在显著滞后性，使日常生产运营信息如同一个“黑箱”。然而，一项基于基础物理学的遥感技术，即热红外辐射（Thermal Infrared Radiation, TIR）监测，正在打开这个“黑箱”。

该技术原理根植于热力学定律，即任何消耗能源的实际活动，无论是机械运转还是化学反应，都不可避免地会因熵增而损失部分能量，并以热能的形式散发。工业生产作为能源密集型活动，其工厂在运营时会产生大量热量，这些热量以 TIR 的形式持续向外辐射，并可以被卫星精确捕捉。因此，一家工厂 TIR 信号的强弱，直接、客观地反映了其生产经营活动的“新陈代谢”强度。利用该原理，尔特数科工厂级热辐射数据能够精准提取我国上市公司工厂热辐射值，图 3-12 便展示了合肥江淮汽车工厂生产状况。

图 3-12 利用卫星遥感热辐射监测合肥江淮汽车工厂生产状况



图源：Xue et al. (2025)、尔特数科

该方法已在近期的权威学术研究中得到大规模、系统性的验证。利用 NASA 的 Landsat 8/9 卫星数据，对 2014 至 2022 年间中国 3,188 家上市制造公司的 29,973 家工厂进行了 TIR 监测(Xue et al., 2025)。他们发现，企业当季的 TIR 变化，与其未来一到三个季度的销售额增长呈显著正相关。平均而言，一家企业的 TIR 若出现一个标准差的增长，其下一季度的销售额增长将随之提升 5.42%。这证明了 TIR 是一个强大的、具备前瞻性的基本面领先指标。此外，他们进一步发现，TIR 的预测能力在信息不透明的环境下尤为突出，因此卫星遥感数据是获取金融市场信息优势的来源。当投资者实地调研不便（如工厂远离高铁站）或企业财报质量较低（如盈余管理程度高）时，TIR 作为客观的第三方数据源，其对股价的预测能力会变得更强。

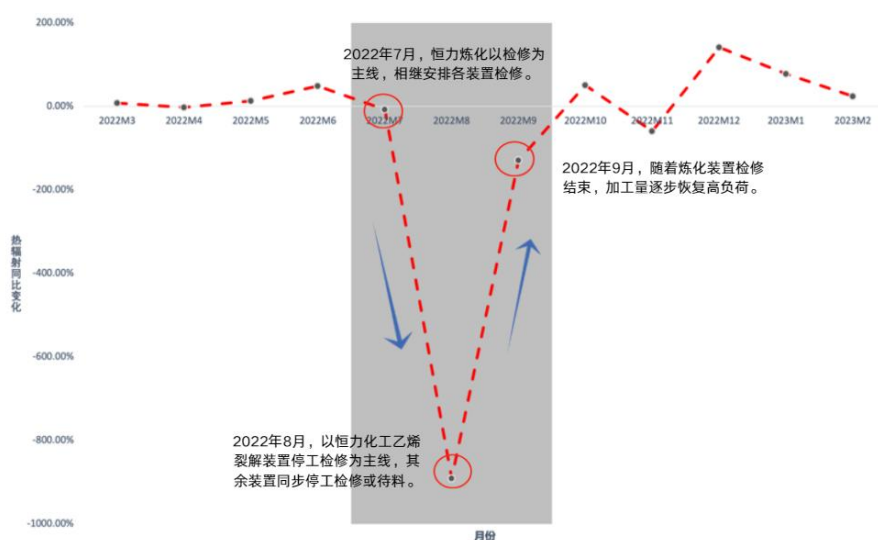
进一步地，TIR 预测能力在恒力石化案例中得到了生动体现。恒力石化（大

连)炼化有限公司(以下简称“恒力炼化”)于2022年7月按计划对部分生产装置进行例行停工检修,以保障设备安全运行及工艺优化。此次检修涉及常减压、芳烃等关键装置,检修期间产能相应调整。公司于2022年11月12日通过上海证券交易所官网发布《关于子公司装置检修进展的公告》,对检修情况进行了正式披露,并明确检修工作已于公告前顺利完成。这类延迟披露属常规操作,上市公司通常不在检修开始时单独公告,而是在后续披露影响或完成情况。

图 3-13 卫星遥感数据提前预知恒力石化停机检修



图源：搜狐新闻



图源：尔特数科

然而尔特数科利用卫星遥感技术所计算的热辐射数据集，凭借其高精度和高频率的数据采集能力，成功利用热辐射数据提前 3 个月监测出恒力石化的生产异常情况。在 2022 年 8 月，尔特数科的热辐射数据监测系统捕捉到恒力化工乙烯裂解装置的热辐射强度突然下降，与正常生产时的热辐射强度相比，下降幅度超过 30%（参考图 3-12）。同时，监测到其他装置的热辐射强度也出现了不同程度的下降，部分装置的热辐射强度几乎接近于零，表明这些装置已经停工或处于待料状态。通过对比历史热辐射数据和生产周期规律，系统判断恒力炼化可能出现了生产异常情况，如设备故障或检修导致的生产中断。

进入 2022 年 9 月，热辐射数据监测系统显示，恒力炼化各装置的热辐射强度逐渐回升，乙烯裂解装置的热辐射强度恢复到正常生产水平的 80% 以上，其他装置的热辐射强度也呈现出稳步上升的趋势。这表明炼化装置的检修工作已经结束，生产活动逐步恢复正常，加工量开始恢复高负荷运转。监测结果与企业后续的生产恢复情况高度吻合，进一步验证了热辐射数据监测企业生产异常的准确性。说明热辐射数据提前 3 个月便捕捉到了这一消息并早于市场得知这一生产异常信息，在企业生产经营监测方面展现出了巨大的潜力和价值。

该监测能力得以实现，其原理在于工业生产本质上是一个能量释放过程。在经济活动中，低熵原材料转变为商品和服务时，会排放高熵废物并产生可观测的热量。在工业生产中，企业的生产活动往往伴随着大量的热能产生和释放，如炼油、化工、钢铁等行业的高温炉窑、反应釜、生产线等设备在运行过程中会产生大量的热量。当企业生产正常时，生产区域的热辐射值会呈现出一定的规律性和稳定性，如热辐射强度随生产周期的变化而变化，或者在一定时间段内保持相对稳定。然而，当企业生产出现异常情况时，如设备故障导致生产中断、原材料短缺导致生产停滞等，生产区域的热辐射数据会发生明显的变化，如热辐射强度突然下降或出现异常波动。因此，通过监测工厂或生产区域的热辐射值可以捕获企业生产经营状况。这种基于热辐射数据的监测方法，相较于传统的财务数据或人工巡查，具有更高的时效性和准确性。

综上所述，尔特数科热辐射数据不仅为商业分析提供了新的视角，而且通过

先进的技术手段，使得基于卫星遥感技术的生产经营监测思路得以实现，为投资者和决策者提供了一种全新的数据驱动的决策工具。

3.2.2 行业监测

卫星遥感不仅在企业经营活动监测中展现出强大能力，也正在重塑产业分析的技术范式。随着遥感技术特别是高时空分辨率影像与人工智能算法的融合突破，分析者得以在全球尺度上直接观察工业设施的运行状态、产能利用与供需动态，为产业链的精细化追踪与周期拐点识别提供了前所未有的可视化工具。

案例十一：行业碳排放监测

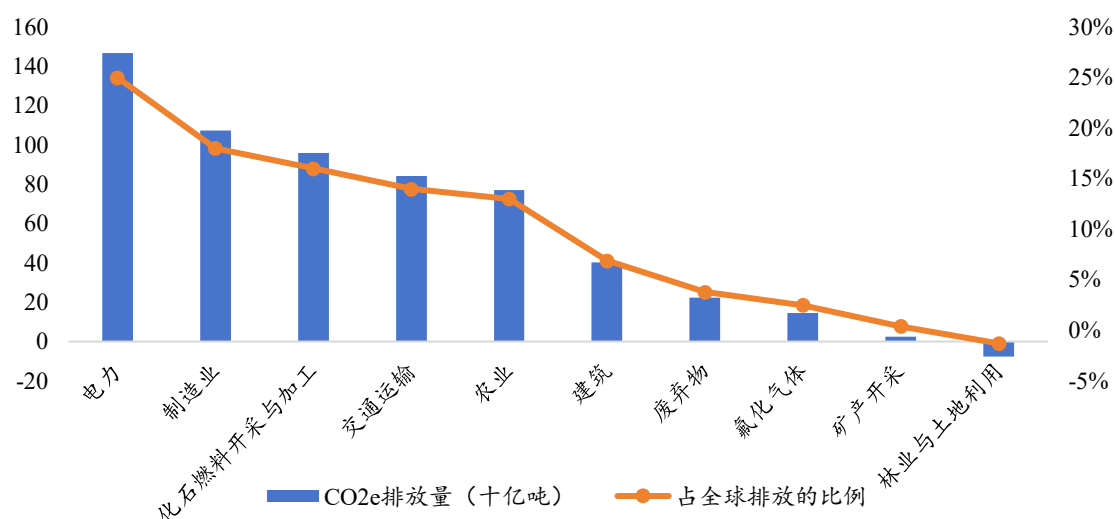
在应对气候变化的全球行动中，识别和量化温室气体排放源是构建有效减排机制的前提。然而，传统的排放核算体系受限于数据滞后、区域盲区与核验成本高等问题，难以满足全球范围内对高频、可核查排放信息的迫切需求。随着遥感技术与人工智能的融合突破，这一局面正在被重塑。通过捕捉热辐射信号、烟羽、热力特征等高空观测线索，遥感卫星得以追踪静态设施与动态载体等多类型排放源的活动强度，并辅以“地面实测”与行业数据库共同训练算法模型，从而实现对排放行为的独立识别与定量反演。这一跨界集成框架不仅提升了全球排放清单的实时性与透明度，也为产业分析、政策评估和绿色金融提供了全新的基础设施。

以 Climate TRACE 为代表的遥感排放监测系统，正以前所未有的时空覆盖与行业适应能力，构建起全球最大规模的设施级碳排放数据库，为全球 660 多万个排放资产提供可视化、可验证的排放画像。Climate TRACE 是由全球多个科技企业和研究机构组成的国际联盟，旨在结合多源卫星遥感与人工智能，实现对全球二氧化碳排放源的独立、透明和实时监测。Climate TRACE 集成来自 11 类卫星平台和数百种传感器数据，通过人工智能算法，特别是卷积神经网络（CNN）与时序分析模型，对标识出的设施进行排放源可视识别与排放量反演。其数据应用领域覆盖电力、石油天然气、冶金与采矿、水泥生产、交通、农业、废弃物管理、林业、建筑及制造业十大关键排放行业。数据库包含超过 72,000 多个大型设施

级排放源（如电厂、炼油厂、钢铁厂、水泥厂等），是目前规模最大、分辨率最高的设施级开源碳排放监测最全面的数据集之一。

根据 Climate TRACE 公布的数据，自 2015 年 1 月至 2024 年 12 月，该系统共监测全球温室气体排放总量达 5850.9 亿吨二氧化碳当量（CO₂e）。在所有行业中，电力行业是最大的排放源，总排放量达到 1468.6 亿吨 CO₂e，占全球排放总量的 25%。在电力行业内部，发电板块贡献了最多的排放量，达 1289.1 亿吨 CO₂e，占全球总排放量的 22.12%。该数据基于高分辨率卫星遥感影像与机器学习模型，通过识别火力发电厂的运行特征并结合国家发电数据及碳排放因子推算而得。此外，其他能源使用排放总量为 172.2 亿吨 CO₂e，占比 2.96%，该数据系在 EDGAR 数据库基础上减去电力相关排放后估算；区域供热设施排放为 7.3 亿吨 CO₂e，占全球排放的 0.13%，通过各国社区级燃料消耗量进行估算。制造业是第二大排放行业，累计排放量为 1072.3 亿吨 CO₂e，约占全球排放总量的 18%。其中水泥制造板块尤为突出，排放量高达 225.8 亿吨 CO₂e（3.88%），显著高于化工制造（58.4 亿吨）与铝冶炼（42.0 亿吨）（Climate TRACE, 2024）。

图 3-14 Climate TRACE 统计各行业温室气体排放量（2015 年 1 月--2024 年12月）



图源：<https://climatetrace.org/>

以水泥行业检测为例, Climate TRACE 构建了全球首个设施级遥感碳排放估算模型, 使用 Sentinel-2 (10m) 与 Landsat-8/9 (30m) 热红外影像, 通过 Google Earth Engine (GEE) 批量下载和校准后, 开发出热异常指数 (Thermal Anomaly Index, TAI), 监测熟料窑活跃状态。共识别出分布于 138 个国家的 2,241 家熟料生产设施, 数据每月更新一次, 对无法获取热信号的工厂则采用“区域平均外推法”估算排放, 显著提高了覆盖范围和估算精度。该方法可追踪约 93% 的估算排放量, 覆盖全球 68% 的水泥行业直接排放, 并已在实际排放与统计产量之间建立显著相关关系, 证实遥感结果可作为排放强度建模依据(Sinha & Crane, 2024)。

目前 Climate TRACE 所提供的数据已被多个行业与监管场景实际采纳。例如, 在 STARRS 泛星计划中, Climate TRACE 与 The Climate Group、Under2 Coalition 合作, 为至少六个国家与地方政府提供设施级排放估算, 解决排放申报滞后与缺失问题, 助力政策制定与季度清单更新。在金融场景中, 一家埃及商业银行利用其设施排放数据评估 80% 以上贷款企业的碳排放风险, 应用于 PCAF 对齐与绿色信贷决策。资产管理与咨询机构, 如 Joint Impact Model Foundation 与 Kearney 也将其数据纳入投资组合碳足迹测算与供应链脱碳路径规划。此外, Bloomberg 分析指出, Climate TRACE 揭示了部分美国油气企业自报排放严重偏低, 引发对数据实测优先原则的监管讨论(Hooper, 2025)。联合国气候变化框架公约 (UNFCCC) 与国际能源署 (IEA) 亦已正式采纳其设施级遥感结果作为独立验证与补充信息源。

总体而言, Climate TRACE 所代表的遥感碳监测模式, 正在从学术前沿走向政策与金融决策实践, 标志着遥感数据在行业分析与环境治理中已具备可操作性与公信力。

案例十二：基于遥感数据的零售业运营强度识别与业绩预测

在数字化与大数据驱动的零售行业研究中, 传统销售数据往往存在发布滞后、缺乏空间精度等限制。近年来, 遥感技术, 尤其是对停车场车流量的卫星影像分析, 逐渐成为捕捉零售企业经营动态的重要工具。相比财报、POS 机刷卡等内部

数据，遥感数据具备非依赖性、可实时观测和覆盖面广等优势，可为投资者和研究者提供零售活动的客观“外部视角”。美国第三方地理空间数据公司 RS Metrics 的核心产品 TrafficSignals™ 自 2010 年起即通过监测超过 65,000 个美国零售门店的停车场流量，为客户提供高频率、覆盖广的客流监测数据，广泛应用于零售行业趋势分析。如下案例展示了该技术在企业层面与行业层面的强大应用潜力。

在 2014 财年第一季度，美国主要零售商沃尔玛的同店销售额同比下降 1.4%，管理层将原因归结为工资税上调、退税推迟和严寒天气等外部因素。然而，基于卫星遥感的第三方数据提供了更为直观的解释依据。RS Metrics 公司利用其卫星影像分析平台对全美 4000 余家沃尔玛门店的停车场车流量进行监测，测得该季度车流量下降 2.0%，与官方公布的 1.8% 的顾客流量下滑高度吻合(RS Metrics, 2013)。这表明遥感观测可在无须依赖企业自报的情况下，对零售客流变化进行精准跟踪。

图 3-15 RS Metrics 于 2016.9.19 拍摄的 Target 商店停车场卫星图片



图源：Quartz (<https://qz.com/1652293/how-to-make-money-with-rs-metrics-and-orbital-insight-space-data>)

进入 2014 财年第二季度, RS Metrics 检测到沃尔玛车流量同比增长约 1.0%, 其中 5 月增长 1.3%、6 月增长 0.2%、7 月增长 1.7%, 反映出门店活跃度的边际改善趋势。其报告预测, 这一回暖迹象将有助于公司扭转负增长态势, 实现正向同店销售增长。进一步地, 沃尔玛于 2013 年 8 月 15 日发布的季度财报确认了这一预测, 正式宣布美国市场交易量实现同比增长。这一案例验证了遥感交通数据可作为零售业绩“先行指标”应用于销售预判和投资决策中, 在传统数据滞后发布的背景下, 为投资者提供了前瞻性洞察。

总体而言, RS Metrics 与遥感数据在零售行业的成功实践, 展示了遥感技术在替代传统数据、提升行业分析准确性方面的巨大潜力。从停车场流量监测到资本市场预期研究, 遥感技术正逐步成为产业分析中可量化、可规模化的“外部信号源”, 为投资者与研究者打开新的数据维度。

案例十三：卫星遥感见证经济动态——中国消费与制造活动的遥感透视

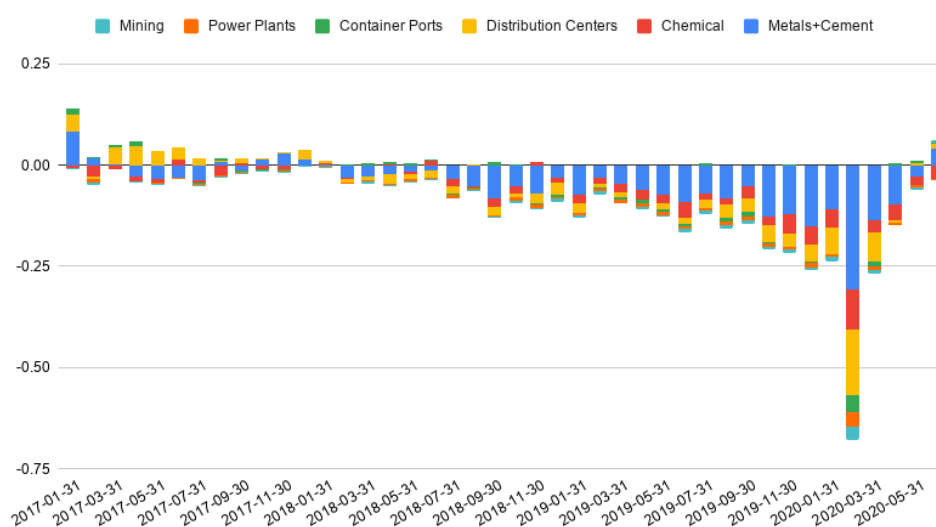
官方宏观经济指标, 如采购经理人指数 (PMI), 是判断经济景气度的核心依据, 但其通常按月发布, 数据存在约四周的时间滞后。在经济快速波动或面临外部冲击的时期 (如疫情封控), 这种滞后性使得投资者、供应链管理者和政策制定者难以实时评估经济状态。为解决这一痛点, 利用卫星遥感进行高频、客观的经济“即时播报” (Nowcasting) 应运而生。

总部位于硅谷的遥感经济分析公司 SpaceKnow, 率先将这一理念产品化, 其推出了中国卫星制造业指数 (SMI), 并使其成为首个在彭博终端 (Bloomberg Terminal) 上线的卫星数据交易指数。该指数的构建方法论是: (1) 海量数据基础: 分析了过去十余年间覆盖中国的超过 20 亿张卫星照片。(2) 物理活动监测: 聚焦 6000 多个关键工业站点, 通过 AI 算法自动分析图像变化, 如园区内的卡车数量、周转频率、原材料堆积等物理信号, 而非依赖问卷调查。(3) 高频更新: 指数每周更新三次, 与官方 PMI 约四周的滞后相比, 提供了无与伦比的时效性, 成为传统经济指标的有力补充。

SMI 及其背后的遥感分析方法论在 2022 年为外界观察中国经济提供了同步、客观的验证。例如，2022 年 8 月，当官方 PMI 数据显示**制造业活动**收缩时，卫星遥感提供了更细颗粒度的实时证据：不仅工业站点的活动强度减弱，同一套分析方法还揭示出消费和物流领域的同步疲软。监测显示，当时中国主要电商配送中心的卡车流量已低于 2020 年疫情初期水平，同时大型购物中心的停车场车辆数量也显著低于前一年同期，这些“空间信号”共同印证了经济面临的下行压力。

从高空捕捉物理信号，到构建可交易的 SMI 指数，SpaceKnow 的实践证明，卫星遥感与 AI 技术正在重塑宏观经济的监测路径。相比传统数据的延迟与主观性，这种以客观图像为基础的高频分析体系，实现了对产业动态的同步把握。它不仅为政策评估和资产交易注入了新的数据维度，也为其他国家和行业的经济监测提供了可借鉴的“空天数据+经济决策”新范式。

图 3-16 SpaceKnow 发布中国卫星制造指数（CN SMI）



图源：SpaceKnow

3.2.3 大宗商品监测

大宗商品市场历来对全球经济动向极其敏感，其供需变化直接影响矿产开采、能源贸易、农产品供给和工业生产。传统监测依赖政府统计、企业财务报表和行业调查，虽能提供宏观趋势，但在地区偏差、时间滞后和覆盖盲区方面存在先天

局限。而卫星遥感数据的加入，使得金融机构、商品交易商和政策部门能够根据标准化量化结果及时调整策略，极大提升对大宗商品供需和市场趋势的把控能力 (NASA Earthdata, 2025)。

案例十四：多源遥感在原油库存中的全景监测

石油行业作为全球最大的大宗商品市场之一，其价格波动深刻影响全球经济金融体系。然而，即便当代信息化高度发达，原油市场的基础数据仍长期处于覆盖不全、更新滞后、不透明的状态。截止 2018 年，工业化国家政府发布的官方数据相对可靠，但覆盖范围有限，仅涉及全球约 50% 的石油消费；而在如中国、中东等关键生产与消费地区，库存与产量数据往往依赖间接估算，准确性难以保证。这类信息鸿沟导致每日供需数据误差可能高达 50-150 万桶，对价格形成机制构成系统性扰动 (Reed, 2018)。在此背景下，Kayrros 等前沿遥感与数据分析公司逐步打破传统监测方式的边界，通过大规模卫星图像处理、雷达高度识别与多源数据整合，构建起一套高频、广覆盖、具预测力的原油市场动态监测系统。

在全球能源市场中，美国俄克拉荷马州的库欣储油枢纽因其特殊地位而长期受到市场高度关注。该地不仅聚集了超过 400 个储罐、总库容达 9200 万桶，更是纽约商业交易所 (NYMEX) 轻质原油期货的交割地，其库存变化直接影响西德克萨斯中质原油 (WTI) 与北海布伦特 (Brent) 等基准油价。因此，对库欣库存的高频、精确监测具有显著的金融市场定价影响。为了对 WTI 市场形成精准前瞻，Kayrros 开发了 Crude Oil Intelligence 产品，以俄克拉荷马州库欣的炉心地为核心，聚焦全球油罐仓储动态。

Kayrros 对漂浮顶储罐的监测依赖合成孔径雷达影像。得益于 SAR 较高的空间分辨率，其能够清晰识别地面车辆、堆料堆和设备结构，捕捉矿区、港口和油库等关键产业设施的微小变化。其次，其多日重访的能力，使需求波动和产能调整通过时间序列得以追踪漂浮顶储罐变化。此外，SAR 是一种主动微波遥感技术，其图像不受云层、雨雾或光照条件限制，确保任何时候都能生成可靠数据，

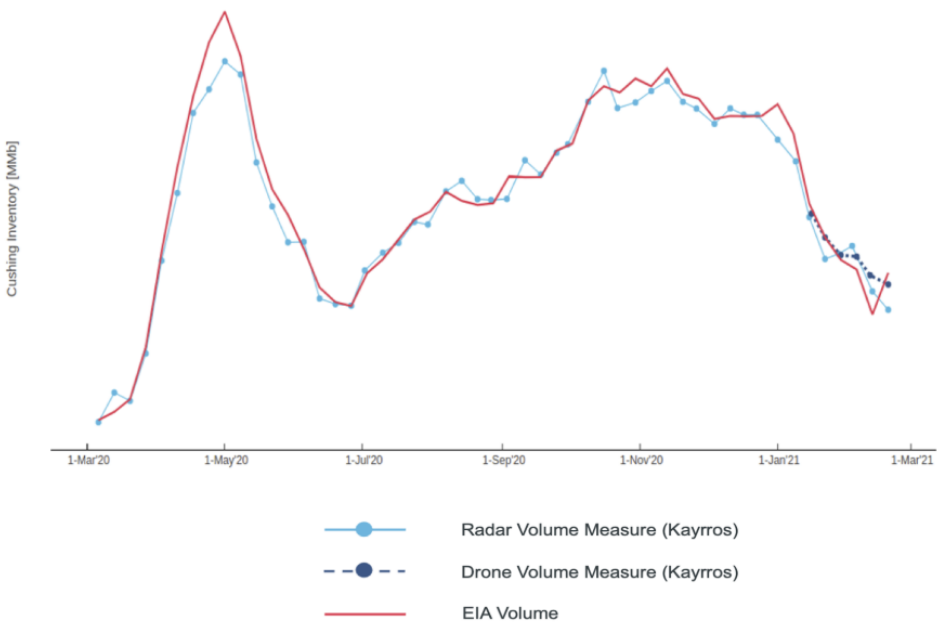
而不像光学影像可能因阴天而中断。

利用 SAR 监控原油储量的原理是，原油浮顶储罐的罐顶会随着内部原油液位的变化而升降，卫星向储罐发射雷达脉冲，通过精确分析返回信号的相位差或阴影变化（雷达干涉测量或阴影分析法），可以计算出浮顶相对于罐体边缘的精确高度。浮顶越低，意味着内部储油量越少。Kayros 利用这一原理，实现了对库欣约 93% 储量（浮顶罐）的精确追踪，该数据与美国能源信息署（EIA）的周报数据高度吻合。

然而，库欣仍存在约 7% 的固定顶储罐，无法利用 SAR 直接测量其内部液位变化。为实现“100% 覆盖”，Kayros 从 2021 年起引入无人机热成像技术，对 78 座固定顶储罐进行精准跟踪，弥补 SAR 技术的盲区。其原理基于物质的热力学特性：储罐内的原油因其巨大的热惯性，其温度变化远慢于罐内顶部的空气。这种温差会在储罐的外壁上形成一条清晰的“热分界线”（Thermal Waterline）。无人机搭载的高精度热像仪能够捕捉到这条分界线，从而精准反推出罐内原油的实际液位高度。通过将卫星 SAR 雷达的广域覆盖能力与无人机热成像的精准补充能力相结合，Kayros 成功攻克了固定顶储罐的监测盲区，实现了对库欣所有储罐的 100% 全天候、全覆盖监测（Kayros, 2021）。

得益于这一数据整合方案，Kayros 能于每周三和周五，比竞品及美国能源信息署提前发包含浮顶与固定顶罐区的双重覆盖的库欣原油库存数据，极大提升库存变化的检测精度与时效性，增强了原油市场决策者的风险识别能力。库欣案例表明，遥感与无人机的多源融合可极大提升大宗商品监测的覆盖度与精度，推动原油市场从信息滞后向实时感知转型。在当前能源市场波动性日益增强、库存数据被视为战略资源的背景下，以 Kayros 为代表的遥感解决方案不仅是科技创新的产物，更是全球资源配置与风险定价逻辑演进的重要体现。

图 3-17 Kayrros 和 EIA 发布的布库欣库存数据对比



图源：<https://www.kayrros.com/drone-flights-over-cushing-bringing-transparency-on-crude-inventories-to-100/>

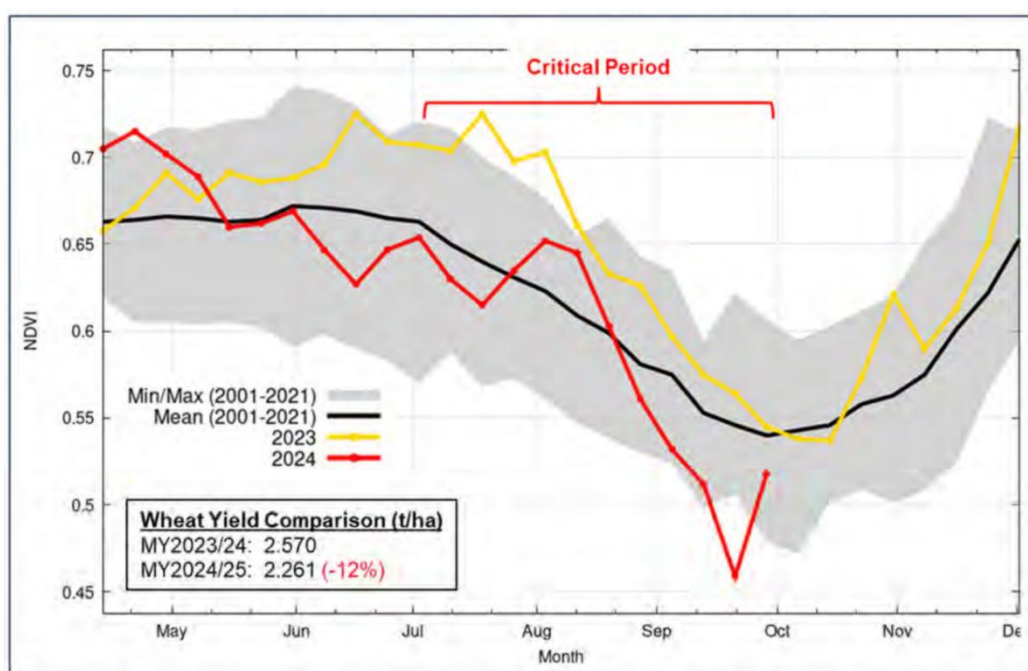
案例十五：美国农业部利用卫星遥感预测粮食作物产量

遥感技术与人工智能的深度融合，正推动作物产量预测从经验判断迈向数据驱动的科学决策。遥感产量估算技术的系统路径，涵盖多源数据集成、关键生育期识别、模型架构优化与地面验证机制，常用遥感参量包含对归一化植被指数（NDVI）、增强植被指数（EVI）、叶面积指数（LAI）和光合有效辐射比例（fAPAR）等多维指标的实时监测，并辅以雷达与热红外卫星消除云雨干扰，实现“空-地-天”一体化动态感知（欧阳宏达等，2023）。在模型层面，作物生长机理模型（如 WOFOST、DSSAT）与深度学习模型（如 LSTM、Transformer）相结合，有效增强了预测精度与区域适配性。其中多时相归一化植被指数（NDVI）与气象再分析数据的耦合，构成了新一代作物产量预报范式的基础。

这一技术范式的实战价值，在美国农业部（USDA）2024 年 10 月发布的《世界农业生产》（World Agricultural Production）报告中得到展示。该报告运用卫星遥感技术，对巴西主要小麦产区巴拉那州 2024/25 年度的产量进行了前瞻性评估。

该报告的方法是采用搭载于 NASA Terra 和 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪 (MODIS)，凭借其每日覆盖全球的优势获取高频数据，之后计算出归一化植被指数 (NDVI)。NDVI 是衡量植被健康状况的关键指标，能够连续追踪大范围内作物冠层的光合作用能力与叶面积变化，从而直观反映作物的健康状况与潜在产量趋势，数值越高，代表作物长势越好。

3-18 美国农业部 (USDA)对巴西巴拉那州小麦产量预测：NDVI 值变动



图源：美国农业部 (USDA) <https://www.fas.usda.gov/sites/default/files/2024-10/production.pdf>

分析图 3-18 显示，该年度巴拉那州的小麦长势在生长季初期表现尚可，但从 7 月进入关键的生殖期后，NDVI 曲线便急剧下降，不仅远低于上一年度（黄线），也显著低于多年平均水平（黑线）。这条急剧下行的曲线，成为了作物因严重干旱胁迫而健康状况恶化的明确“红色警报”，构成了对该州小麦将面临显著减产的有力早期预警。

该预测的准确性得到地面数据的印证。报告引述巴拉那州农业部门 (DERAL/SEAB) 在收获季发布的初步统计，确认小麦单产预计同比下降 12%。

这一来自实地的核查数据,强有力地证明了卫星遥感技术能够做出前瞻性且高精度的产量预警,展现了其在现代农业管理中的巨大潜力。

案例十六：农作物受损程度评估

在农业灾害频发、保险需求迅速增长的背景下,作物受损程度的快速、准确评估成为农业遥感应用的关键方向之一 (World Bank, 2021)。

冰雹作为突发性强、空间分布不均的极端天气事件,往往在短时间内造成作物大面积叶片撕裂、茎秆折断与产量锐减,严重影响农业产出与农户收益。传统农业保险中的灾后定损多依赖人工巡查和经验判断,存在主观性强、效率低、覆盖不足等问题,亟需更高效、客观、可扩展的技术方案。遥感技术,尤其是合成孔径雷达与多光谱传感器的协同应用,为作物受损自动识别与量化提供了新的可能。其具备大范围、高频率、客观化的观测优势,正在逐步成为农业保险和灾害管理中的核心支撑工具。

当前,已有多种遥感方法被用于冰雹灾害识别与评估,涵盖指数时序分析、作物模型模拟与空间聚类算法等路径。Sosa et al. (2021) 提出的算法通过构建植被指数的时间序列,利用 K-means 聚类方法对受冰雹影响区域进行像元级分区,划分为具有相似损伤程度的均质区。该方法在 91 个作物地块中验证准确率达 87.01%,显著提升了地块内空间差异的识别能力,为保险定损提供精细化支持 (Sosa et al., 2021)。另一类路径则结合作物生长模型与遥感估算数据开展产量损失测算。利用 Landsat 遥感数据推算实际蒸散量 (ETa),通过 DSSAT 作物模型模拟潜在产量 (YP),构建 HDDSSAT (Hail Damage-DSSAT) 指数反映产量损失程度 (Gobbo et al., 2021)。该指数与农业保险机构的估值高度一致,验证了遥感-模型耦合在产量层面的损失估算能力,为农业再保险、风险敞口评估与灾害赔付建模奠定了方法基础。

此外,基于 Sentinel-2 构建的 NDVI、NDWI 与 PSRI 指数时间序列,通过面

积曲线下积分 (AUC) 与关键时段指数差值 (ΔIndex) 评估冰雹事件对玉米生长的影响。该方法对整个生长季节内的生理波动具备敏感性, 可辅助快速识别损伤程度变化区域, 适用于灾后快速响应与资源调度场景(Ha et al., 2022)。总的来说, 从植被指数时序构建, 到产量损失量化建模, 再到灾后空间识别分类, 遥感在冰雹灾害评估中已形成较为成熟的技术路径。不同方法适配不同的时空尺度与灾后阶段, 可支撑从预警监测、受损识别到快速定损与理赔执行的全流程遥感服务体系。

此外在病虫害影响稻作生产的情境中, 研究者尝试将具备高空间精度的无人机 (UAV) 遥感与具备广覆盖优势的卫星遥感进行融合, 以协同提升受灾作物生长状况的反演能力与区域推广性。例如, 在稻纵卷叶螟 (一种水稻害虫) 侵害背景下的水稻监测研究中, 选取 2022 年 8 月 14 日获取的 SuperDove 卫星影像与次日采集的无人机多光谱影像作为数据源, 计算各类植被指数后, 通过比例变换法将两者融合, 以构建更具精度的叶面积指数 (LAI) 反演模型 (Chen et al., 2024))。为全面评估融合效果, 研究采用多元线性回归 (MLR)、反向传播神经网络 (BPNN) 与支持向量机回归 (SVR) 三种建模方法, 对比不同算法在 LAI 估测中的拟合表现与泛化能力。结果显示, 机器学习模型在捕捉非线性生理退化特征方面显著优于传统线性回归, 尤以 SVR 模型在 LAI 反演中表现最优。融合后的遥感数据大幅提升了模型精度, 且遥感图像的空间细节更为清晰, 与无人机反演结果的空间匹配度显著提高。

以上两个案例分别聚焦于冰雹打击与虫害侵袭场景下的作物受损评估方案, 前者通过卫星植被指数的无监督聚类算法实现作物内损失差异的自动识别, 后者则将高分辨率 UAV 影像引入中分辨率卫星遥感处理链条, 提升了水稻叶面积指数 (LAI) 反演精度, 展示了多源遥感在灾后评估中的协同潜力。未来, 结合无人机近景遥感、高分辨率光学卫星与机器学习算法, 遥感在极端天气背景下的农业灾害响应效率将被进一步提升。

3.2.4 土建项目开工监测

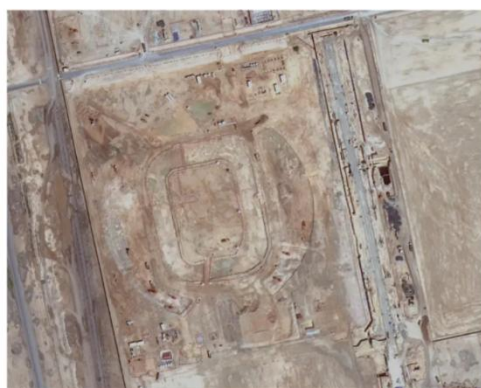
在快速城市化背景下,高分辨率卫星影像为监测土建项目的建设进度和城市空间的变化情况提供了一双持续、客观且覆盖范围广阔的“太空之眼”。通过按周甚至按日获取同一地块的最新影像,监管部门和市场参与者不仅能实时追踪项目从“开工”到“封顶”的每一个阶段,还能借此推断区域供给节奏、预判潜在的市场趋势。相较于传统人工巡检,卫星影像可以提供更广覆盖、更客观的视角,实现对施工现场的远程监测和频繁、连续的数据采集。这不仅提高了施工监测的效率和准确性,也让项目各相关方能够及时发现潜在问题并做出决策,从而减少工期延误、成本超支和纠纷的风险(Njambi, 2023)。

案例十七：卫星提前捕捉卡塔尔世界杯主场馆建设进度滞后

卡塔尔世界杯主场馆——卢赛尔(Lusail)体育场的建设历程,就是遥感技术用于土建项目风险预警的典型案例。该体育场计划容纳约8万人,是2022年世界杯的决赛场地,其建设工期原定于2019-2020年完成。然而,英国公司Birdi通过分析美国DigitalGlobe公司的商业卫星影像,最早在2017年就发现了该项目进度异常放缓的迹象。Bird.i团队调取了WorldView-3高分辨率光学卫星在2017年3月、6月、9月和12月获取的卢赛尔体育场(原定于2019年完工)施工现场影像序列,并进行了比对分析(如图3-19所示)。自2017年6月起至年底,卢赛尔体育场的施工进展极其缓慢,现场除地基工程外几乎看不出新的进度。截至2017年12月,卫星照片中仍然只见到场馆的基础部分雏形,主体结构尚未开建,这与原定完工期限仅剩两年多的要求明显不符(Hodgson, 2018)。当时正值卡塔尔遭遇周边国家联合封锁,建筑材料进口受阻,这一背景或许是工程放缓的重要原因之一。

Bird.i团队将分析结果提供给媒体,引发了广泛的关注和讨论。2018年1月,商业媒体Business Insider刊发报道指出:“卫星图像显示卡塔尔有三个世界杯场馆自2017年6月以来进展甚微,其中包括计划于2019年完工的卢赛尔主体育场”(Hodgson, 2018)。该报道列出了卢赛尔场馆在2017年3月、6月、9月和12月的卫星照片对比,证实了工程放缓的状况。

图 3-19 2017 年 3 月的体育场（左上）、2017 年 6 月的体育场（右上）、
2017 年 9 月的体育场（左下）、2017 年 12 月的体育场（右下）



2017 年 3 月的卢赛尔标志性体育场。版权所有 © Birdi Ltd. - 图片 © 2018 DigitalGlobe, Inc.



2017 年 6 月的卢赛尔标志性体育场。版权所有 © Birdi Ltd. - 图片 © 2018 DigitalGlobe, Inc.



2017 年 9 月的卢赛尔标志性体育场。版权所有 © Birdi Ltd. - 图片 © 2018 DigitalGlobe, Inc.



2017 年 12 月，卢赛尔标志性体育场。虽然取得了一些进展，但仍有很长的路要走。版权所有 © Birdi Ltd. - 图片 © 2018 DigitalGlobe, Inc.

图源: Birti Ltd

然而，卡塔尔方面一直没有改变原定的工程完工计划，通过影像监测发现场馆施工滞后时，项目管理方和政府仍强调一切顺利。负责世界杯场馆建设的卡塔尔最高交付与遗产委员会秘书长哈桑·塔瓦迪（Hassan Al Thawadi）在媒体询问时回应称：“这些图像并不能如实反映我们在封锁时期仍取得的巨大进展。目前各项准备工作一切如常，我们已经提前五年完工了第一个场馆（哈里发体育场），其余场馆也将按计划于 2020 年前完工”（转引自 Hodgson, 2018）。他强调封锁并未影响工程进度，声称已采取供应链应急预案确保项目如期推进。然而，后续事实证明，卡塔尔的体育场建设确实出现了严重的延期现象。比如，上述提到的卢赛尔体育场的预期交付时间先是推迟到 2020 年，再延至 2021 年底竣工交付。最

后，该场馆在 2021 年末才正式落成，比原计划晚了近两年（Coliseum, 2020）。可以说，这个案例凸显了卫星遥感在工程风险预警中的独特价值：它能够在官方尚未承认问题之前，提供客观可靠的预警信号。一旦预警信号被重视，各相关方本可以更早采取措施，如调整项目计划、增加资源投入或制定应急预案，来降低延期带来的损失。这种前瞻性，对于像世界杯主场馆这样投资巨大、工期刚性的项目而言，尤为具有战略价值。

3.3 卫星遥感数据助力金融市场交易

3.3.1 助力证券市场交易

卫星遥感数据在金融领域最直接、最具颠覆性的应用，便是将其作为一种高频的另类数据源，用于驱动证券市场的交易决策，以寻求超额收益（Alpha）。

传统的投资分析依赖上市公司发布的季度或年度财务报告，这些官方数据不仅存在数月的天然滞后性，也无法完全反映报告期内真实的、动态的经营活动。卫星遥感以其客观、高频和独特的“穿透性”视角，为投资者打开了一扇直接观察实体经济的窗口。它能够实时捕捉上市公司的物理经营活动，例如，工厂的热辐射强度可以反映其产能利用率。

通过人工智能和量化模型，这些来自物理世界的“蛛丝马迹”被高效地“翻译”成可交易的金融信号，使投资者能够在市场对滞后的官方数据做出反应之前，提前洞察企业的经营拐点。这种由“天基”信息构建的优势，正在重塑基本面分析和量化投资的范式。以下案例将具体展示如何将这一新兴数据力量转化为实际投资策略。

案例十八：尔特数科卫星数据量化投资案例

在金融投资领域，精准高效的量化策略一直是投资者追求的“利器”，将前沿科技与金融深度融合，更是能为量化策略注入强劲动力。在全球经济格局中，中国制造业占据着举足轻重的地位。众多上市公司作为行业发展的中坚力量，其经

营状况与市场表现对投资者决策具有重要参考价值。然而，传统的财务数据存在时效性滞后、信息维度有限等问题，难以全面捕捉企业实时动态。为此，尔特数科推出的热辐射量化策略，为量化交易提供了新的数据源。

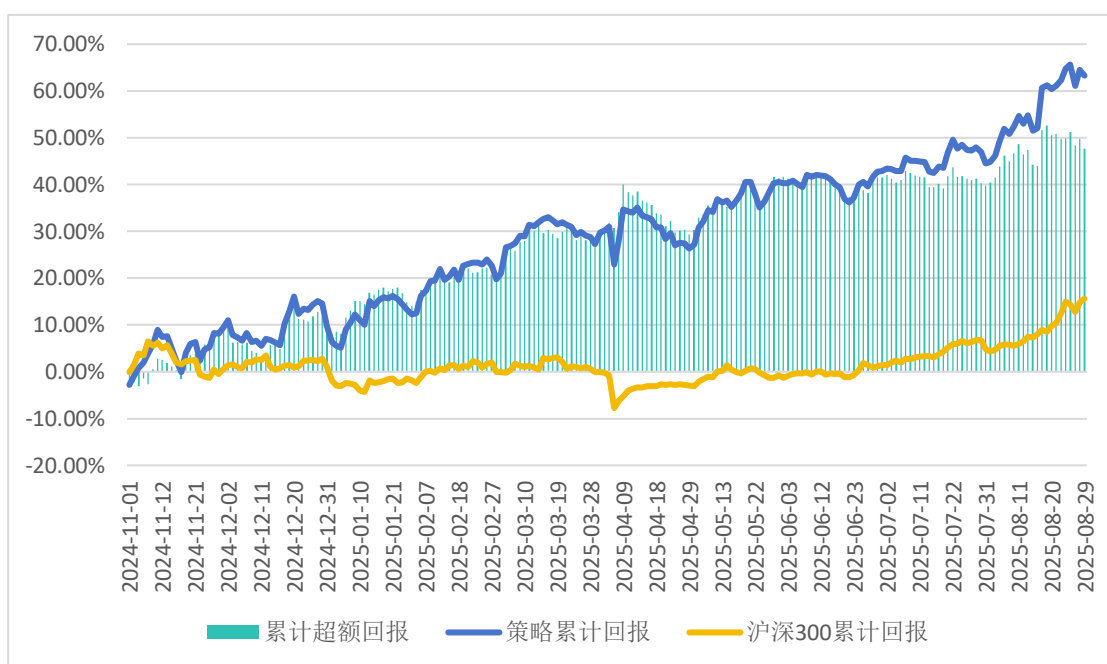
企业经营生产活动中伴随着设备运行、能源消耗等过程，其在不同规模及强度的经营活动下会释放差异化的热量信号。这些热辐射信号可通过红外遥感卫星全天候精准捕捉，通过解析热辐射强度与分布特征，能够量化评估企业生产经营活动。热辐射数据本质上是企业生产能耗与设备运转状态的直接表征，可真实反映公司经营情况，如生产活跃度、能源消耗率、停工预警、环保合规监测。例如热辐射强度与生产设备运行时长、生产线负荷率呈正相关，例如钢铁厂高炉持续运转时热辐射信号显著增强。

一项权威研究中，Xue et al. (2025) 利用 NASA 的 Landsat 8/9 卫星数据，对 2014 至 2022 年间中国 3,188 家上市制造公司的 29,973 家工厂进行了 TIR 监测。他们发现 TIR 中包含的信息并未被市场完全定价。该研究构建了一个对冲投资组合，通过买入 TIR 最强的股票和同时卖出 TIR 最弱的股票，该策略能够获得每年 5.16% 的显著超额收益 (alpha)。在整个研究期间，该策略的累计超额回报率高达 250%。

进一步地，尔特数科以中国制造业上市公司为样本，利用公司热辐射构建量化策略模型，在实战中检验卫星遥感在金融市场中的作用。首先，对热辐射数据进行预处理，包括数据清洗、异常值剔除、归一化处理等，确保数据质量与可比性。然后，利用 AI 技术对组合数据进行深度挖掘与分析，提取与企业经营相关的关键信息，如生产规模、生产效率、市场活跃度等，将其量化为具体指标。通过相关性分析、因子分析等方法，筛选出对股票收益具有显著预测能力的因子，构建多因子选股模型。依据量化策略模型，从中国制造业上市公司中筛选出表现优异的前 15 支股票，构建投资组合。在策略实施期间，定期对组合进行调整，以适应市场变化与企业经营动态。通过回测与实盘跟踪，评估策略的有效性与收益表现。

最终结果如下图 3-20 显示，该图为 2024 年 11 月至 2025 年 8 月基于热辐射量化策略的回报情况。该量化策略取得了良好的投资效果，策略累计回报为近 70%，同期沪深 300 大约为 15%，取得超 55% 累计超额收益。表明策略在追求收益的同时，有效平衡了风险与收益。这验证了另类数据在量化策略中的应用价值，为投资者提供了一种新的、有效的投资决策工具。

图 3-20 尔特数科热辐射量化策略



图源：尔特数科 - 热辐射量化策略

3.3.2 助力期货市场交易

期货市场的本质是关于未来供需预期的交易，信息的时效性和准确性是决定交易成败的核心。尤其在与实体经济紧密相连的大宗商品领域，传统的月度或季度官方报告（如 USDA 的 WASDE 报告）就像是定时发布的“重磅炸弹”，其发布间隔期内存在巨大的信息真空，导致市场充满不确定性。

卫星遥感技术正是在填补这一信息真空中扮演着革命性的角色。它能够穿透信息迷雾，直接、客观地大规模监测影响商品供给的关键物理指标，例如农作物的长势与健康状况与全球原油的在库与在途数量。这种来自“太空”的持续性数

据流，为构建领先于官方报告的、高频率的供-需预测模型提供了可能。下述案例将展示，这种新兴的“空间金融”（Spatial Finance）范式，如何将地球观测数据转化为可交易的洞察力，从而在瞬息万变的期货市场中捕捉先机。

案例十九：卫星遥感助力农产品期货交易决策

在大宗商品市场，传统基本面分析高度依赖官方统计数据，如美国农业部（USDA）每月发布的 WASDE 报告，但其固有的滞后性为市场留下了巨大的信息真空。大豆及其副产品是全球交易量最大的农产品之一，占全球农业贸易总额的 10% 以上。由于其期货合约价格的波动性，从生产者到贸易商的整个产业链都面临着潜在的财务损失，因此对价格走势的预测至关重要。新兴的“空间金融”（Spatial Finance）领域正是为了解决这一痛点，本节将以空间金融中的标杆项目——SPATIAL 为例，讲述卫星遥感技术与人工智能如何为大豆期货的价格预测提供全新的解决方案。

SPATIAL 项目构建了两个独立的机器学习模型：一个用于大豆作物产量预测，另一个则用于大豆期货合约价格走势预测。其模型的数据源包括多源地球观测（EO）数据，如哥白尼气候变化服务（C3S）的 ERA5 再分析数据、Landsat 7/8 和 Sentinel-2 的光学影像，以及用于作物季内测绘的 Sentinel-1 雷达数据。

SPATIAL 项目的有效性在一系列回溯测试中得到了充分验证，其性能指标清晰地展示了卫星数据在金融预测中的价值。产量预测精度方面，在对 2016 年至 2020 年间的美国大豆总产量进行预测时，SPATIAL 模型的平均相对误差低于 7%。价格预测准确率方面，在对芝加哥期货交易所（CBOT）交易的大豆期货合约价格进行预测时，其对未来不同时间窗口的预测准确率如下：未来 2 周价格走势预测准确率为 63%；未来 1 个月价格走势预测准确率为 63%；未来 2 个月价格走势预测准确率为 60%；未来 3 个月价格走势预测准确率为 60%。

该项目的最终目标是为活跃于大豆期货交易的中小型组织提供支持。通过利用 SPATIAL 项目的价格预测能力，这些机构能够改善其交易策略、增强风险管

理能力，并最终增加交易利润。

表 3-1 卫星遥感数据应用总结

应用领域	具体案例	监测对象	核心技术/数据	解决的关键问题	应用价值/量化成果
宏观经济监测	夜间灯光监测 GDP	地面灯光亮度与分布	DMSP/VII RS 卫星夜光影像	传统 GDP 数据滞后、缺乏空间维度	监测区域/微观经济发展，提供高频客观地理依据
	热红外辐射衡量经济强度	经济活动产生的废热	红外传感器如 MODIS/热红外辐射 (TIR)数据	传统数据覆盖不全、动态追踪能力弱	追踪宏微观经济运行状况；可评估经济增长质量等
物流监测	港口拥堵与供应链监测	港口集装箱堆场面、密度；锚地停泊船只数量	高分辨率 SAR 及光学卫星影像	传统港口数据滞后	构建高频拥堵指数，提前预警供应链风险；拥堵指数可有效预测 27 国股市超额收益
交通监测	疫情期间机场停机监测	停机坪、跑道上的飞机数量与分布	高分辨率光学卫星影像 (Maxar)	传统航班数据只反映“在飞”活动，无法衡量“停飞”的物理规模	构建高频“航空活动指数”，与航空公司股价同步；评估机场运营压力与恢复节奏
	城市交通仿真与低空经济	城市三维模型、实时交通流	数字孪生 (航拍/LiDAR/IoT 数据融合)	城市规划与交通政策缺乏低成本、高效率的试验场	模拟交通流量、测试无人驾驶、演练应急疏散、规划低空经济航线
环境监测	工业排放监测 (疫情期间)	大气中 NO ₂ 等污染物浓度	Sentinel-5P 卫星 (TROPOMI 传感器)	地面监测站覆盖不足、数据上报滞后	量化封锁政策对工业减排的影响 (如长三角 NO ₂ 降 52%)

	甲烷“超级排放源”追踪	油气设施的甲烷排放羽流	GHGSat 高分辨率商业卫星	传统方法难以追踪无组织、间歇性的甲烷泄漏	精准定位并量化“隐性排放”（如土库曼斯坦油田泄漏）；为企业 ESG 披露和碳市场提供验证
	矿区安全与地质灾害预警	矿区地表毫米级形变	InSAR（合成孔径雷达干涉测量）	传统地面监测覆盖范围小、成本高，难以发现隐患	识别出西班牙 Riotinto 铜矿矿区年均 11 厘米的沉降隐患
公司经营监测	企业生产异常识别	工业设施热辐射强度	高频热红外遥感卫星	财务数据滞后，无法实时感知企业生产状态	提前 3 个月监测到企业停工检修事件，早于市场公告，捕捉生产经营真实动态
行业监测	全球设施级碳排放追踪	全球电厂、钢厂、水泥厂等设施的碳排放活动	Climate TRACE（多源卫星+AI）	传统排放清单依赖估算，缺乏设施级、高频的实测数据	构建全球最大设施级排放数据库；数据被金融机构用于评估贷款企业碳风险
	零售业业绩预测	零售门店停车场车流量	RS Metrics（高分辨率光学影像）	零售销售数据发布滞后，无法提前判断消费趋势	监测到沃尔玛车流量下降 2.0%，与官方 1.8% 的客流下滑高度吻合，提前预测同店销售额变化
	中国制造业活动指数	工业园区卡车流量、原材料堆积等物理信号	SpaceKnow（海量卫星照片+AI）	官方 PMI 按月发布，存在 4 周滞后，无法满足高频决策需求	推出中国卫星制造业指数 (SMI)，每周更新 3 次
大宗商品监测	全球原油库存监测	浮顶/固定顶油罐的液位高度	Kayros（SAR 雷达+无人机热成像）	关键产油国官方库存数据不透明、更新慢，市场信息不对称	实现对库欣储油枢纽 100% 覆盖，数据发布早于 EIA 官方报告，提升市场透明度

	农作物产量预测	归一化植被指数 (NDVI) 时序数据	MODIS/Sentinel 等多光谱卫星	传统田间调查方法滞后、覆盖范围小，难以在收获前进行客观、大范围的产量预警	提前数月发出减产“红色警报”；预测结果被地面初步统计证实，小麦单产同比下降12%
	农作物灾害定损	冰雹、病虫害等灾害导致的作物受损范围与程度	Sentinel-1(SAR)与Sentinel-2(光学)协同；无人机遥感	传统人工定损主观性强、效率低，影响保险理赔速度	提高农作物定损效率，助力保险产品
基建项目监测	土建项目进度追踪	施工现场的建设进度（如地基、主体结构）	高分辨率光学卫星影像	项目方信息披露可能滞后或不完整，存在风险	提前近2年发现卡塔尔世界杯主场馆建设进度滞后，提供客观的第三方风险预警信号
金融市场应用	量化投资策略	上市公司厂区的热辐射强度	尔特数科热辐射数据+AI模型	传统财务数据滞后，难以捕捉企业实时经营动态	构建的热辐射量化策略3个月累计回报近13%，取得相对沪深300近15%的超额收益
	农产品期货交易	大豆等作物的长势 (NDVI)、土壤湿度等	“空间金融”模型（多源卫星+深度学习）	官方农业报告 (WASDE) 信息滞后，市场存在套利窗口	预测未来1-2个月农产品价格方向

四、政府决策与金融行业支持及实施建议

4.1 建议政府积极建立基于卫星数据的监测系统

卫星遥感数据凭借其高频次、广覆盖和客观性的优势，正在成为提升国家治理现代化能力的关键基础设施。为充分利用这一技术红利，建议政府从以下三个层面系统性地构建和应用卫星数据监测体系。

- **建立宏观经济“即时播报”（Nowcasting）体系，提升经济研判时效性**

传统宏观经济数据（如季度 GDP）存在天然的滞后性。政府应建立一个整合了卫星遥感数据的宏观经济“即时播报”系统，将夜间灯光强度、交通流密度、工业热源等卫星衍生指标作为官方统计的“先行指标”。研究已证实，夜间灯光数据与 GDP 在部分国家的相关系数高达 0.85，尤其在统计数据薄弱地区表现更佳（Henderson et al., 2012）。构建这样的体系，能让政策部门在官方数据发布前数周甚至数月，便可预判经济走向、识别潜在风险，从而极大缩短政策响应周期，赢得宝贵的决策窗口。

- **将遥感数据嵌入政策评估与审计流程，实现精准量化问责**

政府可考虑将卫星遥感数据作为政策效果评估和审计工作的标准化工具，为政策的有效性提供客观、可量化的空间证据。通过对比政策实施前后高分辨率卫星影像的变化（如基建扩张、土地利用、植被恢复等），可以精准评估政策干预的实际影响，减少传统评估中的主观偏差。例如，欧盟已利用哥白尼计划的 Sentinel 系列卫星数据，评估“绿色新政”相关补贴的落地效果（ESA, 2023）。更有研究通过对比部长更替前后其家乡的夜间灯光亮度变化，直观验证了政治关联对资源配置的直接影响（范子英等，2016）。将此方法论制度化，将为重大项目督查、财政资金审计和环保问责提供强有力的、低干预的客观依据。

- **构建多源融合的系统性风险早期预警平台**

建议整合多源遥感数据，过 AI 算法，自动监测关键经济节点的物理状态异常，构建一个跨部门的系统性风险早期预警平台。例如，通过识别工厂热辐射信号的骤降来预警停产风险，或通过监测港口船舶密度的突变来预警供应链中断。世界银行已成功利用夜间灯光数据对非洲国家的经济活动进行“即时化”监测，辅助识别潜在风险（见《Africa's Pulse》）。通过该平台能够构建一个从宏观到微观、从趋势到实体的立体化风险预警体系，显著增强国家经济体系的韧性。

● 打破部门“数据孤岛”，构建跨域融合的数据共享与应用枢纽

单一数据源的价值是线性的，而多源数据融合的价值是指数级的。卫星遥感数据的最大潜力在于与其他行政管理数据结合。为此，必须从顶层设计上打通数据壁垒。一是建设国家空间数据基础设施。建立一个权威、统一、安全的数据共享平台，整合自然资源、生态环境、交通运输、农业农村、税务统计等多部门的数据资源。制定清晰的数据共享协议、技术标准与安全规范，确保数据在不同部门间“看得见、流得动、用得好”。

二是推动融合应用试点。鼓励跨部门合作，开展数据融合应用试点项目。例如，将卫星监测的工业用地变化与税务数据相结合，以发现潜在的税收增长点或违规用地；将高分影像识别的建筑施工进度与银行信贷数据关联，以实现房地产领域风险的动态监控；将空气质量遥感数据与企业排污许可数据叠加，实现对环境违规行为的精准溯源。

● 实施“空间信息+”人才战略，夯实治理现代化的智力根基

先进的数据和系统最终需要具备高阶数据素养的人才来驾驭。国家应将空间信息应用人才的培养提升至战略高度，为治理现代化提供持续的智力支持。首先，鼓励高校设立或加强“大数据+X”的交叉学科，如“大数据+公共管理”、“大数据+经济学”，培养既懂技术又懂业务的复合型、应用型高级人才。二是，构

建公务员培训体系，将大数据素养与应用能力，纳入国家公务员培训和干部教育体系。面向各级管理者和业务骨干，定期开展专题培训，使其掌握利用大数据解读经济社会现象、辅助公共决策的基本技能。最后，打造国家级智库平台，汇聚顶尖人才，专注于攻克大数据在国家治理领域的关键技术与应用难题，并为各级政府部门提供常态化的决策咨询与技术支持服务。

● 优化国土空间规划与用途管制，科学规划城市布局

优化国土空间格局，划定“三区三线”（生态、农业、城镇空间，生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界），为达到这一目标需要更加先进完善的数据解决方案。而遥感数据就能够应用到土地利用/覆盖变化监测、自动识别监测城市扩张、耕地流失、森林砍伐、湿地退化等情况之上。通过定期比对遥感影像，可以及时发现生态红线内、基本农田上的违规建筑和开发活动。而通过将卫星遥感与无人机、地面传感器数据结合，实现点面结合的立体监测，可以实现建立“空天地一体化”监测网络。这将有助于确保国土空间规划落地，以及实现我国坚持的最严格的生态保护和耕地保护制度。总结来说，遥感技术正在成为现代政府进行城市规划治理不可或缺的“天眼”。它将相关政策制定从定性判断推向“用数据说话”的精准治理新时代，极大地提升了政府的科学决策能力、监管能力和公共服务能力。

4.2 建议金融机构将卫星遥感融入业务场景

对于金融机构而言，卫星遥感数据正在成为超越传统财务报表和宏观统计的“另类数据”（Alternative Data）核心来源，为获取超额收益（Alpha）和精细化风险管理提供了全新的技术范式。

● 推动战略层面的认知升级，构建数据驱动的决策新范式

金融机构的领导层应率先认识到，另类数据不仅是技术工具的革新，更是投资哲学与风险管理理念的进化。这要求自上而下地推动一场思维转变，从依赖滞

后的官方统计数据“确认”已发生事件，转向利用高频数据“预测”未来趋势。

确立战略定位：将另类数据整合能力视为机构的核心竞争力。董事会和高层管理团队应制定清晰的路线图，明确在未来 3-5 年内，在投资研究、信贷审批、宏观预测和合规监控等核心业务中应用另类数据的具体目标。

培育创新文化：鼓励跨部门的探索与协作，建立容错机制，支持分析师和基金经理利用卫星数据等新工具进行试验性项目。打破传统的数据孤岛，促进量化分析团队、基本面研究团队与风险控制部门之间的知识共享与模型共建。

重塑分析流程：将另类数据嵌入现有的决策流程中。例如，在进行行业分析时，除了阅读公司财报和行业报告，应将卫星监测的工厂产能、港口吞吐量、商业区客流量等作为标准化的参考指标，形成“传统数据+另类数据”的双重验证（Dual-Verification）机制。

● 聚焦高价值应用场景，实现业务突破与精准赋能

另类数据的价值最终体现在具体的业务场景中。金融机构应根据自身业务特点，有重点、分阶段地推进应用落地，从核心痛点切入，创造可衡量的商业价值。

投资与交易决策方面，可以利用夜间灯光、港口集装箱数量、主要工业区热力图等卫星数据，构建高频的经济活动指数，用于提前预判 GDP、PMI 等宏观指标的拐点，指导大类资产配置。

中观行业与公司分析方面有以下几点建议：首先，大宗商品方面，实时监测全球主要矿区开采进度、石油储罐液位变化、农作物长势与估产，为商品期货交易提供客观依据。其次，工业与制造业方面，通过监测工厂停车场车辆数量、工厂热辐射、夜灯光、物流卡车流量，评估企业产能利用率与经营景气度。最后，零售与消费方面，利用停车场车辆密度、商场人流热力图等数据，预测零售企业

季度营收，有效弥补财报数据的滞后性。

风险管理与合规有以下建议。首先，信贷风险评估方面，在对公贷款业务中，通过卫星影像核实抵押资产（如在建工程进度、厂房设备状态）的真实性与价值，或动态监测借款企业的生产经营状况，实现贷后风险的实时预警。保险承保与理赔上，利用遥感数据对农业保险进行作物长势监测与灾害定损；在财产险中，快速评估洪水、火灾等自然灾害的受灾范围与损失程度，加速理赔流程，防止骗保行为。最后，ESG 与可持续金融的实践中可通过卫星监测企业的环境影响，如非法排污、森林砍伐等行为，为 ESG 评级和绿色信贷提供客观、可追溯的证据，避免“漂绿”（Greenwashing）风险。

● 构建敏捷高效的技术架构与跨学科人才梯队

卫星遥感等另类数据具有“体量庞大、结构非标、噪声复杂”的特点，这要求金融机构必须在技术基础设施和人才储备上进行前瞻性投入。金融机构需积极拥抱云计算平台，以满足海量空间数据的存储、处理和弹性计算需求。构建能够集成和处理多源异构数据（如卫星影像、社交媒体文本、物联网信号）的数据中台，并部署高效的机器学习运算平台，以支持模型的快速迭代与部署。

人才构建上，需组建跨学科的“数据智能”团队。未来的核心竞争力源于“金融知识+数据科学”的深度融合。机构应积极吸纳并培养一支由数据科学家、地理空间分析师、人工智能工程师和资深金融分析师组成的复合型团队。这支团队的核心任务是将原始数据转化为可解释、可交易的金融信号。

最后，积极拥抱外部合作与生态系统。对于大多数金融机构而言，从零开始建立完整的卫星数据处理能力成本高昂且周期漫长。因此，与领先的卫星数据供应商、AI 分析服务公司和金融科技初创企业建立战略合作关系，是快速获取能力、降低试错成本的明智之选。

4.3 建议各方建立健全数据治理体系

在拥抱另类数据带来的机遇时，必须清醒地认识并管理其伴生的风险。一是**强化数据质量控制**，建立严格的数据验证流程。由于卫星数据易受云层遮挡、大气状况等因素影响，必须投入资源进行数据清洗、校准和去噪，确保输入模型的原始数据质量可靠。

二是**恪守数据隐私与道德伦理**，尽管卫星数据主要为对地观测，但当其与其他数据（如移动设备定位）结合时，可能触及隐私边界。金融机构必须建立严格的数据使用规范，确保所有数据采集与应用行为均符合《数据安全法》、《个人信息保护法》等相关法律法规的要求，规避合规风险。

图 4-1 政府决策及金融行业支持及实施建议

建议主体	实施措施
政府	建立宏观经济“即时播报”（Nowcasting）体系
	将遥感数据嵌入政策评估与审计流程
	构建多源融合的系统性风险早期预警平台
	打破部门“数据孤岛”
	实施“空间信息+”人才战略
	优化国土空间规划与用途管制
金融机构	构建数据驱动的决策新范式
	聚焦高价值应用场景，实现业务突破与精准赋能
	构建敏捷高效的技术架构与跨学科人才梯队
各方共建	强化数据质量控制
	恪守数据隐私与道德伦理

五. 结论

受限于时效滞后、空间覆盖不足及失真风险，传统经济统计数据难以满足现代经济金融决策对高频精细化信息的需求。相比之下，卫星遥感技术凭借高频更新、广域覆盖、客观透明及多模态融合的优势，为经济金融分析提供了突破时空约束的全新视角。本报告通过系统梳理和总结卫星数据在经济金融领域的应用价值与实践路径，展示其科学价值与实践可行性。在宏观层面，卫星遥感数据能够成为高频、客观的先行经济指标，为政策调整与资源优化提供支撑；在中观与微观层面，其能够实现行业运行监测、企业生产状态追踪、大宗商品供需监测及农作物灾害评估，为市场研判与风险管理提供细粒度信号。同时在金融市场应用中，基于卫星数据驱动的量化策略与衍生工具亦展现出巨大潜力。

卫星遥感数据已发展为经济金融系统的“时空基础设施”，其价值体现在三方面。一是填补传统数据盲区，为区域经济颗粒度不足及灰色经济监测等问题提供物理可验证的客观基准；二是压缩决策响应周期，将政策与投资行动提速至“日度级”，提升风险预判能力与资源配置精准性；三是推动金融范式革新，依托高频另类数据构建 Alpha 信号，并重塑碳资产定价、ESG 评估与保险精算模型。

基于此，本报告提出分层实施建议。

- **政府层面：**建立国家级卫星监测指标体系，将夜间灯光、热辐射等数据纳入区域考核，推动跨部门数据共享，构建空-天-地一体化治理网络。
- **金融机构层面：**开发基于卫星数据的风险建模工具，优化大宗商品交易与 ESG 投资，并探索遥感指数挂钩的创新金融产品。
- **技术生态层面：**强化多源数据融合与人工智能算力投入，突破多云连续监测等技术瓶颈，培育“遥感—经济—金融”复合型人才，推动开源工具的普惠化应用。
- **数据治理层面：**一是强化数据质量控制，建立严格的数据验证流程。二是恪守数据隐私与道德伦理，确保所有数据采集与应用行为均符合《数据安全法》、《个人信息保护法》等相关法律法规的要求，规避合规风险。

总之，卫星遥感数据正推动经济决策从“经验依赖”向“数据驱动”跃迁。政府、市场与技术方需协同构建“监测-分析-应用”闭环生态，以充分释放其对经济增长与风险治理的变革性价值。

参考文献

- Abdalla, S. (2016). The use of radar altimeter products at ECMWF. *ECMWF Newsletter*, 149. <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/149/meteorology/use-radar-altimeter-produce-ts-ecmwf>
- Airbus. (2019, March 22). *Airbus rapid mapping supports relief efforts in Mozambique after Cyclone Idai*. <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2019/03/airbus-rapid-mapping-supports-relief-efforts-in-mozambique-after-cyclone-idai.html>
- Airbus Defence and Space. (2025). *Ultra-precise 3D mapping from a new perspective*. <https://space-solutions.airbus.com/imagery/3d-elevation-and-reference-points/3d-mapping/>
- Allen, P., Wickham-Eade, J., & Trichas, M. (2020). The potential of small satellites for scientific and astronomical discovery. *Nature Astronomy*, 4(11), 1039-1042.
- Asaduzzaman, M., Mahboob, M. G., Sultana, S., & Naher, N. (2025). Assessing the contribution of mango orchards to carbon sequestration using field derived data and satellite remote sensing techniques in Shibganj, Bangladesh. *Smart Agricultural Technology*, 11, 100931. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100931>
- Bai, Y., & Jin, M. (2021). Constant-level spatio-temporal integrated search algorithm for repeating sun-synchronous orbit satellite images. *International Journal of Digital Earth*, 14(7), 849–864. <https://doi.org/10.1080/17538947.2021.1907463>
- Barsi, J. A., Schott, J. R., Hook, S. J., Raqueno, N. G., Markham, B. L., & Radoczi, R. (2014). Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. *Remote Sensing*, 6(11), 11607–11626. <https://doi.org/10.3390/rs6111607>
- Basel Committee on Banking Supervision (BCBS). (2023). *Principles for the sound management of risks related to model risk*. Bank for International Settlements.
- Bedini, E. (2023). Evaluation of EnMAP hyperspectral satellite data for epithermal alteration mapping at Cuprite-Goldfield, southwestern Nevada, USA. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 13(2), 262–269. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v13.2.p262-269>
- Benami, E., Jin, Z., Carter, M. R., Ghosh, A., & Lobell, D. B. (2021). Uniting remote sensing, crop modelling and economics for agricultural risk management. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(2), 140–159.
- Bigdeli, B., Amini Amirkolaei, H., & Pahlavani, P. (2018). DTM extraction under forest canopy using lidar data and a modified invasive weed optimization algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 216, 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.045>
- Bloomberg News. (2021, February 12). *New climate satellite spotted giant methane leak as it happened*. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-02-12/new-climate-satellite-spotted-giant-methane-leak-as-it-happened>
- Bubalo, B. (2024). Capacity and demand forecasting in Urban Air Mobility - A simulation of air transportation in Hamburg. *Transportation Research Procedia*, 80, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.09.003>

- Burke, M., Driscoll, A., Lobell, D. B., & Ermon, S. (2021). Using satellite imagery to understand and promote sustainable development. *Science*, 371(6535), eabe8628.
- Caldecott, B., McCarten, M., Christiaen, C., & Hickey, C. (2022). Spatial finance: Practical and theoretical contributions to financial analysis. *Journal of Sustainable Finance & Investment*. <https://doi.org/10.1080/20430795.2022.2153007>
- Canadian Space Agency (CSA). (2021). *RADARSAT constellation technical comparison*. <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/technical-features/radarsat-comparison.asp>
- Carrere, M., & Alegría, A. (2024, December). Satellites and lidar get AI boost to count forest carbon stock worldwide. *Mongabay*. <https://news.mongabay.com/2024/12/satellites-and-lidar-get-ai-boost-to-count-forest-carbon-stock-worldwide/>
- CEOS. (2023). *CEOS disaster management support*. <https://ceos.org>
- Chaves, M. E. D., Picoli, M. C. A., & Sanches, I. D. (2020). Recent applications of Landsat-8/OLI and Sentinel-2/MSI for land-use and land-cover mapping: A systematic review. *Remote Sensing*, 12(18), 3062. <https://doi.org/10.3390/rs12183062>
- Chen, C., Bao, Y., Zhu, F., & Yang, R. (2024). Remote sensing monitoring of rice growth under *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) damage by integrating satellite and UAV remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 45(3), 772-790.
- Chen, X., & Nordhaus, W. D. (2019). VIIRS nighttime lights in the estimation of cross-sectional and time-series GDP. *Remote Sensing*, 11(9), 1057. <https://doi.org/10.3390/rs11091057>
- Chen, X., & Nordhaus, W. D. (2022). VIIRS nighttime lights in the estimation of cross-sectional and temporal GDP. *Remote Sensing*, 14(3), 511. <https://doi.org/10.3390/rs14030511>
- Chen, Z., Xu, W., & Zhao, Z. (2024). The assessment of industrial agglomeration in China based on NPP-VIIRS nighttime light imagery and POI data. *Remote Sensing*, 16(2), 417. <https://doi.org/10.3390/rs16020417>
- Ciani, D., Santoleri, R., Liberti, G. L., Prigent, C., Donlon, C., & Buongiorno Nardelli, B. (2019). Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR) benefits for the Copernicus Level 4 sea-surface salinity processing chain. *Remote Sensing*, 11(15), 1818. <https://doi.org/10.3390/rs11151818>
- Cigna, F., Esquivel Ramírez, R., & Tapete, D. (2021). Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR displacement velocities against GNSS and geodetic leveling monitoring data. *Remote Sensing*, 13(23), 4800. <https://doi.org/10.3390/rs13234800>
- Cipollini, P., & Snaith, H. (2013). *Altimetry 1 – Principles & instruments* [PDF]. European Space Agency. https://seom.esa.int/oceantrainingcourse2015/files/Cipollini_Altimetry_1.pdf
- Climate TRACE. (2023, December 2). *Climate TRACE unveils open emissions database of more than 352 million assets*. Climate TRACE. <https://climatetrace.org/news/climate-trace-unveils-open-emissions-database-of->

- more-than
- Climate TRACE. (2024, May 23). *Climate TRACE case study* [LinkedIn post]. LinkedIn. https://www.linkedin.com/posts/climate-trace_climatetrace-case-study-activity-7348070712244375552-jxXX
- Coliseum. (2020, September 14). Lusail Stadium roof to raise the bar. *Coliseum Online*. <https://www.coliseum-online.com/lusail-stadium-roof-to-raise-the-bar/>
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. (2024). *Satellite altimeters*. https://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_meas_sat_alt.html
- Cong, L. W., Li, B., & Zhang, Q. T. (2021). Alternative data in fintech and business intelligence. In M. Pompella & R. Matousek (Eds.), *The Palgrave handbook of FinTech and blockchain* (pp. 217–242). Springer International Publishing.
- Copernicus Climate Change Service. (2024, October 12). *Sea level gridded data from satellite observations for the global ocean (1993–present)*. Climate Data Store, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. <https://doi.org/10.24381/cds.4c328c78>
- Copernicus Programme. (2024). *Sentinel-1 mission overview: C-band SAR down to 5 m resolution*. <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-1>
- Copernicus. (2025). *Sentinel data for crops monitoring and agricultural subsidy control*. <https://www.copernicus.eu/en/sentinel-data-crops-monitoring-and-agricultural-subsidy-control>
- Coppo, P., Cosi, M., Engel, W., Nieke, J., Smith, D., & Bianchi, S. (2010). Status of the Sea & Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) for the Sentinel-3 GMES mission. *SPIE Proceedings*, 7826. <https://doi.org/10.1117/12.868451>
- Counts, L. (2019, November 21). How hedge funds use satellite images to beat Wall Street – and Main Street. *Haas News | Berkeley Haas*. <https://newsroom.haas.berkeley.edu/how-hedge-funds-use-satellite-images-to-beat-wall-street-and-main-street/>
- Coyle, D. B., Stysley, P. R., Chirag, F. L., et al. (2019). The global ecosystem dynamics investigation (GEDI) lidar laser transmitter. In *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVII* (Vol. 11128, pp. 112–125). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2530428>
- Dai, Z., Hu, Y., & Zhao, G. (2017). The suitability of different nighttime light data for GDP estimation at different spatial scales and regional levels. *Sustainability*, 9(2), 305. <https://doi.org/10.3390/su9020305>
- Dang, R., & Liao, H. (2019). Radiative forcing and health impact of aerosols and ozone in China as the consequence of Clean Air actions over 2012–2017. *Geophysical Research Letters*, 46(21), 12511–12519. <https://doi.org/10.1029/2019GL084605>
- Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C. M., Rivera, J. P., & Moreno, J. (2013). A red-edge spectral index for remote sensing estimation of chlorophyll content in vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 139, 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.031>
- Denev, A., & Amen, S. (2020). *The book of alternative data: A guide for investors, traders and risk managers*. John Wiley & Sons.

- Denis, G., Claverie, A., Pasco, X., Darnis, J. P., de Maupeou, B., Lafaye, M., & Morel, E. (2017). Towards disruptions in Earth observation? New Earth Observation systems and markets evolution: Possible scenarios and impacts. *Acta Astronautica*, 137, 415-433.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). (2025). *TerraSAR-X: Germany's radar eye in space*. <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/projects-and-missions/terrasar-x>
- Didan, K. (2015). *MYD13Q1 MODIS/Aqua Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006* [Data set]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD13Q1.006>
- Domerg, M., Ostré, B., Joliff, Y., Grunevald, Y.-H., & Garcia, A. D. (2024). The development of a 3D-printed compliant system for the orientation of payloads on small satellites: Material characterization and finite element analysis of 3D-printed Polyetherketoneketone (PEKK). *Aerospace*, 11(4), 294. <https://doi.org/10.3390/aerospace11040294>
- Donaldson, D., & Storeygard, A. (2016). The view from above: Applications of satellite data in economics. *Journal of Economic Perspectives*, 30(4), 171–198. <https://doi.org/10.1257/jep.30.4.171>
- Dorado-Roda, I., Pascual, A., Godinho, S., Rodrigues, M., & Silva, C. A. (2021). Assessing the accuracy of GEDI data for canopy height and aboveground biomass estimates in Mediterranean forests. *Remote Sensing*, 13(12), 2279. <https://doi.org/10.3390/rs13122279>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., & Bargellini, P. (2022). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Dubayah, R., Blair, J. B., Goetz, S., Fatoyinbo, L., Hansen, M., Healey, S., Hofton, M., Hurtt, G., Kellner, J., Luthcke, S., & Armston, J. (2020). The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100002>
- Edmund Optics. *What is SWIR*. Retrieved September 9, 2025, from <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/what-is-swir/>
- Egido, A., Caparrini, M., Ruffini, G., Paloscia, S., Santi, E., Guerriero, L., Pierdicca, N., & Floury, N. (2012). Global Navigation Satellite Systems Reflectometry as a remote sensing tool for agriculture. *Remote Sensing*, 4(8), 2356–2372. <https://doi.org/10.3390/rs4082356>
- Eisinger, M., et al. (2023). Aerosol retrieval from EarthCARE MSI. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(4), 3437–3466. <https://amt.copernicus.org/articles/16/3437/2023/>
- Elvidge, C. D., Baugh, K., Zhizhin, M., Hsu, F. C., & Ghosh, T. (2017). VIIRS night-time lights. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21), 5860–5879. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1342050>

- eoPortal. (2025). *Jilin / Gaofen Constellation Overview*. <https://www.eoportal.org/satellite-missions/jilin-con>
- ESA. (2023). *Copernicus Sentinel-5P TROPOMI Level 2 product user manual*. <https://sentinel.esa.int>
- Escayo, J., Marzan, I., Martí, D., Tornos, F., Farci, A., Schimmel, M., & Fernández, J. (2022). Radar interferometry as a monitoring tool for an active mining area using Sentinel-1 C-Band data, case study of Riotinto mine. *Remote Sensing*, 14(13), 3061.
- European Commission. (2020). *Copernicus: Europe's eyes on Earth*. <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>
- European Commission. (2022). *BEACON project final report: Earth observation for agricultural insurance*. Horizon 2020 Programme. <https://cordis.europa.eu/project/id/821922>
- European Space Agency. (2017, November). *SMOS data products brochure*. <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SMOS-Data-Products-Brochure.pdf>
- European Space Agency. (2023). *Sentinel missions overview*. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>
- European Space Agency. (2024a). *TanSat mission overview*. <https://earth.esa.int/eogateway/missions/tansat>
- European Space Agency. (2024b). *Gaofen-3 (GF-3) mission*. EOportal. <https://www.eoportal.org/satellite-missions/gaofen-3>
- European Space Agency. (2024c). *OCO-2 mission description*. EOportal. <https://www.eoportal.org/satellite-missions/oco-2>
- Gao, F., Anderson, M., Daughtry, C., & Johnson, D. (2018). Toward mapping crop progress at field scales through fusion of Landsat and MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 188, 9–25. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.004>
- Garrigues, S., Ades, M., Remy, S., Kipling, Z., Flemming, J., & Ribas, R. (2023). Impact of assimilating NOAA VIIRS aerosol optical depth (AOD) observations on global AOD analysis from the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(17), 10473–10487. <https://doi.org/10.5194/acp-23-10473-2023>
- Geipel, J., Link, J., & Claupein, W. (2014). Combined analysis of hyperspectral and agro-meteorological data for early yield prediction in barley and wheat. *Field Crops Research*, 162, 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.02.010>
- GFDRR. (2020). *Bringing resilience to scale: Annual report FY20*. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery. <https://www.gfdrr.org/en/publication/gfdrr-annual-report-2020>
- Glaeser, E. L., Kim, H., & Luca, M. (2017). *Nowcasting the local economy: Using Yelp data to measure economic activity* (Working Paper No. 24010). National Bureau of Economic Research.
- Gobbo, S., Ghiraldini, A., Dramis, A., Dal Ferro, N., & Morari, F. (2021). Estimation of hail damage using crop models and remote sensing. *Remote Sensing*, 13(14), 2655.

- Gui, M., Liu, J., Zhang, C., & Dai, M.-Z. (2025). Advances in deep space probe navigation. *Applied Sciences*, 15(6), 3307. <https://doi.org/10.3390/app15063307>
- Guo, H., Fu, W., & Liu, G. (2019). Development of Earth observation satellites. *Scientific Satellite and Moon-Based Earth Observation for Global Change*, 31-49.
- Guo, H., Liu, Z., Jiang, H., Wang, C., Liu, J., & Liang, D. (2017). Big Earth Data: A new challenge and opportunity for Digital Earth's development. *International Journal of Digital Earth*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1264490>
- GW Prime. (2022). *Virtual Singapore – Building a 3D-empowered smart nation*. Geospatial World. <https://www.geospatialworld.net/prime/case-study/national-mapping/virtual-singapore-building-a-3d-empowered-smart-nation/>
- Ha, T., Shen, Y., Duddu, H., Johnson, E., & Shirliffe, S. J. (2022). Quantifying hail damage in crops using sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 14(4), 951.
- Hajkova, Z. (2024, April 5). *What is SAR imagery? Introduction to synthetic aperture radar*. European Space Imaging Blog. <https://www.euspaceimaging.com/blog/2024/04/05/what-is-sar-imagery/>
- Hakkenberg, C. R., Tang, H., Burns, P., & Goetz, S. J. (2023). Canopy structure from space using GEDI lidar. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 21(1).
- Han, F., Zhao, F., Li, F., Shi, X., Wei, Q., Li, W., & Wang, W. (2023). Improvement of monitoring production status of iron and steel factories based on thermal infrared remote sensing. *Sustainability*, 15(11), 8575. <https://doi.org/10.3390/su15118575>
- Hancock, T. (2022, August 31). Satellite data suggest more bad news from China's consumers. *Bloomberg*. https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-08-31/satellite-data-suggest-more-bad-news-from-china-s-consumers?utm_source=chatgpt.com
- Harris, C., & Stephens, M. (1988). A combined corner and edge detector. In *Proceedings of the Alvey Vision Conference* (pp. 147-151).
- Hasnat, B. (2018). Big data: An institutional perspective on opportunities and challenges. *Journal of Economic Issues*, 52(2), 580-588.
- Henderson, J. V., Storeygard, A., & Weil, D. N. (2012). Measuring economic growth from outer space. *American Economic Review*, 102(2), 994-1028. <https://doi.org/10.1257/aer.102.2.994>
- Hodgson, C. (2018, January 5). Satellite images suggest work on World Cup football stadiums in Qatar has been halted by blockade. *Business Insider*. <https://www.businessinsider.com/satellite-images-qatar-blockade-stadia-2017-12>
- Hoffman, R. N., & Leidner, S. M. (2005). An introduction to the near-real-time QuikSCAT data. *Weather and Forecasting*, 20(4), 476-493. https://ocean.weather.gov/quikscat/hoffman_leidner.pdf
- Hooper, J. (2025, May 23). Can satellites keep companies honest on emissions? *Financial Times*. <https://www.ft.com/content/03927a97-c9a4-447b-9b25-223171ffb6ff>
- Huang, F., Wang, Y., & Li, Q. (2022). Rapid assessment of post-typhoon building damage using SAR coherence change detection. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 78, 103124. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103124>

- Huang, F., Zhang, B., & Zhao, X. (2023). *The thermodynamics of the economy*. SSRN. <https://ssrn.com/abstract=4393439>
- Ialongo, I., Herman, J., Krotkov, N., Lamsal, L., Boersma, K. F., Hovila, J., & Tamminen, J. (2016). Comparison of OMI NO₂ observations and their seasonal and weekly cycles with ground-based measurements in Helsinki. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(10), 5203–5212. <https://doi.org/10.5194/amt-9-5203-2016>
- ICEYE. (2025). *ICEYE data product specification v6.0.4*. <https://sar.iceye.com/latest>
- Ilcev, S. D. (2005). *Global mobile satellite communications: For maritime, land and aeronautical applications*. Springer US.
- Imran, A. B., Khan, K., Ali, N., Ahmad, N., & Shah, K. (2020). Narrow band based and broadband derived vegetation indices using Sentinel-2 imagery to estimate vegetation biomass. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 6(1), 97–108. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2020.01.08>
- Jean, N., Burke, M., Xie, M., Davis, W. M., Lobell, D. B., & Ermon, S. (2016). Combining satellite imagery and machine learning to predict poverty. *Science*, 353(6301), 790–794.
- Jensen, J. R. (2007). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective* (2nd ed.). Pearson.
- Jhamb, P., Ferreira, S., Stephens, P., Sundaram, M., & Wilson, J. (2025). Shedding light on development: Leveraging the new nightlights data to measure economic progress. *PLOS ONE*, 20(2), e0318482. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318482>
- Jiang, F., & Deng, L. (2025). Orbit decaying simulation of QUESS satellite and its reentry prediction. *Journal of Physics: Conference Series*, 2977(1), 012094.
- Jiang, F., Deng, M., Tang, J., Fu, L., & Sun, H. (2022). Integrating spaceborne lidar and Sentinel-2 images to estimate forest above-ground biomass in northern China. *Carbon Balance and Management*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00212-y>
- Johnson, D. M., Rosales, A., Mueller, R., Reynolds, C., Frantz, R., Anyamba, A., Pak, E., & Tucker, C. (2021). USA crop yield estimation with MODIS NDVI: Are remotely sensed models better than simple trend analyses? *Remote Sensing*, 13(21), 4227. <https://doi.org/10.3390/rs13214227>
- Jones, B. F., & Olken, B. A. (2005). Do leaders matter? National leadership and growth since World War II. *The Quarterly Journal of Economics*, 120(3), 835–864.
- Kalb, V., Kosar, B., Collado-Vega, Y., & Davidson, C. (2023). Aurora detection from nighttime lights for Earth and space science applications. *Earth and Space Science*, 10(1). <https://doi.org/10.1029/2022EA002513>
- Kansakar, P., & Hossain, F. (2016). A review of applications of satellite earth observation data for global societal benefit and stewardship of planet earth. *Space Policy*, 36, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2016.05.005>
- Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (Eds.). (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and applications* (3rd ed.). Artech House.
- Kayros. (2021). *Drone flights over Cushing: Bringing transparency on crude*

- inventories to 100%*. <https://www.kayrros.com/drone-flights-over-cushing-bringing-transparency-on-crude-inventories-to-100>
- Kayrros. (2025). *Crude oil intelligence for traders*. <https://www.kayrros.com/products-coi-for-traders>
- Khan, R., & Gilani, H. (2021). Global drought monitoring with drought severity index (DSI) using Google Earth Engine. *Theoretical and Applied Climatology*, 146, 411–427. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03715-9>
- Kose, S., Koytak, E., & Hascicek, Y. S. (2012). An overview on the use of satellite communications for disaster management and emergency response. *International Journal of Emergency Management*, 8(4), 350–382.
- Koushik, C. S. N., Choubey, S. B., Choubey, A., & Pachori, K. (2020). A literature review on quantum experiments at space scale—Quess satellite. *Innovations in Electronics and Communication Engineering: Proceedings of the 8th ICIECE 2019*, 13-25.
- Kramer, H. J., & Cracknell, A. P. (2008). An overview of small satellites in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 29(15), 4285-4337.
- Lechner, W., & Baumann, S. (2000). Global navigation satellite systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(1–2), 67–85. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(99\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(99)00056-3)
- Lee, S. (2025, June 22). *Leading economic indicators: A quick look in macro*. NumberAnalytics Blog. [suspicious link removed]
- Levy, R. C., et al. (2025). *MODIS Dark-Target aerosol algorithm ATBD-16*. NASA/GSFC. <https://darktarget.gsfc.nasa.gov/satellite/modis/atbd-overview>
- LI Deren, ZHANG Guo, JIANG Yonghua, et al. PIESAT cloud service ecosystem PIE-Engine[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(01): 1-6
- Li, D., Wang, M., & Yang, F. (2023). Internet intelligent remote sensing scientific experimental satellite LuoJia3-01. *Geo-Spatial Information Science*, 26(3), 257-261.
- Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I. F., & Sobrino, J. A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Lindstrom, S. (2018). *Quick guide: GCOM AMSR-2 s (Version 3)* [Factsheet]. Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS), University of Wisconsin–Madison. https://cimss.ssec.wisc.edu/goes/OCLOFactSheetPDFs/QuickGuide_GCOMAMSR2s_v3.pdf
- Link, D., Schwarting, T., Angal, A., & Xiong, X. (2025). Pre-launch Day-Night Band radiometric performance of JPSS-3 and -4 VIIRS. *Remote Sensing*, 17(7), 1111. <https://doi.org/10.3390/rs17071111>
- Liu, L. Y., Chen, L. F., Liu, Y., Yang, D. X., Zhang, X. Y., Lu, N. M., Ju, W. M., Jiang, F., Yin, Z. S., Liu, G. H., Tian, L. F., Hu, D. H., Mao, H. Q., Liu, S. H., Zhang, J.

- H., Lei, L. P., Fan, M., Zhang, Y. C., Zhou, X., & Wu, Y. R. (2022). Satellite remote sensing for global stocktaking: Methods, progress and perspectives. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(2), 243–267. <https://doi.org/10.11834/jrs.20221806>
- Liu, Y. N., Sun, D. X., Hu, X. N., Liu, S. F., & Cao, K. Q. (2020, June). AHSI: The hyperspectral imager on China's GaoFen-5 Satellite. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 509, Article 012033). IOP Publishing.
- Lobell, D. B., Thau, D., Seifert, C., Engle, E., & Little, B. (2015). A scalable satellite-based crop yield mapper. *Remote Sensing of Environment*, 164, 324–333. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.021>
- Maini, A., & Agrawal, V. (2011). *Satellite technology: Principles and applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Manski, C. F. (2015). Communicating uncertainty in official economic statistics: An appraisal fifty years after Morgenstern. *Journal of Economic Literature*, 53(3), 631–653.
- Massie, S. T., Mauceri, S., & Schmidt, S. (2023). Correcting 3-D cloud effects in XCO₂ retrievals from the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2). *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(6), 1461–1476. <https://doi.org/10.5194/amt-16-1461-2023>
- Mathew, A., Shekar, P. R., Nair, A. T., Aravind, A., Praveen, K. V., & Nair, A. S. (2024). Unveiling urban air quality dynamics during COVID-19: A Sentinel-5P TROPOMI hotspot analysis. *Scientific Reports*, 14(1), 21624.
- McCoy, R. M. (2004). *Field methods in remote sensing*. The Guilford Press.
- McLinden, C. A., Griffin, D., Davis, Z., Jervis, D., Fioletov, V., & Strong, K. (2024). An independent evaluation of GHGSat methane emissions: Performance assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(15), e2023JD039906. <https://doi.org/10.1029/2023JD039906>
- Mi, H., Qiao, G., Wang, W., & Hong, Y. (2019). Analysis of urban growth from 1960 to 2015 using historical DISP and Landsat time series data in Shanghai. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 250. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4420-2>
- Minetto, R., Segundo, M. P., Rotich, G., & Sarkar, S. (2021). Measuring human and economic activity from satellite imagery to support city-scale decision-making during COVID-19 pandemic. *IEEE Transactions on Big Data*, 7(1), 56–68. <https://doi.org/10.1109/tbdata.2020.3032839>
- MIT Technology Review. (2023). *The Download: Good climate news, and promising pixels*. <https://www.technologyreview.com/2023/12/20/1085753/the-download-good-climate-news-and-promising-pixels/>
- Montanaro, M., Gerace, A., & Thome, K. (2022). Landsat 9 Thermal Infrared Sensor-2 (TIRS-2) pre- and post-launch spatial response performance. *Remote Sensing*, 16(6), 1065. <https://doi.org/10.3390/rs16061065>
- NASA. (2014, March 4). *Seeing the light*. NASA Earth Observatory. <https://www.earthobservatory.nasa.gov/features/FalseColor/page2.php>
- NASA. (2014, October 15). *ICESat-2 overview*. Scientific Visualization Studio. <https://svs.gsfc.nasa.gov/gallery/icesat2/>
- NASA. (2014, December 18). *NASA's spaceborne carbon counter maps new details*.

- Jet Propulsion Laboratory. <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-spaceborne-carbon-counter-maps-new-details/>
- NASA. (2018). *ICESat-2: Measuring the height of a changing Earth* [Brochure]. https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page_files/ICESat2missionBrochureFINAL1.pdf
- NASA. (2018, June 4). *NASA soil moisture data advance global crop forecasts*. SMAP Mission News. <https://smap.jpl.nasa.gov/news/1266/nasa-soil-moisture-data-advance-global-crop-forecasts/>
- NASA. (2024, October 10). *SMAP's first high-resolution global soil moisture map*. NASA Scientific Visualization Studio. <https://svs.gsfc.nasa.gov/30601/>
- NASA. (2025, April 10). *MetOp-C ASCAT Level 2 Ocean Surface Vectors optimized for coastal ocean* [Data set]. Physical Oceanography Distributed Active Archive Center. <https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/ASCATC-L2-Coastal>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2010, January 1). *Ocean surface winds*. Science On a Sphere. <https://sos.noaa.gov/catalog/datasets/ocean-surface-winds/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2013, August 21). *NUCAPS algorithm theoretical basis documentation*. Office of Satellite and Product Operations. https://www.ospo.noaa.gov/resources/documents/pdf/NUCAPS_ATBD_20130821.pdf
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021, July 28). *Satellite microwave sounding measurements in weather prediction: A report of the virtual NOAA workshop on microwave sounders* (NOAA Technical Report NESDIS 155). National Environmental Satellite, Data, and Information Service. https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/34366/noaa_34366_DS1.pdf
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2024, February 26). *Altimetric bathymetry*. Ocean Topography & Cryosphere Branch, Laboratory for Satellite Altimetry. <https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/AltBathy/>
- Natural Resources Canada. (2025, January 8). *Microwave remote sensing*. <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-publications/satellite-elevation-air-photos/microwave-remote-sensing>
- Njambi, R. (2023, May 12). *How satellite imagery helps with construction monitoring*. UP42 Blog. <https://up42.com/blog/satellite-imagery-helps-with-construction-monitoring>
- Njambi, R. (2023, December 21). *An introduction to thermal infrared*. UP42. <https://up42.com/blog/introduction-to-thermal-infrared>
- Ohenhen, L. O., Zhai, G., Lucy, J., Werth, S., Carlson, G., Khorrami, M., & Shirzaei, M. (2025). Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises. *Nature Cities*, 1-12.
- Olander, T. L., & Velden, C. S. (2019). The Advanced Dvorak Technique (ADT) for estimating tropical cyclone intensity: Update and new capabilities. *Weather and Forecasting*, 34(4), 905–922. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0007.1>

- Orbital Insight. (2021, December 6). *Orbital Insight 与 Esri 的 ArcGIS 平台整合, 以简化卫星和传感器图像分析* [Orbital Insight integrates with Esri's ArcGIS platform to simplify satellite and sensor image analysis]. Business Wire. <https://www.businesswire.com/news/home/20211206005322/zh-CN>
- Ouzounov, D., & Khachikyan, G. (2024). Studying the impact of the geospace environment on solar lithosphere coupling and earthquake activity. *Remote Sensing*, 16(1), 24. <https://doi.org/10.3390/rs16010024>
- Ozesmi, S. L., & Bauer, M. E. (2002). Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, 10(5), 381–402. <https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>
- Pan, J. (2014). Quantum science satellite. *Chinese Journal of Space Science*, 34, 547.
- Park, J. H., Jung, H., Lim, C. H., & Chang, T. (2020). The economic impact analysis of satellite development and its application in Korea. *Acta Astronautica*, 177, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.06.031>
- Pelton, J. N., Madry, S., & Camacho-Lara, S. (Eds.). (2017). *Handbook of satellite applications: The complete guide to satellite communications, remote sensing, navigation, and meteorology* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23386-4>
- Plant, W. J. (2001). Satellite remote sensing microwave scatterometers. In J. H. Steele (Ed.), *Encyclopedia of ocean sciences* (pp. 2539–2551). Academic Press. <https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0337>
- Platt, U., & Stutz, J. (2008). *Differential optical absorption spectroscopy: Principles and applications*. Springer.
- Pulella, A., & Sica, F. (2021). Situational awareness of large infrastructures using remote sensing: The rome–fiunicino airport during the COVID-19 lockdown. *Remote Sensing*, 13(2), 299. <https://doi.org/10.3390/rs13020299>
- Qamsary, S. S., Arefi, H., & Shah-Hosseini, R. (2019). Fusion of UAVSAR and Quickbird Data for Urban Growth Detection. *Proceedings*, 18(1), 13. <https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06186>
- Reed, S. (2018, October 8). Satellites aid the chase for better information on oil supplies. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2018/10/08/business/search-for-better-information-on-oil-supplies.html>
- Reuter, D. C., Richardson, C. M., Pellerano, F. A., Irons, J. R., Allen, R. G., & Anderson, M. (2015). The thermal infrared sensor (TIRS) on Landsat 8: Design overview and pre-launch characterization. *Remote Sensing*, 7(1), 1135–1153. <https://doi.org/10.3390/rs70101135>
- Rio Tinto. (2019). *Annual report 2018*. <https://www.riotinto.com/-/media/content/documents/invest/reports/annual-reports/2018/rt-annual-report-2018.pdf?rev=56f36b274ca14dc2b23cf8ef4f284cdc>
- Roy, P. S., Behera, M. D., & Srivastav, S. K. (2017). Satellite remote sensing: Sensors, applications and techniques. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 87(3), 447–464. <https://doi.org/10.1007/s40010-017-0428-8>
- RS Metrics. (2013, August 12). *RS Metrics measures 2Q14 car traffic at Walmart*.

- PRWeb.
https://www.prweb.com/releases/rs_metrics_measures_2q14_car_traffic_at_walmart/_prweb11019390.htm
- RS Metrics. (2019). 交易“黑科技”：用卫星预测金属和商品价格 [Trading "black technology": Using satellites to predict metal and commodity prices]. 华尔街见闻 [Wallstreetcn].
- RS Metrics. (2020, February 18). *RS Metrics announces expansion into bulk commodities coverage through partnership with ICEYE* [Press release]. EIN Presswire. <https://www.einpresswire.com/article/510542002/rs-metrics-announces-expansion-into-bulk-commodities-coverage-through-partnership-with-iceye>
- Ruiz Villena, C., Anand, J. S., Leigh, R. J., Monks, P. S., Parfitt, C. E., & Vande Hey, J. D. (2020). Discrete-wavelength DOAS NO₂ slant column retrievals from OMI and TROPOMI. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(4), 1735–1756. <https://doi.org/10.5194/amt-13-1735-2020>
- Ryan, J. C., Smith, L. C., Cooley, S. W., Pitcher, L. H., & Pavelsky, T. M. (2020). Global characterization of inland water reservoirs using ICESat-2 altimetry and climate reanalysis. *Geophysical Research Letters*, 47(17). <https://doi.org/10.1029/2020GL088543>
- Sánchez, J., Monzón, N., & Salgado, A. (2018). An analysis and implementation of the Harris corner detector. *Image Processing On Line*, 8, 305–328. <https://doi.org/10.5201/ipol.2018.229>
- Sánchez-García, E., Gorroño, J., Irakulis-Loitxate, I., Varon, D. J., & Guanter, L. (2021). Mapping methane plumes at very high spatial resolution with the WorldView-3 satellite. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2021, 1–26.
- Sanna, D., Madonna, D. P., Pontani, M., & Gasbarri, P. (2024). Orbit rendezvous maneuvers in cislunar space via nonlinear hybrid predictive control. *Dynamics*, 4(3), 609–642. <https://doi.org/10.3390/dynamics4030032>
- SatVu. (2023, October). *World first in high-resolution satellite thermal imaging defines new era of climate monitoring*. <https://www.satellitevu.com/news/world-first-in-high-resolution-satellite-thermal-imaging-defines-new-era-of-climate-monitoring>
- Shi, K., Wu, Y., Li, D., & Li, X. (2022). Population, GDP, and carbon emissions as revealed by SNPP-VIIRS nighttime light data in China with different scales. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3195266>
- Singapore Land Authority. (2014). *3D national mapping project: Singapore advanced map*. <https://www.sla.gov.sg>
- Sinha, A., & Crane, V. (2024). *Manufacturing and industrial processes sector: Cement manufacturing emissions*. TransitionZero, UK, Climate TRACE Emissions Inventory. <https://climatetrace.org>
- Skakun, S., Kussul, N., Shelestov, A., & Kussul, O. (2014). Flood hazard and flood risk assessment using a time series of satellite images: A case study in Namibia. *Risk Analysis*, 34(8), 1521–1537. <https://doi.org/10.1111/risa.12156>
- Slotnick, D. (2020, March 30). Incredible satellite photos show parked planes sitting on

- runways at airports in the US and Europe, as covid-19 puts a near stop to global air travel. *Business Insider*. <https://www.businessinsider.com/coronavirus-photos-airplanes-grounded-parked-runways-satellite-2020-3>
- Sosa, L., Justel, A., & Molina, Í. (2021). Detection of crop hail damage with a machine learning algorithm using time series of remote sensing data. *Agronomy*, 11(10), 2078.
- SpaceX. (2023). *Starlink*. <https://www.starlink.com/>
- Srinivasan, M., & Tsonos, V. (2023). Satellite altimetry for ocean and coastal applications: A review. *Remote Sensing*, 15(16), 3939. <https://doi.org/10.3390/rs15163939>
- Stack, K. M., & Milliken, R. E. (2015). Modeling near-infrared reflectance spectra of clay and sulfate mixtures and implications for Mars. *Icarus*, 250, 332–356. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.12.009>
- Stone, A. (2017). *Virtual Singapore is more than just a 3-D model, it's an intelligent rendering of the city*. GovTech. <https://www.govtech.com/fs/virtual-singapore-is-more-than-just-a-3-d-model-its-an-intelligent-rendering-of-the-city.html>
- Su, L., & Jia, J. (2023). The relationship between nighttime light intensity and GDP in Shanghai districts. *Journal of Computational Methods in Science and Engineering*, 23(1), 3–8.
- Sun, J., Yang, J., Shi, S., Chen, B., Du, L., Gong, W., & Song, S. (2017, September 13). Estimating rice leaf nitrogen concentration: Influence of regression algorithms based on passive and active leaf reflectance. *Remote Sensing*, 9(9), 951. <https://www.mdpi.com/2072-4292/9/9/951>
- Swiss Re. (2021). *Satellite data in parametric crop insurance* (Sigma Report No.4). <https://www.swissre.com/dam/jcr:e73ee7c4-726a-4f31-947d-f330e5a6c6e1/sigma-4-2021-en.pdf>
- Tao, M., Chen, L., Wang, Z., Wang, J., Che, H., Xu, X., Wang, W., Tao, J., Zhu, H., & Hou, C. (2017). Evaluation of MODIS Deep Blue aerosol algorithm in the desert region of East Asia: Ground validation and intercomparison. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(18), 10,357–10,368. <https://doi.org/10.1002/2017JD026976>
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., & Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Tsyganskaya, V., Martinis, S., & Marzahn, P. (2019). Flood monitoring in vegetated areas using multitemporal Sentinel-1 data: Impact of time series features. *Water*, 11(9), 1938.
- Twele, A., Cao, W., Plank, S., & Martinis, S. (2016). Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. *International Journal of Remote Sensing*, 37(13), 2990–3004.
- U.S. Department of Agriculture. (2025, February). *World agricultural production* (Circular Series WAP 02-25). Foreign Agricultural Service. <https://apps.fas.usda.gov/PSDONline/Circulars/2025/02/production.pdf>
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1981). *Microwave remote sensing: Active*

- and passive* (Vol. 1, Fundamentals and radiometry). Addison-Wesley.
- United Nations Development Programme (UNDP). (2019). *Satellite-assisted poverty assessment in China*.
<https://www.cn.undp.org/content/dam/china/docs/Publications/UNDP-CH-PR%20Poverty%20Assessment%202019.pdf>
- United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). (2015, March 2). *NASA releases first global rainfall and snowfall map*. UN-SPIDER Knowledge Portal.
<https://www.un-spider.org/news-and-events/news/nasa-releases-first-global-rainfall-and-snowfall-map>
- US Bureau of Labor Statistics. (2020). *Frequently asked questions: The impact of the coronavirus (COVID-19) pandemic on the employment situation for April 2020*. Monthly Labor Review.
- Vallone, G., Bacco, D., Dequal, D., Gaiarin, S., Luceri, V., Bianco, G., & Villoresi, P. (2015). Experimental satellite quantum communications. *Physical Review Letters*, 115(4), 040502.
- van Geffen, J., Eskes, H., Compernelle, S., Pinardi, G., Verhoelst, T., Lambert, J.-C., & Veefkind, J. P. (2022). Sentinel-5P TROPOMI NO₂ retrieval: Impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 2037–2060.
<https://doi.org/10.5194/amt-15-2037-2022>
- Vangi, E., D'Amico, G., Francini, S., Giannetti, F., Lasserre, B., Marchetti, M., & Chirici, G. (2021). The new hyperspectral satellite PRISMA: Imagery for forest-type discrimination. *Sensors*, 21(4), 1182.
<https://doi.org/10.3390/s21041182>
- Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claasen, J., Rothe, H., Meijering, P., & Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 120, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
- Velinov, P. I. Y. (2017). Development of advanced space sciences after first artificial satellite. 60-th anniversary of the space age. *Space Science and Technology*, 29(1), 13–20.
- Veloso, A., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T., & Planells, M. (2017). Understanding the temporal behavior of crops using Sentinel-1 and Sentinel-2-like data for agricultural applications. *Remote Sensing of Environment*, 199, 415–426.
- Vermote, E. F., Tanré, D., Deuzé, J. L., Herman, M., & Morcrette, J. J. (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3), 675–686.
- Vinci, G., Vanzani, F., Fontana, A., & Campana, S. (2024). Lidar applications in archaeology: A systematic review. *Archaeological Prospection*, 32(1), 81–101.
<https://doi.org/10.1002/arp.1931>
- Voiland, A. (2010, November 2). *Aerosols: Tiny particles, big impact*. NASA Earth Observatory.
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols#:~:text=Nature%20generates>

- %20broad%20swaths%20of,of%20dust%20blow%20above%20deserts
- Wang, S., Lu, X., Cheng, X., Li, X., Peichl, M., & Mammarella, I. (2018). Limitations and challenges of MODIS-derived phenological metrics across different landscapes in pan-Arctic regions. *Remote Sensing*, 10(11), 1784. <https://doi.org/10.3390/rs10111784>
- Wang, X., Li, S., Zhang, C., Mao, D., & Wang, L. (2025). Satellite images reveal soil color changes in typical black soil region of China: Brighter, redder, and yellower. *CATENA*, 254, 108958. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108958>
- Wei, D., Chang, Y., & Kuang, H. (2025). Extraction and spatiotemporal analysis of impervious surfaces in Chongqing based on enhanced DeepLabV3+. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94882-6>
- Wei, D., Guo, C., & Yang, L. (2023). Intelligent hierarchical admission control for low-Earth orbit satellites based on deep reinforcement learning. *Sensors*, 23(20), 8470. <https://doi.org/10.3390/s23208470>
- World Bank. (2021a). *Africa's pulse, No. 23 (Spring 2021): Harnessing data innovation for nowcasting economic activity in Sub-Saharan Africa*. <https://www.worldbank.org/en/programs/africa-pulse/publication/africas-pulse-spring-2021>
- World Bank. (2021b). *Global economic prospects: Using satellite data to enhance growth forecasts*. In *Global Economic Prospects*, June 2021 (pp. 89-115). https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/35647/9781464816659_Ch03.pdf
- World Bank. (2021c). *Understanding the requirements for surveys to support satellite-based crop type mapping: Evidence from Sub-Saharan Africa*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/339781617301798195/pdf/Understanding-the-Requirements-for-Surveys-to-Support-Satellite-Based-Crop-Type-Mapping-Evidence-from-Sub-Saharan-Africa.pdf>
- World Bank. (2024, August 13). *Investors support Amazon reforestation through record-breaking USD 225 million World Bank outcome bond*. <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/08/13/investors-support-amazon-reforestation-through-record-breaking-usd-225-million-world-bank-outcome-bond>
- World Meteorological Organization. (2024, January 22). *Instrument: OCO spectrometer* [OSCAR database entry]. https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/oco_spectrometer
- Wu, Q., Luo, H. Y., Li, Z. W., Lin, H., Jin, W., Ding, Y., & Xiong, W. (2024). An overview of optical schemes for spaceborne greenhouse-gas passive remote-sensing payload. In *Proceedings of SPIE* (Vol. 13504, Article 1350407). SPIE Digital Library. <https://doi.org/10.1117/12.3046152>
- Wulder, M. A., & Coops, N. C. (2014). Satellites: Make Earth observations open access. *Nature*, 513(7516), 30–31. <https://doi.org/10.1038/513030a>
- Xia, C., Liu, C., Cai, Z., Zhao, F., Su, W., Zhang, C., & Liu, Y. (2021). First sulfur dioxide observations from the Environmental Trace Gases Monitoring Instrument (EMI) onboard the Gaofen-5 satellite. *Science Bulletin*, 66(10), 969–973.

- <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.01.018>
- Xiong, X., & Butler, J. J. (2020). MODIS and VIIRS calibration history and future outlook. *Remote Sensing*, 12(16), 2523. <https://doi.org/10.3390/rs12162523>
- Xu, X., Teng, C., Zhao, Y., Du, Y., Zhao, C., Yang, G., & Li, Z. (2020). Prediction of wheat grain protein by coupling multisource remote sensing imagery and ECMWF data. *Remote Sensing*, 12(8), 1349.
- Xue, Y., Zhang, B., & Zhao, X. (2025). Nowcasting firms' operating activities from satellite data on thermal infrared radiation. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, forthcoming.
- Yang, Z. F., Li, Z. W., Zhu, J. J., Wang, Y. D., & Wu, L. X. (2020). Use of SAR/InSAR in mining deformation monitoring, parameter inversion, and forward predictions: A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 8(1), 71–90.
- You, J., Li, X., Low, M., Lobell, D., & Ermon, S. (2017). Deep Gaussian process for crop yield prediction based on remote sensing data. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 31(1).
- You, J., Li, X., Low, M., Ko, D., Lobell, D. B., & Ermon, S. (2022). Graph neural networks for large-scale crop disease prediction. *Nature Food*, 3(9), 652–661.
- Yu, B., Wang, J., Deng, S., Chen, Y., Wang, Z., Zhu, X., Shi, Z., & Davis, S. J. (2018). DeepSolar: A machine learning framework to efficiently construct a solar deployment database in the United States. *Nature Energy*, 3(8), 764–772. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0241-8>
- YUE Tao, LIU Wei, LIU Wei, et al. China Siwei new generation high-resolution commercial remote sensing satellite system[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(10): 1913-1922.
- Yu, H., Hao, X., Wu, L., Zhao, Y., & Wang, Y. (2023). Eye in outer space: Satellite imageries of container ports can predict world stock returns. *Humanities and Social Sciences Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-023-01891-9>
- Zeng, L., Charoensuk, T., Chewning, C., Druce, D., Toettrup, C., Nielsen, K., & Bauer-Gottwein, P. (2025). Exploitation of satellite earth observation datasets for hydrologic analysis of large reservoirs in Thailand. *Journal of Hydrology*, 659, 133085. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133085>
- Zhang, J., Müller, J.-P., Chen, J., & Li, Y. (2023). *SPATIAL: Soybean price forecasting using satellite-derived yield estimates and AI*. Earth Observation for Sustainable Development Report Series, ESA-ESRIN, Issue 2023-03.
- Zhong, B., Yang, A., Liu, Q., Wu, S., Shan, X., Mu, X., Hu, L., & Wu, J. (2021). Analysis ready data of the Chinese GaoFen satellite data. *Remote Sensing*, 13(9), 1709. <https://doi.org/10.3390/rs13091709>
- Zhu, X., Cai, F., Tian, J., & Williams, T. (2018). Spatiotemporal fusion of multisource remote sensing data: Literature survey, taxonomy, principles, applications, and future directions. *Remote Sensing*, 10(4), 527.
- Zhu, Z., Wang, S., & Woodcock, C. E. (2015). Improvement and expansion of the Fmask algorithm: Cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment*, 159, 269–277.

- 昂海松, 童明波, 余雄庆 (主编). (2015). *航空航天概论*. 北京: 科学出版社.
- 曹冲. (2016). *北斗与 GNSS 系统概论*. 北京: 电子工业出版社.
- 东方证券期货研究所. (2025 年 1 月 21 日). 遥感指数预测大豆单产相关性探究 [行业研究报告]. 东证期货. <https://www.fxbaogao.com/view?id=4678895>
- 范子英, 彭飞, 刘冲. 政治关联与经济增长——基于卫星灯光数据的研究[J]. *经济研究*, 2016, 51 (01): 114-126.
- 冯筠, 高峰, 孙成权. (2001). 遥感技术在全球变化研究中的应用. *遥感技术与应用*, (04), 237-241.
- 国家统计局. (2025). 什么是宏观经济的先行指标、同步指标与滞后指标. 国家统计局官网. http://www.stats.gov.cn/zs/tjws/tjzb/202301/t20230101_1940241.html
- 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所. (2020). *中国能源革命进展报告 (2020)*. 石油工业出版社
- 黄占斌, 梁军平, & 马妍. (2024). *碳达峰碳中和导论*. 化学工业出版社.
- 蒋长林, 李清, 王羽, 等. (2024). 天地一体化网络关键技术研究综述. *软件学报*, 35(01), 266-287.
- 李敬伟, 黎辉, 封莉, 李瑛, 黄宇, 李友平... & 甘为群. (2025). “夸父一号”卫星莱曼阿尔法太阳望远镜在轨平场定标偏摆方案及结果. *天文学报*, 66 (01), 106-122.
- 梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 程洁, 范闻捷, 何涛, 等. (2020). 2019 年中国陆表定量遥感发展综述. *遥感学报*, 24(06), 618-671.
- 廖理. (2021). 另类数据: 经济增长的新亮点. *人民论坛·学术前沿*, (06), 22-27.
- 刘健, & 曹冲. (2020). 全球卫星导航系统发展现状与趋势. *导航定位学报*, 8(01), 1-8.
- 马驰原, 曹宇静, 段恩奎 & 雷晓华. (2021). 太空环境下哺乳动物胚胎发育和生殖研究进展及展望. *中国科学: 生命科学*, 51(02), 116-125.
- 欧阳宏达, 赵书河 & 张新明. (2023). 基于多源遥感数据和 EC-LUE 模型的冬小麦产量估算. *中国农业信息*, 35 (01), 27-42.
- 彭燕, 何国金, 张兆明, 尹然宇. (2020). 中国区域 Landsat 遥感指数产品. *中国科学数据*, 5(4), 1-12.
- 青海省自然资源厅. (2025, July 15). 青海全力推进绿色矿山建设. Retrieved from <https://zrzyt.qinghai.gov.cn/dt/jjzr/7rffifunb7ri>
- 曲向芳, 刘维德, 张曼倩, 等. (2025). 2024 年中国卫星应用若干重大进展. *卫星应用*, (02), 6-14.
- 孙成忠, 李成名, & 洪志刚. (2002). 基于卫星遥感影像的城市地图快速更新技术. *测绘通报*, (12), 17-19.
- 田欣媛, 张永红, 刘睿, 魏钜杰. (2022). 考虑植被红边信息的多时相 Sentinel-2 大范围冬小麦提取研究. *遥感学报*, 26(10), 1988-2000. <https://doi.org/10.11834/jrs.20211359>
- 王正兴, 刘闯, HUETE, A. (2003). 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. *生态学报*, (05), 979-987.
- 熊俊楠, 彭超, 程维明, 李伟, 刘志奇, 范春捆 & 孙怀张. (2018). 基于 MODIS-NDVI 的云南省植被覆盖度变化分析. *地球信息科学学报*, 20(12), 1830-1840.
- 徐冠华, 柳钦火, 陈良富 & 刘良云. (2016). 遥感与中国可持续发展: 机遇和挑战. *遥感学报*, 20(05), 679-688.

- 徐嘉源, 陈美招, 郑荣宝, & 马小宁. (2021). 基于珞珈一号的珠三角地区 GDP 空间化研究. *生态与农村环境学报*, 37(6), 689-697.
- 云南省人民政府. (2025, July 8). 建设绿色矿山对矿山企业和社会发展都有什么好处? Retrieved from https://www.yn.gov.cn/hdjl/ynzcjd/2025nynzcjd/2025lsks/202507/t20250708_315127.html
- 张永维. (2001). 中国科学探测与技术试验卫星. *中国航天*, (7), 3-6.
- 长光卫星技术. (2023). 吉林一号商业遥感产品与服务. <https://www.jl1global.com/products/>
- 赵龙才, 李粉玲, & 常庆瑞. (2023). 农作物遥感识别与单产估算研究综述. *农业机械学报*, 54(02), 1-19.
- 赵龙才, 李粉玲 & 常庆瑞. (2023). 农作物遥感识别与单产估算研究综述. *农业机械学报*, 54(02), 1-19.
- 赵英时. (2013). *遥感应用分析原理与方法*. 科学出版社.
- 赵志明, 翟峰, 付重 & 张红亮. (2021). 科学技术试验卫星发展与展望. *航天器工程*, 30(06), 31-43.
- 赵忠明, 高连如, 陈东, 岳安志, 陈静波, 刘东升... & 孟瑜. (2019). 卫星遥感及图像处理平台发展. *中国图象图形学报*, 24(12), 2098-2110.
- 中国保险行业协会, & 中国农业风险管理研究会. (2025). 《农业保险遥感技术应用规范》系列标准. 来自中国保险行业协会官网. <http://www.csjrw.cn/2025/0820/552395.html>
- 自然资源部. (2025, June 26). 眉山市局“三个强化”全力推动绿色矿山建设. Retrieved from <https://www.mnr.gov.cn/dt/dfdt/202506/t202506262893807.html>