

海洋水色卫星技术进展

宋庆君¹, 马超飞¹, 林明森¹, 蒋兴伟¹, 王丽丽², 徐彭梅³,
唐军武⁴, 陈鹏⁵, 陆应诚⁶, 危峻⁷, 张可立³

1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081;
2. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094;
3. 北京空间机电研究所, 北京 100094;
4. 崂山实验室, 青岛 266237;
5. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012;
6. 南京大学, 南京 210023;
7. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 201800

摘要: 本文从全球海洋水色观测需求出发, 回顾了全球近50年的海洋水色遥感器及其关键技术的发展历程, 梳理了各国海洋水色遥感器任务部署和科学目标, 探讨了水色遥感器成像体制、通道选择、技术约束与发展历史沿革, 分析了全球水色观测的时空覆盖需求、在轨定标技术手段及未来发展方向。对各国过去10年和未来10年的全球海洋观测与重点海域任务布局进行了分析, 厘清了今后海洋水色卫星观测的关注重点和技术突破方向, 结合中国海洋水色卫星发展, 提出了中国海洋水色卫星技术发展路线和未来创新领域突破的设想。

关键词: 水色遥感, 在轨定标, 海洋卫星, 通道选择, 成像体制, 载荷配置

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 宋庆君, 马超飞, 林明森, 蒋兴伟, 王丽丽, 徐彭梅, 唐军武, 陈鹏, 陆应诚, 危峻, 张可立. 2025. 海洋水色卫星技术进展. 遥感学报, 29(6): 1399-1425

Song Q J, Ma C F, Lin M S, Jiang X W, Wang L L, Xu P M, Tang J W, Chen P, Lu Y C, Wei J and Zhang K L. 2025. Advances in ocean color observation satellite technology. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 1399-1425 [DOI: 10.11834/jrs.20255013]

1 引言

叶绿素是海洋浮游植物的主要光合色素, 能反映初级生产力, 对全球和区域海洋初级生产力的准确估算也是地球碳循环研究的关键。Clarke等(1970)在《科学》期刊上的论文, 展现了开阔海洋光谱反射率变化与叶绿素浓度相关, 激发了人类利用光谱辐射计从太空中探测广阔海洋叶绿素的兴趣。1978年美国的气象卫星Nimbus-7发射升空, 搭载了海岸带彩色扫描仪CZCS (Coastal Zone Colour Scanner), 让人类第一次看到了全球海洋叶绿素浓度的分布情况 (Gordon等, 1980)。1997年, 改进的海洋宽视场传感器SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) 开始了全球水色观测,

其设置的8个通道也成为后续水色遥感器的基本配置, 并发展了沿用至今的大气校正和海洋叶绿素估算算法 (Gordon和Wang, 1994; O'Reilly等, 1998)。在SeaWiFS成功经验的基础上, 从20世纪90年代末开始, 多家机构发射了不同遥感器开展全球水色观测, 具有代表性的传感器有: 美国的中分辨率成像光谱辐射仪MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, 搭载在Terra和Aqua卫星上) 与可见光红外成像辐射计VIIRS (Visible and Infrared Imaging Radiometer Suite, 搭载在Suomi-NPP、NOAA20、NOAA21卫星上), 欧洲的中等分辨率成像光谱仪MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer, 搭载在ENVISAT卫星上) 与海陆彩色成像仪OLCI (Ocean and Land Colour Instrument,

收稿日期: 2025-01-08; 预印本: 2025-04-24

基金项目: 民用航天预先研究项目(编号:D010202); 国家自然科学基金(编号:42176183, 42371380)

第一作者简介: 宋庆君, 研究方向为海洋光学遥感及定标检验技术。E-mail: kingdream@mail.nsoas.org.cn

搭载在 Sentinel-3A/B 卫星上), 日本的全球成像仪 GLI (Global Imager, 搭载在卫星 ADEOS-II 上) 和第二代全球成像仪 SGLI (Second generation Global Imager, 搭载在 GCOM-C 卫星上), 中国的水色水温扫描仪 COCTS (Chinese Ocean Color and Temperature Scanner, 搭载在 HY-1A/B/C/D 卫星上), 韩国的静止轨道水色成像仪 GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) 以及第二代静止轨道水色成像仪等。在 20 多年的时间内, 全球各国都在大力开展水色遥感器的研究 (蒋兴伟等, 2005; 潘德炉等, 2004; Ahn 等, 2012; Ahn 和 Park, 2020; Carder 等, 2004; Chen 等, 2021c; Doerffer 和 Schiller, 2007; Matsuoka 等, 2022; Schueler 等, 2003; Smith 等, 2018; Song 等, 2019; Wang 等, 2013a; Ye 等, 2021; Zibordi 等, 2006), 这些序列化遥感器相继入轨应用, 充分反映了水色遥感进入稳健成熟发展阶段。

由于水色遥感强调了对全球海域的覆盖频次, 对于精细化的近海水体、内陆水体以及河口区域 (即典型“二类水体”范围) 的监测, 因缺乏必要的算法和仪器配置而易于忽视。这些近海水体变化趋势更需要被关注, 借鉴水色遥感的技术体系, 一些高分辨率卫星资料逐渐在二类水体监测中发挥作用, 如利用 Landsat 卫星数据统计全球内陆湖泊藻华的变化趋势 (Hou 等, 2022)。这些光学载荷的泛水域化应用, 扩展了水色遥感器的应用边界, 并使高空间分辨率的优势逐渐显现; 在海岸带应用、内陆水体监测等方面, 都可以看到一些此类光学遥感器的应用, 如 Sentinel-2 的 MSI 载荷、中国高分系列卫星光学载荷、商业小卫星光学载荷 (如海丝 2 号) 等 (齐琳等, 2023; 周屈等, 2020; Chen 和 Quan, 2012; Lee 等, 2024; Shi 等, 2022; Zhang 等, 2018)。这些卫星在水色遥感上的成功应用, 得益于其载荷对经典水色遥感器设计理念的兼容与出色的空间分辨率。

本文将面向海洋水色卫星技术, 从载荷配置、通道选择、成像体制、在轨定标等技术现状进行阐述, 总结海洋水色遥感发展趋势以及各国对未来观测计划的布局, 明晰待突破的关键技术难点, 为海洋水色卫星的后续发展提供参考。

2 国内外主要水色遥感器发展历史

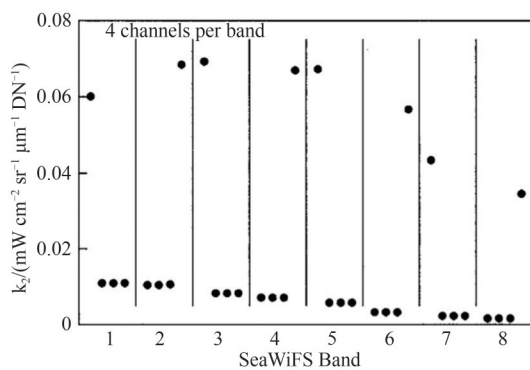
2.1 美国

在“全球地球系统正在发生怎样的变化?”——这一科学问题的指引下, 美国 Nimbus 7 卫星携带 9 个载荷于 1978 年发射, 主要感知和收集污染、海洋和气象科学数据。Nimbus 7 卫星位于太阳同步轨道, 降交点地方时 12:00, 其搭载的 CZCS 是一个 6 个通道的扫描辐射计, 作为一个试验载荷, 原设计寿命为 1 年, 实际服役 8 年。CZCS 6 个通道中前 4 个通道针对海洋水色观测进行优化, 采用光栅分光设计, 空间分辨率约 800 m, 刈幅 1556 km, 采用 45° 旋转平面镜 (360° 旋转扫描) 获取地面、校准源 (黑体、标准灯) 和冷空的扫描观测数据, 其对应天底扫描角为 $\pm 39.34^\circ$ 。为了避免海面太阳耀光反射影响, 扫描仪反射镜以 2° 步长, 在 $\pm 10^\circ$ 角度内做俯仰倾斜, 实现对地俯仰 $\pm 20^\circ$ 的观测 (Madrid, 1978)。CZCS 前 4 个波段都有 4 个独立增益, 这些增益能力可根据需要进行更改, 以匹配在完整轨道期间和整个季节观测中的太阳角度变化, 这样也能调整对应波段的辐射灵敏度 (Hovis 等, 1980)。通常情况下, 前 4 个通道所使用的增益由待观测目标的太阳高度角决定, 但在轨的大部分图像主要是两个较高增益 (增益 1 和 2) 下获取的。载荷的倾斜和增益设置信息与 CZCS 观测数据一起下传, 其包含在数据产品元数据记录中。原始数据在戈达德太空飞行中心进行处理与数据存档, 供全球科学家使用, CZCS 开创了全球开阔大洋 (也即“一类水体”) 叶绿素浓度分布观测研究的先河 (Gordon 等, 1980)。

在第一台水色遥感器 CZCS 数据断档 10 年后, 全球海洋叶绿素观测数据才得以接续。美国第二台水色遥感器 SeaWiFS 持续工作 13 年多 (1997 年 9 月 18 日到 2010 年 12 月 11 日), 远超 5 年的设计寿命。SeaWiFS 是 OrbView-2 (也叫 SeaStar, 为 ORBIMAGE 公司资产) 卫星的唯一载荷, 戈达德太空飞行中心海洋生物研究小组负责该卫星数据的收集、处理、校准、验证、存档和分发, SeaWiFS 任务也是一个行业与政府的合作范式。SeaWiFS 以 4 km 的空间分辨率收集全球数据, 以

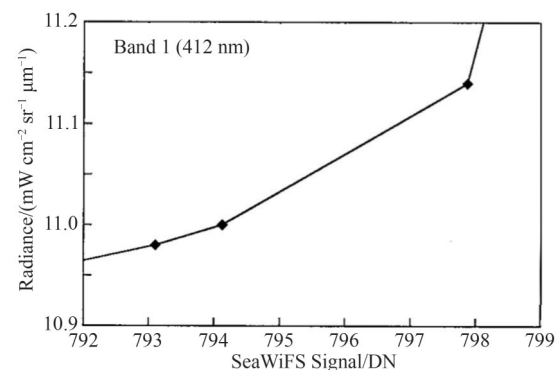
1 km 分辨率收集本地数据, 采用旋转望远扫描机构 (转速为每秒 6 圈), 对地观测视场为 $\pm 58.3^\circ$, 图像刈幅 2800 km, 具备星上太阳定标、月球定标能力 (Barnes 和 Zalewski, 2003)。卫星为太阳同步轨道, 降交点地方时 12 点。为减少海面太阳耀光影响, 与 CZCS 类似, 在赤道附近做 $\pm 20^\circ$ 的俯仰观测, 不同的是 SeaWiFS 为整个遥感器俯仰机动。SeaWiFS 有 8 个观测通道, 每个通道都有独立的 4 个探测器来完成对地观测, 4 个探测器按扫描方向排列。原计划所有探测器都设定为同一增益, 在载荷交付前为消除明亮目标杂散光的影响而进行了修改, 每个探测器都设定为不同增益, 保证

载荷信噪比的同时, 提升其辐射动态范围 (Barnes 等, 2000, 2001), 因此 SeaWiFS 对云层的观测信号几乎不饱和。SeaWiFS 专门设计用于海洋水色信息监测, 戈达德太空飞行中心领导建立了整套载荷定标 (包括太阳定标、系统替代定标) (Barnes 等, 2001; Eplee 等, 2001)、大气校正 (Wang, 2002)、水色参数反演 (Darecki 等, 2005; Harding 等, 2005)、现场数据观测规范、海洋光学浮标研制和运行等技术体系 (Clark 等, 2002; Mueller 等, 1992), 为全球水色卫星与海洋光学遥感奠定了坚实基础 (图 1)。



(a) SeaWiFS 各通道的定标系数 (每个通道有 4 个增益: 增益 1 对应高亮目标, 增益 2 对应水体, 增益 3 和增益 4 对应太阳和月球定标观测)

(a) Calibration coefficients for each band of SeaWiFS (Each band has 4 gains: Gain 1 corresponds to high-brightness targets, Gain 2 to water bodies, while Gains 3 and 4 are designated for solar and lunar calibration observations, respectively)



(b) 通道 1 的对地观测双增益示意图 (通过双增益获得了 DN 值 10 位量化比率下更大的辐亮度动态范围)

(b) A schematic representation of the dual-gain ground observation for band 1 (Which achieves an extended dynamic range of radiance under a 10-bit digital number (DN) quantization ratio through the dual-gain mechanism)

图 1 SeaWiFS 双增益示意图 (引自 Barnes 等, 2001)

Fig. 1 Schematic of SeaWiFS dual gain (Cited in Barnes et al., 2001)

通过多年的积累, NASA 开始布局对陆地表面、生物圈、大气和海洋长期全球观测的计划, 该计划名为地球观测系统 EOS (Earth Observing System), 通过一系列的人造卫星发射任务, 在地球轨道上布设科学仪器, 研究陆地、海洋和大气之间的能量、水分和碳的交换, 任务持续了 18 年 (Kaufman 等, 1998; King 和 Platnick, 2018)。1999 年和 2002 年分别发射了 Terra (EOS AM) 和 Aqua (EOS PM) 两颗科学研究卫星, 各携带 5 个载荷, 其中 MODIS 是关键载荷之一。MODIS 服务于众多研究对象, 载荷设计上比 CZCS 和 SeaWiFS 复杂得多, 它有不同的空间分辨率 (250 m、500 m、1000 m 不等), 在 0.4—14.4 μm 波长范围内拥有

36 个通道, 其中通道 8 到通道 16 是水色应用通道, 空间分辨率 1 km, 幅宽 2330 km, 1—2 天就可完成全球观测覆盖 (Xiong 等, 2015)。MODIS 在沿轨方向视场角对应地面扫描宽度为 10 km, 这些 1 km 分辨率的通道, 采用 10 元并扫的方式成像, 1.477 s 内完成对地、星载校准设备、冷空的扫描观测, 其中对地观测视场为 $\pm 55^\circ$; 还配备了星上定标设备, 包括太阳漫反射板、漫反射板稳定性监测器、光谱辐射校准组件和黑体 (Barnes 等, 1998)。MODIS 有空间分辨率 500 m 的短波红外通道, 分别为 1240 nm、1640 nm 和 2130 nm, 提升了对近岸水体的大气校正能力 (Wang 和 Shi, 2007; Wang 等, 2009), 然而由于 MODIS 以及所在的卫星平台不具

备俯仰机动能力, 实际上海面太阳耀光反射的影响要远大于SeaWiFS。

联合极地卫星系统 JPSS (Joint Polar Satellite System) 是美国目前最新一代极轨地球同步环境卫星系统, 由美国国家海洋和大气管理局 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 运营。该系统的第一颗卫星是国家极地轨道合作伙伴关系卫星 Suomi NPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership, 为纪念威斯康星大学已故气象学家 Verner E. Suomi), 携带 5 台载荷, 2011 年发射。可见—红外成像辐射计 VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) 是卫星上最大的载荷, 是 3 个用户机构设计优化后的遥感器, 用于取代当时还在运行的 3 个传感器 (国防气象卫星计划的业务型线扫描系统 OLS (Operational Linescan System)、国家海洋大气局的极轨轨道环境卫星的先进甚高分辨率辐射计 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 和 NASA 地球观测系统中 (Terra 和 Aqua) 的 MODIS), VIIRS 的主要任务之一是开展全球海洋环境数据观测, 为科学研究提供连续记录数据, 以便评估气候和环境变化 (Ardanuy 等, 2002; Wang 等, 2013b); 第二颗和第三颗卫星分别于 2017 年和 2022 年发射, 卫星代号为 JPSS-1/NOAA20 和 JPSS-2/NOAA21。VIIRS 在 0.412—12.01 μm 之间拥有 22 个波段, 其中 16 个中等分辨率波段 (M 通道, 空间分辨率 750 m) 和 5 个成像分辨率波段 (I 通道, 空间分辨率 375 m) 以及 1 个用于昼夜观测的全色波段 (空间分辨率 750 m), 其载荷设计充分吸纳了 MODIS 的成功经验。与 MODIS 不同的是, VIIRS 采用了与 SeaWiFS 类似的双增益波段进行对地观测, 这些双增益波段包括 M1—M5、M7 和 M13, 双增益波段设计在保证信噪比的同时获得更大的辐射动态范围 (Schueler 等, 2003)。VIIRS 与 MODIS 一样都是摆扫成像, 与 MODIS 只靠扫描镜旋转获取数据不同的是, VIIRS 采用旋转望远组件实现扫描成像。M 通道采用 16 元并扫成像, 每 1.779 s 扫描一圈 (包括地球、星载校准设备、冷空), 对地观测视场为 $\pm 56.28^\circ$, 对应地面刈幅 3000 km (Cao 等, 2014)。VIIRS 拥有两个数据处理流程, 生成两组不同产品, 其中一份由 NOAA 国家环境卫星数据和信息中心 NESDIS (National Environmental Satellite, Data, and Information Service) 制作和

分发; 另一份来自 NASA, 旨在为大范围科学研究做出贡献 (Hlaing 等, 2013; Wang 等, 2013b)。VIIRS 在 MODIS 还尚未失效的情况下, 就接力支持海洋水色观测 (Barnes 等, 2019; Hu 和 Le, 2014; Murphy 等, 2001)。

经过 20 多年的发展, 计划为科学界提供了连续海洋水色观测数据, 为超越已有卫星的任务能力, NASA 设定了浮游植物、气溶胶、云和海洋生态系统计划 PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, and ocean Ecosystem)。PACE 卫星于 2024 年 2 月 8 日发射, 数据由 NASA 戈达德太空飞行中心的海洋生物小组负责处理, 有效载荷含有两个多角度偏振计和一个海洋水色仪 OCI (Ocean Color Instrument)。PACE 的主要仪器 OCI, 是一种高光谱成像辐射计, 其波段覆盖紫外到短波红外, 星下点空间分辨率 1 km。利用两个狭缝光谱仪以 ~ 2.5 nm 的步长, 收集 340 nm 到 890 nm 的连续光谱; 还附带 7 个短波红外通道, 其中 6 个与 MODIS 和 VIIRS 类似, 部分短波红外通道为高低动态双重设置 (Gorman 等, 2019)。OCI 的旋转望远镜以 5.77 Hz 的旋转速率扫描, 在扫描线上每个通道仅有一个探测器, 能抑制图像条带的产生, 在天底处空间分辨率约 1 km, 成像幅宽 2663 km。采用近中午 13:00 地方时过境轨道, 在低纬度海域的海面太阳耀光反射影响强烈, 与 SeaWiFS 类似, OCI 在每个轨道的近太阳点执行一次整个仪器的俯仰操作来降低海面太阳耀光反射的干扰。OCI 的摆扫成像系统充分借鉴了 NASA 在水色遥感器的成功经验, 采用类似 SeaWiFS 的串扫方式, 大大减弱了类似 MODIS 和 VIIRS 遥感器的条带问题, 这种摆扫设计更便于星上定标组件的布设。采用了超高速的读出电路, OCI 使用渐进延时积分 PTDI (Progressive Time-Delay Integration) 来提高信噪比, 高光谱通道的 TDI 范围为 16 : 1, 短波红外波段的 TDI 范围为 2 : 1 到 8 : 1, OCI 的信噪比在紫外到近红外的高光谱波段为 400—1700 nm, 短波红外波段为 50—243 nm。辐射动态范围要求对云观测不饱和, 顾及研究海洋浮游植物荧光的辐射需要高信噪比 (Behrenfeld 等, 2009), 因此为提高 660—715 nm 波段的信噪比, 这些波段动态范围的高值降低至最大云辐射亮度的 40% (Meister 等, 2024; Werdell 等, 2019), 因此在 OCI 660—715 nm 波段牺牲了辐射动态范围。

2.2 欧洲

21世纪初,为增强欧洲从太空遥感地球的能力,环境卫星 Envisat (Environmental Satellite) 携带一整套仪器,于2002年发射升空,以协同方式从太空观测地球及大气层,解决全球变暖、气候变化、臭氧消耗以及海洋和冰监测等关键问题 (Louet 和 Bruzzi, 1999),卫星降交点地方时为10:00。欧洲航天局 (ESA) 在其极地观测计划中开发了一种多学科地球观测仪器——MERIS,重点开展生物海洋观察。MERIS采用不同空间分辨率(300 m和1200 m)覆盖大洋和沿海地区,旨在更好地了解海洋在气候系统中的作用 (Rast 等, 1999)。2012年,在轨服役10年 Envisat 卫星失效(原设计寿命5年),这颗卫星也是迄今世界上体积最大的民用对地观测卫星。MERIS使用5个相机组来合成视场(68.5°),对地推扫成像,刈幅1150 km,3天可实现全球覆盖,这些相机在390—1040 nm范围内有15个谱段,配有星上太阳定标机构 (Bourg 和 Delwart, 2006)。MERIS拥有出色的信噪比,通过光谱细分将观测波段分成多个微通道,在不同采样方式下获得4挡亮度差异来保证其动态范围的最适合目标场景;然而MERIS动态范围仍然无法满足复杂场景需求,最终将通道13(中心波长865 nm)的饱和阈值设置为最大亮度的70%(最大亮度为反射率108%),而不是设置为海洋应用的首选亮度范围(最大亮度的42%),并保证了其在全球植被指数监测上的准确性,这是不同需求的妥协结果 (Curran 和 Steele, 2005)。

作为欧洲航天局哥白尼计划的一部分,哨兵系列卫星 (Sentinel-X) 延续了ENVISAT的观测任务,其中Sentinel-3卫星支持 GMES 海洋和全球陆地监测服务,主要目标是准确测量海面地形、陆地和海面温度、陆地和海洋表面光谱,以支持海洋预报、环境和气候监测 (Donlon 等, 2012b)。Sentinel-2为陆地服务(例如植被、土壤和水覆盖、内陆水道和沿海地区)提供高分辨率光学成像 (Spoto 等, 2012)。Sentinel-3任务计划发射4颗卫星,每颗卫星的设计寿命为7.5年, Sentinel-3A 卫星和 Sentinel-3B 卫星分别于2016年和2018年发射, Sentinel-3C 和 Sentinel-3D 卫星正在准备接替 Sentinel-3A 和 Sentinel-3B 卫星,提供20年的连续观测,计划支持到大约2035年。Sentinel-3任务

携带的主要仪器之一是海陆彩色成像仪 (OLCI),是一种高精度可见近红外推扫式成像光谱仪,旨在保证 MERIS 对地观测数据的连续性,同样过境地方时为上午10:00。OLCI相对于MERIS进行了改进设计,包括空间分辨率为300 m、更多光谱通道,每日重访时间(使用星座中的两颗卫星)和改进的信噪比 (Donlon 等, 2012a)。为了简化 OLCI 的操作,为数据处理和分析提供最大的灵活性,OLCI始终以全分辨率模式运行。OLCI采用向西倾斜 12.6° 的安装方式,尽可能的回避了太阳耀光的影响,实现1440 km幅宽范围扫描成像。OLCI单个载荷4 d覆盖全球大洋,两颗卫星(目前是 Sentinel-3A 和 Sentinel-3B)同时在轨并以 140° 相角运行,实现每2 d全球覆盖。

每颗 Sentinel-2 卫星都只携带一台多光谱仪器 MSI (Multi-Spectral Instrument),在可见光/近红外和短波红外光谱范围内具有13个光谱通道,空间分辨率从10 m到60 m不等,单颗卫星幅宽290 km,卫星设计寿命7.5年(图2)。Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 分别于2015年和2017年入轨,两者呈 180° 相角飞行,双星可实现5 d重访。2024年9月 Sentinel-2C 发射,将取代 Sentinel-2A 的观测任务,后续将由 Sentinel-2D 取代 Sentinel-2B 任务,支持观测任务预计到2035年。MSI提供高空间分辨率观测数据,同时具有相对较窄的波段带宽,因此积分时间被动变长;另外各通道不同的空间分辨率需求使得探测器的排列方式也有不同,这样造成了各通道在成像时的观测时差,在其海面彩色合成影像中会出现彩色斑点,耀光校正难以开展 (Hu, 2021);这些特征也为海洋波浪与白帽高空间分辨率光学遥感提供了重要数据源,实现了海面浪向和风速的光学监测突破 (Zhao 等, 2022; Yin 和 Lu, 2025)。

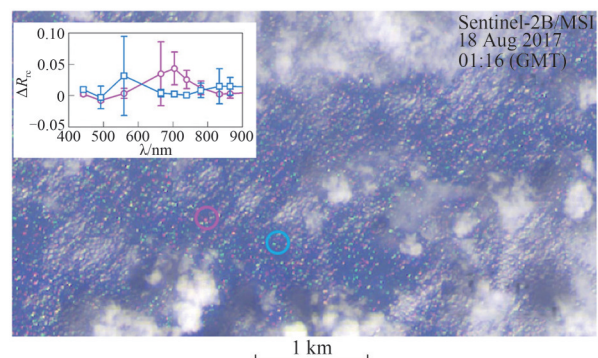


图2 日本附近的 MSI FRGB 图像 (引自 Hu, 2021)

Fig. 2 MSI FRGB image near Japan (Cited in Hu, 2021)

2.3 日本

1996年日本发射了先进对地观测卫星 ADEOS (Advanced earth observation satellite), 卫星在1997年由于太阳能板供电故障停止运行, 在轨9个月 (Shimoda, 1999)。卫星携带了由日本宇宙开发事业团 NASDA (National Space Development Agency of Japan)、NASA 和法国国家空间研究中心 CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) 开发的8台仪器, 其中有 NASDA 开发的海洋颜色和温度扫描仪 OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner)。OCTS 是一款多光谱辐射计, 获取全球海洋水色、海面温度、浮游植物分布和海洋初级生产力、沉积物和悬浮物质的观测数据, 采用摆扫成像, 地面分辨率 1 km, 幅宽 1400 km, 在 402—12500 nm 有 12 个通道, 其中可见近红外通道 8 个, 载荷通过俯仰 $\pm 40^\circ$ 回避海面耀光反射的影响 (Kawamura 和 The OCTS Team, 1998)。OCTS 比 SeaWiFS 提前入轨, 因此将 CZCS 和 SeaWiFS 之间的数据断档缩短了 6 个月。为了解地球大气系统的发射特性, ADEOS 卫星上还配置了偏振和方向性的地球反射率仪器 POLDER (POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances) 可以获取 12 个方向上地球目标的反射率以及偏振信息。

为了延续 ADEOS 的任务, 在 NASA 和 CNES 的帮助下, 日本在 2002 年 12 月发射了 ADEOS-II 卫星, 不幸的是, 该卫星还是由于太阳能电池板的问题, 于 2003 年 10 月结束任务。卫星配备 5 台载荷, 全球成像仪 (GLI) 就是其中之一, GLI 是一款摆扫成像仪, 具有 36 个通道, 覆盖 380 nm 至 12 μm 的光谱范围。6 个空间分辨率为 250 m 的通道 (其余通道 1 km 的混合分辨率), 回避海面太阳耀光反射影响的俯仰机构是 GLI 的独特设计 (Hashimoto, 2000)。NASDA 对获得的辐射图像进行分析, 生成 2 级地球物理产品 (Nakajima 等, 2004)。此后, 日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA, 前身为 NASDA) 制定了全球变化观测任务 GCOM (Global Change Observation Mission) 计划, 用于监测 10—15 年全球环境变化, 2012 年开启实施。第二代全球成像仪 SGLI (对全球、海洋、陆地、云和冰圈进行高频次观测的光学辐射计) 安装在 GCOM 气候任务 (GCOM-C) 卫星上的观测仪器, 计划利用 3 颗卫星开展持续 13 年的观测 (首颗星

2017 年发射)。SGLI 是一套由两个辐射计组成的套件 VNIR (Visible Near Infrared 和 IRS, Infrared Scanner); VNIR 采用线阵 CCD 探测器推扫成像, 成像宽幅 1150 km, 空间分辨率 250 m, 光谱范围 380—865 nm。IRS 采用摆扫成像, 幅宽 1400 km, 空间分辨率 1 km, 光谱范围 1.0—12.5 μm (Masaru 等, 2007)。SGLI 在 380—1630 nm 光谱范围内的波段设置适用于沿海水域, 空间分辨率 250 m, 它还具有 673.5 nm 和 868.5 nm 的两个偏振通道 (Matsuoka 等, 2022)。

2.4 中国

中国的海洋卫星技术萌芽于 20 世纪 80 年代, 兴起于 90 年代, 成长于 21 世纪初期 (刘建强, 1997; 刘建强 等, 2021)。1990 年发射的风云 1B 卫星上的高分辨率扫描辐射计配置了 2 个通道 (480—530 nm 和 530—580 nm), 潘德炉等人评估了该通道可以监测海洋悬浮物和叶绿素 (潘德炉和 Doerffer, 1996)。2000 年发布的《中国的航天》白皮书中, 明确了海洋卫星系列是中国长期稳定的卫星对地观测体系的重要组成部分。2002 年发射的神舟三号飞船上搭载了中国的中等分辨率成像光谱仪 CMODIS (Chinese Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), 通过多用户体制验证了水色通道的可行性 (Pan 等, 2006)。同年, 中国第一颗海洋水色卫星 (海洋 1 号卫星) 成功发射, 卫星搭载 2 个载荷, 分别为中国水色水温扫描仪 COCTS (Chinese Ocean Colour and Temperature Scanner, 名称借鉴了 OCTS) 和 4 波段 CCD 相机, 后更名为海岸带成像仪 CZI (Coastal Zone Imager)。COCTS 配置 10 个通道, 在可见近红外通道与 SeaWiFS 类似, 配置 8 个通道, 热红外谱段配置 2 个通道。COCTS 利用 45° 扫描镜采用 4 元并扫模式摆扫成像, 分辨率约 1 km, 幅宽 1400 km, 量化位数为 10 位, 卫星降交点地方时上午 10:30。海洋 1 号卫星开启了中国水色卫星遥感的新纪元 (蒋兴伟 等, 2005, 2016; 林明森 等, 2024; 潘德炉 等, 2004; Pan 等, 2004)。卫星设计寿命 2 年, 在轨运行一个月后扫描成像消旋镜停转, 经过在轨校正后观测数据继续得到利用 (曾韬 等, 2008), 2004 年 3 月因太阳能翻板机构故障停止运行, 共在轨运行 1 年 11 个月。2007 年 4 月 11 日发射 HY-1B 卫星, 延续 HY-1A 卫星的轨道设计。该

卫星针对A星设计中的不足,对卫星技术指标进行了优化,寿命提高到3年,COCTS幅宽提升到2900 km,具备全球1 d覆盖观测能力,卫星于2016年1月失效。HY-1B卫星COCTS在冷空观测区受大气散射信号干扰,对地观测辐射数据受到污染,造成仪器定标失真,以及寿命末期轨道偏离严重,光照不足等原因,数据质量受到影响。经过历史数据再定标工作,完成了数据重处理,部分观测数据得以修复(范文龙等,2022;Liu等,2018,2022;Li等,2023b)。受器件能力、星上存储及地面接收站网传输速率等影响,HY-1A/B卫星的主要观测范围集中在中国周边海域、西北太平洋以及北印度洋海域。

2012年中国《陆海观测卫星业务发展规划(2011—2020年)》正式批复,明确了发射海洋水色观测业务卫星。2018年和2020年分别发射了HY-1C和HY-1D卫星,卫星过境地方时分别为10:30和13:30,设计寿命5年。HY-1C/D卫星的COCTS通道维持与HY-1B卫星的不变,但提升信噪比,采用12位量化,首次实现全球连续海洋水色水温业务化观测,并通过上下午双星组网,降低云覆盖和太阳耀斑对观测数据的影响。HY-1C/D卫星增加了一个双通道(光谱范围为345—365 nm和375—395 nm)的紫外成像仪UVI(Ultra Violet Image),采用推扫成像,幅宽3000 km,空间分辨率在对地观测时与COCTS保持一致,在海上溢油、大型漂浮藻监测上发挥效益(Li等,2023a;Suo等,2021,2023)。HY-1C/D卫星新增了一台星上定标光谱仪SCS(Satellite Calibration Spectrum),具备400—900 nm光谱范围内5 nm间隔的高光谱对太阳观测定标能力,并通过同平台交叉传递方式为COCTS等载荷进行定标,SCS是中国首次在海洋水色卫星上配备星上定标组件(许和鱼等,2020;Song等,2022;Xu等,2020,2022,2023)。HY-1C/D卫星CZI载荷的空间分辨率从250 m提高到50 m,观测幅宽增加到1000 km,保持可见近红外4个通道,在近海生态灾害监测发挥重要作用(梁超等,2020;刘锦超等,2022;齐琳等,2023;周屈等,2020)。HY-1C/D卫星的水色水温产品以及应用产品,基本与国际同类型载荷产品质量相当(史鑫皓等,2023;Chen等,2021c;Liu等,2021;Song等,2019;Ye等,2021,2022),彰显了中国卫星在全球水色

资料持续性贡献的能力(梁超等,2020;刘建强等,2023;齐琳等,2023),代表中国的海洋水色卫星进入业务化全球观测行列。

2023年11月,中国发射了新一代海洋水色观测卫星,配备了3个光学主载荷,第二代水色水温扫描仪COCTS2(The 2nd generation Chinese Ocean Color and Temperature Scanner)、中分辨率可编程成像光谱仪PMRIS(Programable Medium Resolution Imaging spectrometer)和第二代海岸带成像仪CZI2(The 2nd generation Coastal Zone Imager)。COCTS2采用与VIIRS类似的旋转望远系统以及80元并扫描成像体制,在紫外、可见、近红外、热红外谱段共设置18个通道,其中紫外到近红外通道13个,短波红外2个,分辨率500 m,成像幅宽3000 km,信噪比在可见光通道提升至1000以上,配备全口径、全光路太阳定标、黑体定标组件。PMRIS继承天宫2号多角度宽谱段成像仪设计经验(He等,2017;Tang等,2019),采用5个相机模块拼接950 km幅宽推扫成像,探测器采用面阵高速帧转移CMOS,光栅分光后按像元抽样合并光谱通道,具备自适应调整增益能力;紫外—近红外配置15个通道,通过自动增益调整,实现大动态范围和高信噪比的统筹兼顾,短波红外配置4个独立通道,还具有在374—650 nm范围内5 nm光谱分辨率,650—917 nm范围内10 nm光谱分辨率,共90个通道的高光谱输出能力;多光谱模式下空间分辨率100 m,高光谱模式下空间分辨率200 m。CZI2在可见—近红外配置8个通道,空间分辨率20 m,同时配置一个空间分辨率5 m的全色通道,通过摆镜转动可以择机在跨轨左右500 km内推扫成像。通过载荷的技术指标升级,新一代海洋水色卫星成功完成体制升级,技术指标达到目前水色遥感器先进水平。

2.5 其他

继承欧洲和美国地球静止轨道卫星的经验,韩国于2010年发射了通信、海洋和气象卫星COMS(Communication, Ocean and Meteorological Satellite)。卫星携带的水色观测载荷为静止轨道水色成像仪GOCI(Geostationary Ocean Color Imager),是世界上第一个地球静止轨道卫星图像传感器,用于监测朝鲜半岛周围的海洋水色。GOCI的空间分辨率约为500 m,目标区域范围以朝鲜半岛为

中心约 2500 km×2500 km，单次成像面积 500 km×500 km，分 25 次成像拼接目标区域，每天在当地时间 9:00 到 16:00 观测 8 次，在可见近红外光谱范围内配置 8 个通道 (Wang 等, 2013a)。卫星由韩国海洋科学技术研究院的韩国海洋卫星中心运营，服役到 2021 年。2020 年，韩国发射了静止轨道韩国多用途卫星 GEO-KOMPSAT-2B (Geostationary Korean Multi-Purpose SATellite 2B)，第二代 GOCI 进入服役期，预计提供 10 年的区域海洋水色观测资料。GOCI-II 增加了 4 个通道，分别为 380 nm、510 nm、620 nm、709 nm，增加了近岸水体观测能力，空间分辨率为 250 m，全圆盘观测时空间分辨率为 1 km，空间分辨率的提升扩展了其在复杂水体的应用 (Guo 等, 2023; Park 等, 2020)。GOCI 采用面阵成像，高增益用于海洋成像，低增益用于云等目标成像，高增益若未饱和则保留，反之则采用低增益数据。

印度空间研究组织在 20 世纪 90 年代也开始资源卫星的发展，1999 年发射 Oceansat-1 卫星，携带了推扫成像的水色监视仪 OCM (Ocean Colour Monitor)，其通道设置与 SeaWiFS 几乎相同，一样是 8 个通道，其空间分辨率为 360 m×236 m，幅宽 1400 km，并且提供每隔一天的重访周期 (Dash 等, 2012)，OCM 服役 11 年。2009 年 Oceansat-2 发射，2023 年 5 月失效，2022 年 Oceansat-3 发射，Oceansat-3 的 OCM 通道增加到 13 个，更加适合复杂的近岸水体 (Babu 等, 2013; Sarkar 和 Patel, 2021)。卫星过赤道地方时正午 12 点，具有±20°俯仰能力来规避海面耀光反射影响，印度国家海洋研究所负责卫星数据处理和运行。

图 3 对以上提及的主要水色遥感器的服役时间进行了梳理和标注，目前在轨的主要水色传感器 13 个，3 颗为中国的水色卫星。

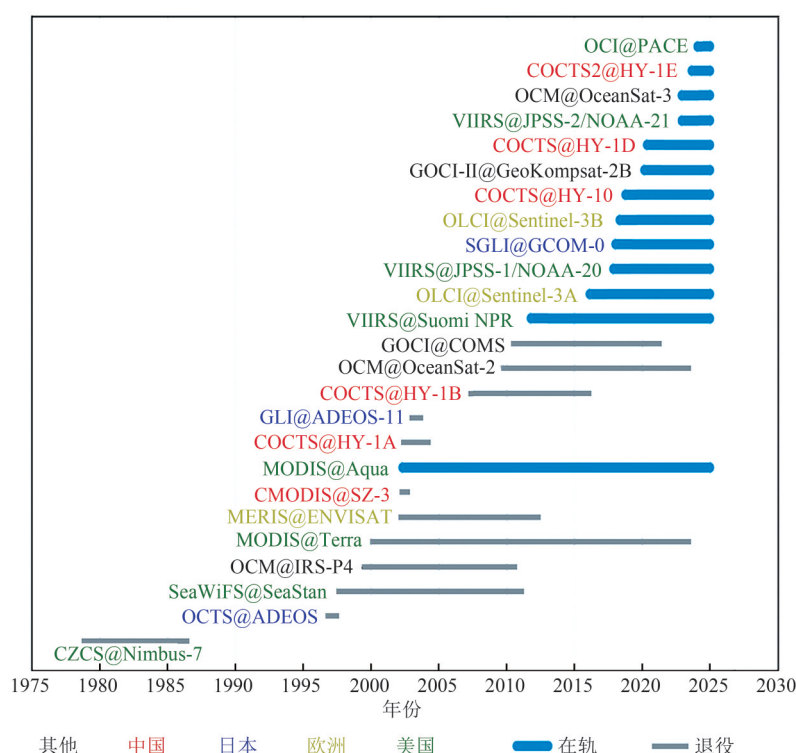


图 3 主要水色传感器观测计划服役时间

Fig. 3 Planned commissioning times for major ocean color sensors

3 国内外水色卫星技术现状分析

3.1 通道选择

图 4 给出了常见水色遥感器的通道配置，为了便于讨论，只保留了 300—1000 nm 范围内的通道

(1.0 μm —2.5 μm 的短波红外通道通常用于大气校正，不用于水色参数反演)，图 4 中也给出了大气透过率和常见地表反射率以及水体反射光谱，由于水体的遥感反射率 (R_{rs}) 较小，实测水体遥感反射率转换为反射率后又放大了 5 倍 ($R_w =$

$5 \cdot \pi \cdot R_{rs}$)。水色卫星经过 40 多年的演变, 一个最突出的特点就是波段带宽比较窄 (通常 20 nm 左右), 这是因为水体色素吸收系数光谱响应比较窄。在 CZCS 之前, 遥感器的通道设置都是以陆地为目标的, 典型设置参考 Landsat 卫星的业务陆地成像仪 OLI (Operational Land Imager)。CZCS 虽然只有 4 个通道, 但蓝绿波段比值可以很好的表征浮游植物色素浓度, 能区分大洋水体和近岸水体 (Gordon 等, 1983), 从此奠定了水色反演的基本算法 (称之为 OC3 算法, 又称为开阔大洋的蓝绿光比值法)。此后, SeaWiFS 在可见近红外设置的 8 个通道成为水色遥感的经典通道, 其中 765 nm 和 865 nm 是大气校正通道, 从图 4 中可以看出, 清澈水体情况下, 这两个通道的离水辐射近似为 0。490 nm 波段的引入可以更好的区分水体类型, 形成 OC4 算法, 后来在胡传民等人的努力下, 又改

进为 OCI 算法 (Hu 等, 2012b); 412 nm 波段的扩展, 可以更好的反演黄色物质浓度 (Tassan, 1994)。可以看出 MODIS、VIIRS、GOCI、OLCI 以及中国的 COCTS、COCTS2 和 PMRIS 都有相似的配置, 仅做了微调, 如 765 nm 通道由于跨越了氧气吸收带, 在大气校正过程中需要进行数值补偿 (Wang, 1999), 在 MODIS 载荷中做了微调, 其后的载荷都做了避让。COCTS 由于器件性能和技术上的限制, 直到 2020 年发射的 HY-1D 卫星和 2023 年发射的新一代海洋水色观测卫星才将带宽控制到 15 nm, 中心波长移到 744 nm, 回避了氧气和水汽吸收的干扰。这种对水色通道设计的继承, 一个最大的好处就是多个遥感器的算法可以相互替换, 大大节省了后续算法开发成本, 方便了多个遥感器之间产品一致性评价和可持续性应用。

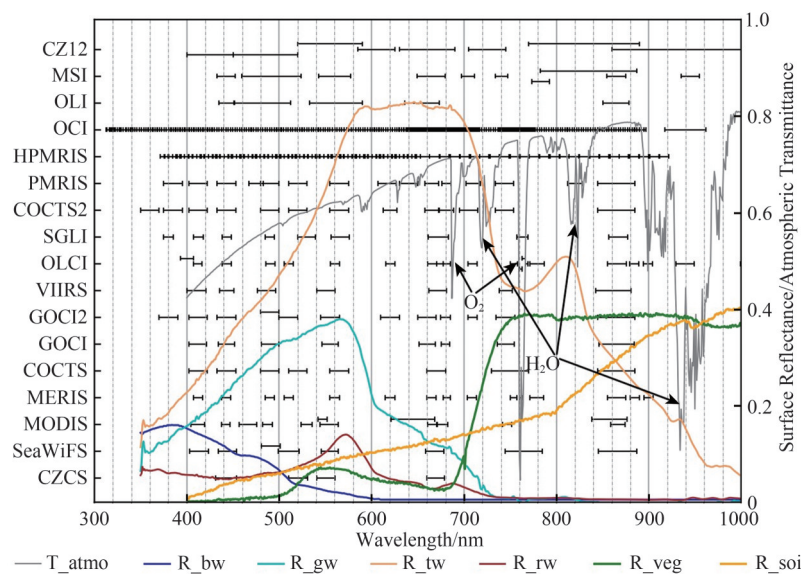


图4 主要水色遥感器通道配置

Fig. 4 Major ocean color sensor band settings

为了更好用于近岸水体 CDOM 的反演与吸收性气溶胶研究, 通道向紫外拓展, GOCI-II、SGLI、COCTS2 和 PMRIS 以及 OCI 都做了类似设计。为满足浑浊水体总悬浮监测需求, 部分遥感器 (如 MERIS、GOCI-II、COCTS2、PMRIS) 又增加了 620 nm 通道。另外值得一提的是, 在 650—750 nm 之间, 很多遥感器也增加了荧光算法通道 (一般为 650 nm 和 710 nm), 用于近海叶绿素浓度反演, 也可以用来做赤潮监测。由于荧光峰比较窄, 且该光谱范围易受氧气和水汽吸收影响, 通常都是设计为窄带通道, 另外由于荧光信号比较

弱, 信噪比要求高。即使如此, 荧光通道反演的叶绿素浓度目前难以成为水色遥感的主流产品, 这是因为浮游植物的荧光特性非常容易受环境影响, 导致荧光信号极易被干扰; 当然这些通道的设置也方便空间分辨率较高的载荷评价植被指数 (Clevers 等, 2002)。也有载荷在 740—760 nm 处配置多个窄带通道 (如 OLCI), 这是因为要精确量化氧气吸收的影响, 提高云顶压力 (高度) 和水汽反演的准确性 (Jänicke 等, 2023)。对特别浑浊的水体, 由于受水体吸收影响 (大气也有明显的水汽吸收), 其遥感反射率 (R_{rs}) 产品可以考虑使用

类似荧光算法来反演悬浮物浓度（宋庆君等，2008），因此在PMRIS增加了820 nm通道。浑浊水体近红外通道的反射率不为0，如VIIRS、SGLI、COCTS2、OCI等传感器都配置了相应的短波红外通道，用来解决近岸或者内陆水体的大气校正。图4中还给出了OCI和HPMRIS（PMRIS的高光谱模式）在紫外—近红外光谱的高光谱通道范围，随着技术的进步，高光谱会成为水色遥感器的一个技术发展趋势。

开展内陆水体观测的载荷，大部分通道都比较宽（如OLI、MSI、CZI2），并且通道的探测范围基本是连续的，通过对比反射率曲线，其可以用来评估浑浊水体以及近岸水体组分（主要为叶绿素和总悬浮物）浓度，这些载荷要兼顾陆地和水体的综合应用，因此其通道设置更适合植被和裸土监测。值得一提的是，MSI是这些载荷中为数不多的窄通道配置，尤其在红边（650—750 nm）设置了3个通道，兼顾了水体组分和陆地植被探测需求（Bie等，2020；Bramich等，2021），在后续的Landsat计划中，OLI也会效仿更改为窄带通道（Wulder等，2022）。

以上发展历程可知，不同传感器的通道数和通道宽度都在逐渐变化，高光谱是重要的发展趋势。在图5中可以看出，随着算法的升级以及探测参数的需求，水色应用通道也在增加，从早期CZCS的3个通道、SeaWiFS的6个通道增加到目前10个左右，大气校正通道从最早的1个通道增加到6个左右，这些增加的大气校正通道改进了气溶胶校正精度（如MODIS、VIIRS的1.2 μm 和1.6 μm ）；也有通道是为了评估吸收气体准备的（如SGLI的763 nm，OLCI的762 nm、765 nm、768 nm、939 nm等）。

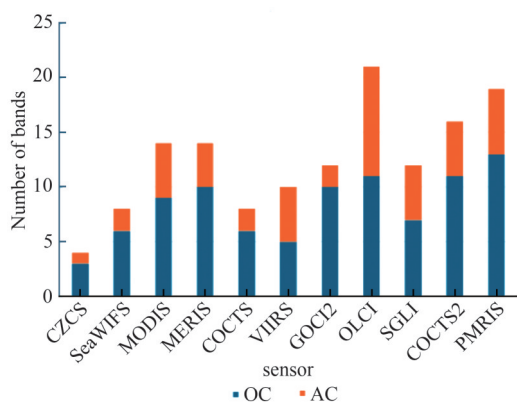


图5 主要水色遥感器通道分布

Fig. 5 Distribution of major ocean color sensor bands

3.2 成像体制

过去近50年的主流水色遥感发展来看，成像体制大致分为摆扫（跨轨扫描，Whiskbroom）成像和推扫（沿轨扫描，Pushbroom）成像两种方式。摆扫方式发展要早于推扫方式，这很大程度上是受制于光学探测器的规模；推扫方式在跨轨方向上有一定的幅宽要求，因此需要足够规模的探测器阵列，这些探测器阵列到本世纪初才被广泛使用。对于摆扫成像体制，仪器由于连续扫描，可以容易实现对地、对星上定标源的观测，同时也容易实现大幅宽观测，但是由于扫描周期内只有约1/3的时间用于对地观测，因此探测器积分时间比较短，探测器的信噪比会受到影响。目前通过旋转反射镜实现扫描成像的遥感器有CZCS、MODIS、OCTS、GLI、COCTS，通过旋转望远系统实现扫描成像的遥感器有SeaWiFS、VIIRS、OCI、COCTS2，前者容易受到卫星本体杂光影响，后者能有效控制杂光；此外，后者光学组件都在旋转，探测器辐射响应对扫描角度的依赖性强。由于卫星在沿轨方向的飞行速度较快，为了获得合适的地面分辨率，需要提高扫描角速度，高速的转动惯量对卫星平台稳定性的影响不容忽略；同时如果要求探测器的积分时间比较长（大于对应地面分辨率/扫描线速度），就不得不降低旋转速度；在较低角速度情况下，只能在沿轨方向增加更多的探测器来保证载荷在天底方向不出现漏扫。这些增加的探测器采用肩并肩的方式一同向扫描方向推进，即多元并扫方式，并扫方式可增加仪器在沿轨方向的视场角。多元并扫方式为探测器争取了积分时间，可以提高探测器的灵敏度，但是多个探测器辐射不一致，会带来图像跨轨方向的条纹噪声，同时也会导致沿轨方向的扫描带重叠现象。多元并扫的遥感器有，MODIS的1 km通道是10元并扫、VIIRS M通道是16元并扫，COCTS是4元并扫，COCTS 2是80元并扫。反之，对于非多元并扫遥感器，如SeaWiFS和OCI具备非常高的扫描角速度，是独元扫描，因此其图像上不存在跨轨方向的条纹噪声。

多元并扫由于在沿轨方向的大视场角，成像还会受到地球曲率的影响，造成图像天底到扫描边缘方向的几何畸变，因其类似蝴蝶翅膀形状，因此也叫蝶形畸变，造成每个扫描带会出现重叠。

图6以VIIRS的M通道为例,沿轨16个像元的扫描宽度从天底点的11.7 km扩大至扫描末端的25.8 km, VIIRS在每个扫描带,从扫描角 31.72° 到 44.86° ,从只保留16元探测器中的14元,而大于 44.86° 后只保留了12元的数据(即像元对应的空

间分辨率增大),为节省下行链路带宽,剔除的像元数据不再下载到地面,并由地面软件赋予填充值,这样就造成了原始影像边缘数据缺失造成的鬼影,但是在做地理投影以后这些鬼影就消除了。

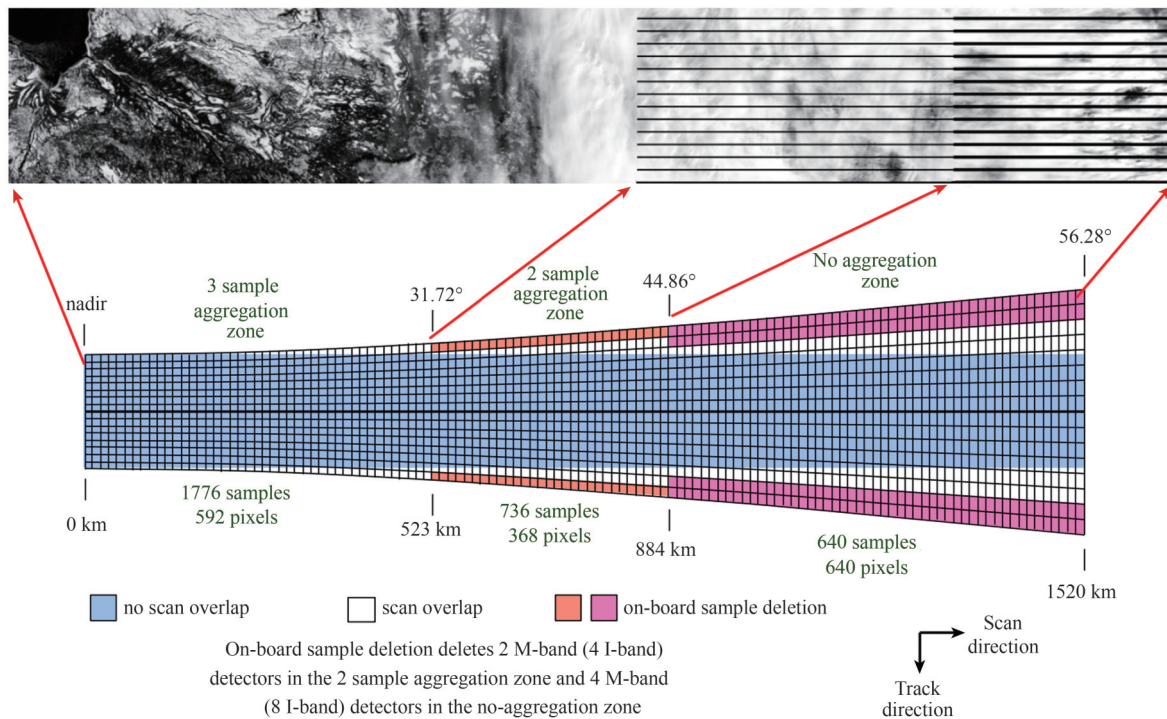


图6 VIIRS图像分辨率融合示意图(摘自Cao等,2013)

Fig. 6 Schematic diagram of VIIRS image resolution fusion (From Cao et al., 2013)

由于在扫描方向的时间采样间隔是一样的,也会造成从天底到扫描边缘分辨率的不同,同样在沿轨方向也存在空间分辨率不一致问题,VIIRS采用3种聚合方式保证了其空间分辨率, 44.86° 以后,保留原有采样数据; 31.72° — 44.86° 之间,736个采样单元融合为368个,天底到 31.72° ,采用1776个融合为592个,这样确保了整个扫描带每行3200个像素图像,分辨率都接近750 m。中国的COCTS采用4元并扫方式,相比较而言,扫描条带重叠的影响不是很大,但是COCTS2的80元并扫,这种蝶形畸变就比VIIRS更严重,另外这两个载荷的扫描方向的空间分辨率都是按天底方向制定的扫描时间间隔,因此扫描边缘的所对应的空间分辨率远大于天底方向的空间分辨率。

推扫体制成像采用沿垂直飞行方向排列的探测器阵列,省去了扫描机构。卫星飞行过程中可以不间断成像,探测器的采样时间显著延长,有

利于提高仪器的信噪比;但是由于探测器阵列的规模比较大,会存在因探测器灵敏度不同造成的沿轨道方向条带噪声,为每个探测器的定标带来困难。推扫设计的另一个局限性在于,为兼顾空间分辨率和地面覆盖宽度,采用多个光学子系统或者探测器拼接。例如MERIS、OLCI、PMRIS使用了5个光学子系统实现幅宽要求,而SGLI采用3个光学子系统,子系统相机的相互定标较为困难。即使多个光学子系统做了拼接处理,推扫成像的幅宽也会远小于摆扫体制的幅宽;此外,较多的子系统拼接会带来其他的弊端,如边缘分辨率的劣化,很难实现小目标(如月球)的逐个探测器定标等。图7给出了OLCI5个模块的拼接示意图,可以看出5个相机模块的过境地方时都不一样,与MERIS不同,OLCI做了向西倾斜 12.2° 的安装方式,这样有效回避了太阳耀光的影响,增加了有效的数据覆盖。

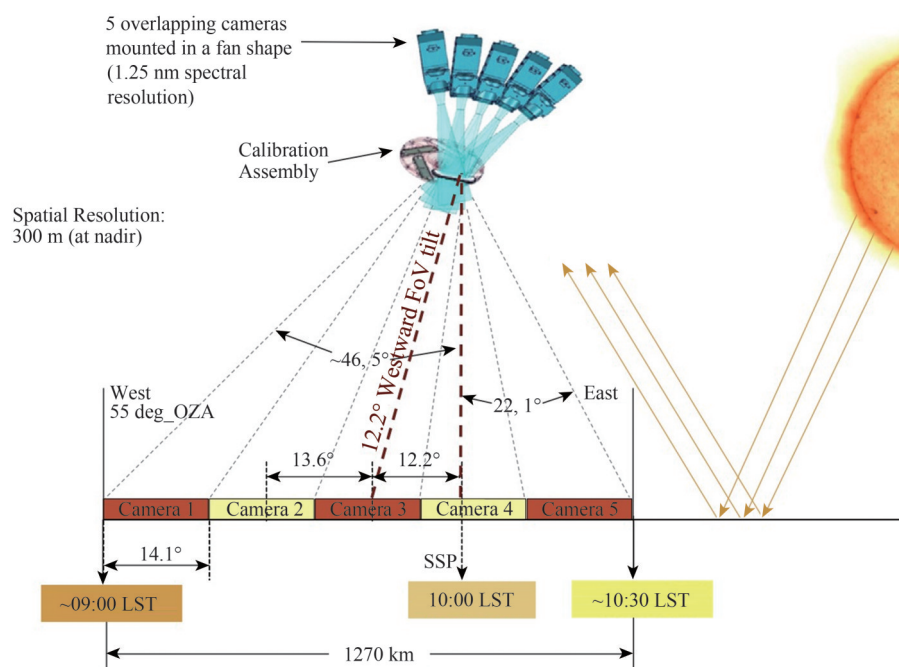


图7 多相机拼接示意图 (图片摘自 Donlon 等, 2012a)

Fig. 7 Schematic of multi-camera stitching (From Donlon et al., 2012a)

3.3 在轨定标

水色卫星是用于全球海洋叶绿素、初级生产力、全球环境变化等的长期监测评估研究, 对于仪器定标和长期稳定性运行的要求很高, 通常需要配备星上定标机构来获取遥感器的辐射响应衰减情况。星上定标机构与传感器成像机理和结构都有关系, 具有一定的技术成本和研发代价, 不是所有的传感器都配备了星上定标机构。历史上已经使用过的在轨星上定标机构, 依据探测器的观测目标主要分如下几种: 定标灯、太阳漫反射板、月球、地球目标。

3.3.1 星上灯源

星上灯源难以提供持久的标准亮度基准, 原来的标准卤素灯渐渐被目前高稳定性LED灯所取代, 即便如此, 星上灯源随时间变化的亮度波动可能会大于水色辐射测量任务对稳定性的要求, 现在多应用在星上定标的一些子任务里, 如光谱校准、线性度、多探测器响应一致性、短期监测等, CZCS、OCM、OCTS、GLI、SGLI以及COCTS都配备过星上标准灯。CZCS的星上定标就主要以灯源为定标源, CZCS携带了2个定标灯, 在轨时一个为常规使用, 另外一个偶尔进行测试以保证灯源的稳定性。Urabe等(2020)对SGLI在轨初期的性能进行了评估, 比较了LED定标、太阳漫反

射板定标和月球定标的仪器一年的变化趋势, 初期太阳定标和LED定标有着一致的变化趋势, 但发射100天后LED和太阳定标的结果出现微弱偏离, 表明LED的亮度已经在衰减。中国的HY-1C/D卫星的COCTS和UVI、HY-3A卫星上的PMRIS也搭载了LED灯源, 主要是做光谱校准和多探测器响应一致性评价, 由于作为试验探索使用, 目前还没有公开报告。

3.3.2 太阳定标

太阳定标是指卫星在轨飞行期间入瞳处引入太阳光, 并根据实际的观测条件将探测器溯源到平均日地距离处太阳辐照度光谱的过程。由于水色遥感对每个探测器像元都有比较高的定标预期, 因此星上太阳定标过程希望光线能覆盖所有探测器像元, 也希望光线与传感器对地观测光学路径相同, 因此要求星上定标机构能够实现全口径和全光路太阳定标, 这也为遥感器的结构工程设计带来挑战。一个完整的星上太阳定标系统包括一个太阳漫反射板或太阳漫透射板, 以及一个太阳漫反射板监视装置。

太阳漫反射板是最常见的星上太阳定标装备, 通常选用太空级Spectralon材料(如MODIS、OLCI), 少数也有用铝板材料(如SeaWiFS)。漫透射板主要用于太阳与对地观测在同一个方向的

载荷使用, 如 GOCI 就用了漫透射板, 材质为熔融石英 (Faure 等, 2017)。太阳漫反射板定标的主要挑战是如何确定其在轨反射率的变化。有两种方法可以克服这一问题, 第一种是使用两块漫反射板, 一块用于太阳定标, 另外一块曝光很少的参考板来做漫反射板衰减情况监视 (如 MERIS、OLCI、SCS、COCTS2); 第二种利用比辐射计方式来监视漫反射板衰减情况 (如 MODIS、VIIRS、PMRIS)。两种方法各有优缺点, 前者可以监视所有谱段的反射率衰减情况, 并且观测几何几乎一致, 缺点是结构复杂; 后者结构较简单, 但是需要引入一个新的电子探测器, 且只能监视几个波段, 若受信号饱和困扰还要引入一个单独的太阳光衰减机构。Xiong 等 (2009) 比较了 MODIS 和 SeaWiFS 太阳反射板的衰减情况, 经过 7 年多的在轨运行, Aqua MODIS 在 $0.41\ \mu\text{m}$ 波长处的太阳定标器 (SD) 退化约为 16%; 由于漫反射板舱门无法关闭, 导致更多暴露于太阳光下, Terra MODIS 的 SD 退化速度显著加快, 9 年多的时间, 在 $0.41\ \mu\text{m}$ 波长处的累积退化约为 44%; SeaWiFS 在整个任务期间 (13 年), 漫反射板 $0.412\ \mu\text{m}$ 反射率最大降幅约为 9%。对于漫反射板都有必要采取一定的保护措施, 如 VIIRS 等安装有衰减屏, OLCI、MERIS、PMRIS 配有保护舱, 标准板平时都是在保护舱内绝光放置。HY-1C/D 卫星上的定标光谱仪采用 4 板轮换的方式放置, 平时只有黑板 (暗电流板) 接受光照, 只有在做太阳定标时漫反射板轮换到位接受光照。

漫反射板的保护措施还有减少被太阳光照射次数和强度。因为海洋的辐亮度通常比较低, 因此保证同等辐射动态下定标, 首先通过衰减屏减少太阳光照射到漫反射板上的光强, 这些衰减屏的透过率为 10%—30% 不等, 通常是一些阳极氧化铝板上打孔实现的 (如 MODIS、VIIRS、SeaWiFS、SCS、COCTS2)。其次就是减少漫反射板被太阳光照射的次数, VIIRS、MODIS 每轨扫描下, 漫反射板都能被太阳光照射, 因此漫反射板的衰减比较严重, COCTS2 为了避免这个问题, 平时将漫反射板倾斜, 每 2 天做一次太阳定标观测, 这样就减缓了漫反射板反射率降低的趋势。也可以利用掺杂稀土元素的漫反射板来提供一些特征光谱反射曲线, 为星上的光栅型光谱仪做光谱定标, 用来校

准光栅仪器受温度影响后的色散变化, 配备此类漫反射参考板的遥感器有 MERIS (Delwart 等, 2007)、OLCI (Lamquin 等, 2020) 和中国的星上定标光谱仪 SCS (Satellite Calibration Spectrometer) (Xu 等, 2022)。

中国在 HY-1C 卫星 (2018 年发射) 上首次使用星上定标机构, 通过星上定标机构给 SCS 定标, 再通过交叉定标的方式给同平台载荷做定标。新一代海洋水色观测卫星的两个主载荷 (COCTS2 和 PMRIS) 都带了星上定标机构, 是首次在海洋水色卫星对地观测主载荷上搭载星上定标机构。COCTS2 由于是摆扫成像, 采用 2 块太阳漫反射板机制, 两块板双面对立安装, 一面是定标用的定标板, 另一面是参考板, 漫反射板倾斜放置, 避免太阳直射任意一面。太阳光照射到漫反射板的光学路径上配备 1 个透过率约 13% 的衰减屏。每 2 天观测一次定标板, 每 2 个月观测一次参考板。PMRIS 推扫成像, 采用机构托举漫反射板做定标, 由于 PMRIS 有 5 个相机模块, 因此需要 2 次太阳定标才能完成 5 个相机的定标观测; 配备比辐射计监视太阳漫反射板的反射率衰减情况, 不配备太阳光衰减装置。定标板平时处于绝光状态, 每月观测 2 次定标板, 每半年比辐射计观测一次定标板。

3.3.3 月球定标

月球定标是监测海洋水色遥感器在轨辐射响应变化的第二种方法, 月球反射率相对较低且稳定, 观测月球时的各谱段辐亮度响应的动态范围与对地观测时海洋目标较为接近, 因此观测月球不需要增加衰减屏等机构, 无须考虑漫反射板衰减情况。NASA 从 SeaWiFS 开始就对月球进行观测, 来对遥感器进行辐射衰减评估, SeaWiFS 通过飞行器的俯仰滚动, 在仪器天底观测方向对月球扫描成像, 通过归一化月球光度模型进行辐射响应的趋势分析。由于观测月球需要飞行器的俯仰和滚动, 每年也只能观测月球 8—9 次。观测月球的另一个好处是, 多个遥感器无需同时观测, 这为不同遥感器的相互校准提供了方便。另外, 月球定标可以弥补在轨替代定标在近红外通道应用的不足。SeaWiFS 是第一个实现 10 年期观测记录的遥感器, Eplee 等 (2012) 对 SeaWiFS 寿命期内进行了定标的回顾, 月球定标的结果显示, 任务

期间 490 nm、510 nm、555 nm 通道的探测器性能约退化 1%，412 nm、443 nm、670 nm 通道约退化 3%，765 nm 通道约退化 9%，而 865 nm 通道的退化则高达约 21%。Choi 等（2022）也总结了 Suomi_NPP 卫星 VIIRS 的十年内定标情况，月球定标与太阳定标的长期趋势具有一致性，两者的标准差大多在 1% 左右，但随着时间的推移，这种长期趋势差异越来越大，特别在 M1–M4 波段，这与月球定标的观测频次不高有一定关联。其他卫星如 SGLI、OLCI 都有尝试过月球定标（Neneman 等，2020；Urabe 等，2020），但目前还没有载荷寿命期内的定标状况评估。

中国的海洋水色卫星在月球观测任务上还属于起步阶段，考虑到卫星俯仰和滚动带来的卫星运行风险，卫星在轨期间对俯仰和滚动一直持审慎态度，与 MODIS、VIIRS 类似，HY-1C/D 卫星 COCTS 的冷空观测窗口偶尔也会看到月亮，虽然没有利用卫星平台机动来补偿对月成像时的过扫描现象，但是仍然可以捕捉到月亮的影像，这给月球定标带来一定的可能（Wang 等，2022）。新一代海洋水色卫星具备月球定标机动观测能力，在轨期间会探索进行月球定标，并给出遥感器寿命内辐射衰减趋势。

3.3.4 系统替代定标

系统替代定标是水色遥感器实现长期数据观测的重要手段，是由于在系统替代定标中可以抵消因水色大气校正算法引入的偏差。替代定标的实现需要高质量的现场光学测量数据或者长时间序列的寡营养水体的海洋光学观测数据。如在 SeaWiFS 的设计时，就明确了每年不少于一次的海上现场观测试验与海洋光学浮标建设。目前位于夏威夷的海洋光学浮标数据已经为 SeaWiFS、MODIS、VIIRS、MERIS、SGLI 等载荷做了系统替代定标。另一个需要关注的地球目标就是地球寡营养水体区域，这些为同期在轨水色观测卫星互相对比提供有利条件。如 Terra 的 MODIS 由于扫描镜的性能退化，即使太阳定标也无法完成其水色产品的定量化反演需求，最终只能通过与 SeaWiFS 交叉定标的方法实现 MODIS 的水色产品生产（Kwiatkowska 等，2008）。

中国海洋卫星的替代定标参考国际同行的情

况，目前也是以多卫星交叉定标为基本业务，航次试验辅助数据来源，并加快海上定标场建设，通过以上工作，保证海洋卫星水色载荷的在轨辐射定标基线。

3.5 空间分辨率与覆盖范围

实现一个完整的地球生态系统观测，希望全球观测资料持续不少于 5 年，期望达 10 年；全球覆盖的最短时间希望在 2 天以内，这样才有希望实现一周的水色要素平均产品生产。考虑到卫星观测几何带来的大气程辐射的影响，一般约束太阳天顶角 75° 、卫星天顶角 60° 范围内的观测资料有效。另外太阳耀光对水色观测资料的影响不可忽视，因此即使对于低轨太阳同步轨道遥感器（幅宽 3000 km），最终的水色资料贡献也是大约 2 天覆盖一次全球（不考虑云的影响）。全球海洋生态环境参数研究，其气候级遥感数据为 4 km 网格产品，即使 1 km 空间分辨率的遥感器，在卫星天顶角约 60° 的时候也可以保证其 4 km 网格采样需求，因此对于全球观测载荷仍然选择 1 km 的空间分辨率；在考虑到近岸水体的需求，这种全球观测遥感器分辨率希望 50—300 m。从以上基本需求可以看出，从 CZCS 开始到 OCI，NASA 全球观测一直延续其 1 km 空间分辨率，在扣除耀光影响后可以实现 2 天全球覆盖。欧洲的全球水色观测则保持双空间分辨率运行（MERIS 和 OLCI），全球约 1.2 km，区域 300 m 空间分辨率，2 颗卫星同时在轨保证了 2 天一次全球水色资料覆盖。中国的海洋卫星基于以上考虑，HY-1C/D 卫星的 COCTS 以 1 km 空间分辨率，上下午组网观测，实现了一天全球水色资料覆盖（升轨和降轨成像中海面太阳耀光位置几乎没有重叠）。新一代海洋水色卫星 HY-3A 采用 500 m 空间分辨率，大约 2 天可实现全球水色资料覆盖（去除耀斑影响后），与现有 HY-1C/D 组网，全球覆盖小于 1 天，更高的空间分辨率可以实现全球 2 km 网格产品生产。HY-3A 卫星的 PMRIS 面向近岸水域观测需求，100 m 的空间分辨率以及 3 天的重访能力，对近岸的水色观测也有非常高的价值，将来与 HY-3B 组网观测，可以实现全球近海小于 2 天一次的水色资料覆盖能力。对于内陆水体的空间覆盖，全球长期变化趋势分析一般关注丰水期和枯水期，每个月实现覆盖即可，但空间分

分辨率要求比较高,如 MSI 和 OLI 都是以 10—30 m 分辨率为主,重访时间从几天、十几天到几十天不等。HY-3A 卫星上的 CZI2 配有 20 m 分辨率的多光谱相机,配合其摆镜成像,可以实现 3 天重访,对于近岸以及内陆水体的观测具有极高的便利性和应用潜力。

对于更好的重访需求,如受潮汐影响的海岸带环境、近海海洋灾害以及内陆水体藻华等监测,要求的观测频次从局地几天一次到了一天几次,极轨卫星每日单次局地覆盖很难满足需求,则需要静止轨道卫星进行局地观测,如韩国的 GOCI-II,就将空间分辨率提升到 250 m,观测频次提高到每天 10 次。当然,静止轨道卫星观测的科学目标就变成了局地事件的过程跟踪和趋势分析,不再是极轨卫星观测的全球趋势变化研究,科学目标的不同决定了卫星与载荷的设计思路。

4 技术发展方向

4.1 应用拓展促进技术指标提升

随着光电探测器技术的进步,通道数不断增加,波段带宽在减小,这是技术进步的结果,也是观测任务多样化的需求;水色遥感器信噪比与动态范围的要求也可见一斑,信噪比从早期的蓝绿波段普遍为 500—600,现在已经达到并超过 1000,甚至高光谱载荷也达到 1000 的水平。海洋目标的反射率比陆地目标低许多,是其特有的辐射动态特征。水色应用场景下的典型辐亮度比较低,尤其在红波段到短波红外波段,在如此低的辐亮度条件下要刻画更多的辐射分辨细节,需要仪器具备足够高的信噪比。随着数值量化位数的提升,从最初 SeaWiFS 的 10 位量化到现在主流遥感器的 14 位量化,可以有效提升遥感器的信噪比;另外一个信噪比提升途径就是多动态输出,即低动态输出保证低辐射信号的信噪比,而高动态输出保证高辐射信号的动态范围,这一技术方案明确使用在 SeaWiFS、MODIS、VIIRS、GOCI、OLCI、PMRIS 等载荷上,甚至高光谱的 OCI 也应用了此类技术,这些多动态输出早期靠多增益、多配置同一通道以及信号多次采样累积方法,很多技术目前已能实现星上处理。

图 8 给出了主流水色载荷的信噪比情况,参考胡传民等人将仪器的输入辐亮度转换为统一的典型输入辐亮度 (Hu 等, 2012a),但是空间分辨率还是各遥感器固有的。可以看出,目前主流遥感器的信噪比还是以 VIIRS (750 m) 和 OLCI (300 m) 为主要参考,中国新一代海洋水色观测卫星搭载的 COCTS2 (500 m) 基本与此水平相当, HY-1C/D 卫星搭载的 COCTS (1 km) 比 SeaWiFS (1 km) 略强。特别说明的是, HY-3A 卫星搭载的 PMRIS 是采用 100 m 分辨率评价,如果转换为 1 km 分辨率,其信噪比会大幅提高,甚至超过 MODISA (1 km) 的结果。

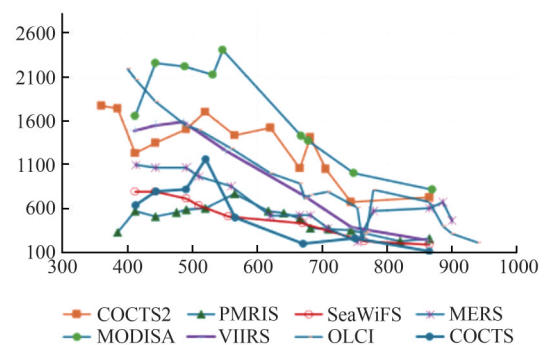


图 8 主流水色遥感器信噪比对比 (MERIS、MODISA、SeaWiFS 数据来自 Hu 等, 2012a)

Fig. 8 Comparison of SNR of major ocean color sensors (SNR of MERIS, MODISA, and VIIRS is from Hu et al., 2012a)

4.2 全球水色卫星观测任务持续并细化

全球水色卫星观测资料自 OCTS 开始,到现在已经有连续 28 年观测记录,成为全球海洋气候观测记录的一个重要组成部分,这得益于各国海洋水色卫星观测任务的持续更替,也保证了在未来 10 年依然可以有足够的光学遥感器来支持任务的持续性。表 1 给出了各国 2010 年到 2030 年已经发射和计划发射的极轨水色卫星计划。美国新发射的 PACE 卫星 OCI 作为高光谱的全球探测水色遥感器,观测数据可以持续到 2030 年, VIIRS 搭载的下一颗卫星 JPSS3 预计 2026 年发射。欧洲的 OLCI 搭载在 Sentinel-3C/D 卫星在未来会接替目前的 Sentinel-3A/B, 日本的 GCOM-C 后续卫星都会保持原来水色遥感器不变的情况下持续开展既定观测任务。

表1 2010年—2030年发射的和计划发射卫星计划
Table 1 Launched and planned satellite missions from 2010—2030

机构	遥感器	光谱范围和通道数	分辨率/幅宽	星上定标	卫星计划	过境地方时	发射时间/年
美国	VIIRS	402—11,800 nm 22个	750 m/ 3000 km	A B	S_NPP		2012
					JPSS1		2017
					JPSS2	下午	2022
					JPSS3		2026
					JPSS4		2031
	OCI	350—2250 nm 高光谱	1 km/ 2600 km	A B	PACE	下午	2024
欧洲	OLCI	400—1020 nm 21个	300 m/ 1400 km	A B	Sentinel-3A		2016
					Sentinel-3B	上午	2018
					Sentinel-3C		2026
					Sentinel-3D		2028
日本	SGLI	375—12,500 nm 19个	250 m 1150 km	A B C	GCOM-C		2018
					GCOM-C2	上午	待定
					GCOM-C3		待定
中国	COCTS	402—12,500 nm 10个	1 km 2900 km	A B C	HY-1C	上午	2018
					HY-1D	下午	2020
	COCTS2	355—12,500 nm 18个	500 m 3000 km	A B	HY-3A	上午	2023
					HY-3B	下午	2028
					HY-3C	上午	2030
阿根廷—巴西	MOC	412—1601 nm 15个	200 m/800 m 1490 km	—	SABIA-Mar	上午	2026

注：A 太阳定标,B 月球定标,C 灯源定标。

中国新一代海洋水色观测系列卫星 HY-3B/C 也能实现目前全球水色观测任务的数据延续，载荷配置基本保持不变，在 2018 年 HY-1C 卫星实现全球水色要素观测的基础上，中国不间断的海洋水色卫星观测资料获取有望持续到 2035 年。值得一提的是阿根廷和巴西也将联合发射 SABIA-Mar 卫星（Satélite Argentino Brasileño para Información del Mar，阿根廷—巴西海洋信息卫星）（Tauro 等，2022），SABIA-Mar 卫星将搭载一个多光谱相机 MOC（Multi-spectral Optical Camera），提供近海 200 m、全球 800 m、幅宽 1500 km 的覆盖成像能力，在 412—1601 nm 范围内设立 15 个波段，同时该多光谱相机在热红外还配置两个波段用于海温观测。

4.3 近海水环境受重视并加强布局

受到土地使用活动、人口增长、极端天气事件和气候变化的影响，在全球近岸水域产生了更频繁、更广泛和有害的水环境事件（如各类藻华事件），此外近海区域海洋航运繁忙，油气开采活动频繁，造成溢油灾害频发，对旅游业、渔业和人类健康产生危害。这些近海水环境灾害类事件发生随机，持续时间短，因此对于观测的频次要求需提高到一天几次。世界各国在总结 GOCI 的成功经验后，都开始布局静止轨道的水色遥感器来

应对近海海洋环境监测需求。各国对静止轨道水色遥感器的发展规划见表 2。

韩国从第一代 GOCI 开始，每一代 GOCI 任务都持续大约 10 年，第三代 GOCI 遥感器预计 2030 年会发射，接续目前在轨的 GOCI-II 的任务，这也是目前为止延续时间最长的静止水色观测卫星资料，也支持了中国渤海、黄海和东海的长期高频次观测需求。

NSAS 的地球系统科学开拓者计划 ESSP（Earth System Science Pathfinder）为研究美国东南部海岸线和亚马逊河羽流延伸到大西洋的海洋生物、化学和生态问题，并提升对有害藻华和溢油等现象的监测能力，布局了地球同步海岸带成像和监测辐射计 GLIMR（Geosynchronous Littoral Imaging and Monitoring Radiometer）。计划在 2027 年—2028 年发射一个位于西经 98° 的赤道上空的地球静止轨道卫星，GLIMR 通过扫描镜扫描覆盖南北纬 50°，西经 40°—155° 范围内，主载荷是一个高光谱成像仪，光谱范围 340—1020 nm，空间分辨率 300 m，南北方向以单个像元 0.763 s 扫描一次，自东向西依次扫描完成观测区成像。GLIMR 预设的观测计划，每天对墨西哥湾拍摄 5—6 张图像，对美国东西海岸拍摄 2—3 张图像（Schaeffer 等，2023）。

表2 静止轨道卫星发射计划
Table 2 Geostationary orbit satellite launch mission

机构	遥感器	卫星计划	通道配置	分辨率/幅宽	星上定标	发射时间或计划时间/年
韩国	GOCI	COMS	400—865 nm 8个	500 m/ 2500 km×2500 km	A	2010
	GOCI-II	GK-2B	380—900 nm 13个	250 m/ 2500 km×2500 km	A	2020
	GOCI-III	待定	待定	待定	待定	2030
美国	HSI	GLIMR	340—1020 nm 141个	300 m/ 10000 km×10000 km	B	2027
中国	海洋与海岸带监视仪	待定	380—12500 nm 16个	25—400 m 直径15000 km	A	2029
	海洋水色光谱成像仪		375—1700 nm 15个谱段/358	200—400 m 直径15000 km	—	

注：A 太阳定标,B 月球定标。

中国也在加紧静止轨道卫星水色遥感器的布局，有望于2029年发射，观测范围为中国18000 km的海岸线以及周边海域。该静止水色观测卫星携带两个海洋光学主载荷，一个是海洋与海岸带监视仪，380—12500 nm范围内配置13个波段，空间分辨率25—400 m，另外一个载荷为海洋水色光谱成像仪，具备375—1700 nm范围内15个谱段多光谱或者358个波段的高光谱输出能力，空

间分辨率200—400 m。与韩国的GOCI类似，两个载荷的成像方式都是面阵凝视成像。

静止水色遥感器是为关键区域部署的高频次观测载荷，各国对于全球海岸带以及内陆水环境变化研究也一直在加强，通过一些高分辨率载荷来完成这一观测任务，一个突出特点是空间分辨率较高，普遍10—200 m，幅宽一般不大于1000 km。各国对高分辨率卫星的发展计划见表3。

表3 高分辨率卫星发射计划
Table 3 High-resolution satellite launch mission

机构	遥感器	通道	分辨率幅宽	卫星计划	发射时间/年
美国	OLI	435—2294 nm 7	30 m 185 km	Landsat 8	2013
	OLI-2	435—2294 nm 9	30 m 185 km	Landsat 9	2020
	LandIS	402—12275 nm 26	10/20/60 m 164×168 km	Landsat-next	2030
	Hyper-VIS-SWIR	380—2500 nm 高光谱	30 m 185 km	SBG	2028
欧洲	MSI	430—2300 nm 13	10/20/60 290 km	Sentinel-2A	2015
				Sentinel-2B	2017
				Sentinel-2C	2024
				Sentinel-2D	2026
中国	HSI	400—2500 nm 高光谱 200	30 m 130 km	CHIME-A CHIME-B	2028 2030
	CZI	420—890 nm 4	≤50 m ≥950 km	HY-1C HY-1D	2018 2020
	CZI2	400—1040 nm 8	≤5 m/≤20 m ≥60 km	HY-3A	2023
				HY-3B	2028
				HY-3C	2030
	PMRIS	385—1640 nm 19个或者94个	100 m或者200 m 950 km	HY-3A HY-3B HY-3C	2023 2028 2030
	MSS	435—890 nm 8	20 m,>180 km	HiSea-2	2021
	多光谱成像仪	380—900 nm/7	10 m,300 km	SDGSAT-1	2021

得益于Sentinel-2优越的光谱特征, Sentinel-2系列卫星在内陆水体遥感监测得到充分使用, 随着高光谱空间仪器的应用, 哥白尼计划还推出了哥白尼环境高光谱成像任务CHIME (Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment), 也称作Sentinel-10。计划发射两颗卫星(CHIME-A和CHIME-B)来补充目前的Sentinel-2任务, 每颗卫星都携带一个独特的可见光到短波红外高光谱成像仪HSI (Hyperspectral Imaging), 在400—2500 nm提供大于200个波段, 大约30 m空间分辨率, 130 km幅宽的观测数据(Rast等, 2021)。

在全球高光谱的对地观测任务中, NASA还规划了一个地球表面生态和地质SBG (Surface Biology and Geology)项目, 将利用极轨卫星开展380—2500 nm高光谱全球对地观测, 旨在利用可见光至短波红外成像光谱学和多光谱或超光谱热红外成像技术, 研究陆地和水生生态系统以及生物多样性、地质学、火山、水循环等许多相关应用科学专题(Cawse-Nicholson等, 2021; Stavros等, 2023)。考虑到CHIME和SBG的任务目标一致性, NASA和ESA优先在成像光谱空间任务方面合作, 并通过成立3个工作组解决校准和验证、数据产品协调、算法建模和全链路仿真的合作。

高分辨率对地观测方面, 美国下一代陆地卫星Landsat-next也将在Landsat 9结束任务后接替运行, 每颗卫星携带一个光学载荷LandIS (Landsat Next Instrument Suite), 该载荷分辨率从目前OLI的30 m提升到10 m, 可见到短波红外配置21个谱段, 采用3颗卫星以相位120°在轨运行, 提供全球陆地的重复覆盖, Landsat-next预计2030年发射(Wulder等, 2022)。

中国海洋一号卫星搭载的海岸带成像仪一直承担近海、海岸带以及内陆水环境监测任务, 目前HY-1C/D卫星的CZI以及最新发射的HY-3A卫星的CZI2和PMRIS都为近海以及海岸带监测做了特别设计, 尤其HY-3A卫星还有两颗业务卫星接续任务, 预计这种高分辨率近海观测数据也会持续到2030年。中国于2010年启动的高分计划重大科技专项, 支持国土资源调查、环境监测、农业、林业、海洋等领域的应用, 部分高分载荷与中国海洋卫星的CZI和CZI2类似, 通常在可见近红外通道配有4个或8个通道, 在非常浑浊的内陆水体以及近海河口区域, 高分卫星多光谱相机也可为

海洋水色卫星提供必要的观测补充。2021年发射了全球首颗专门服务于联合国可持续发展目标的SDGSAT-1卫星, 通过多光谱和红外成像仪, 以10 m至40 m的分辨率为全球可持续发展监测提供数据。除此之外, 中国的商业卫星也逐渐关注海洋水色观测, 海丝二号卫星聚焦于近海、浅海和内陆水环境观测, 具有8个可见光和近红外波段, 分辨率优于20 m, 幅宽约180 km。中国海洋系列、高分系列以及商业小卫星在轨道类型、分辨率、幅宽及传感器配置方面各具特色, 共同构建起中国高精度、广覆盖的近海水环境遥感监测体系, 有效填补了海洋水色遥感器在近海、海岸带、内陆水环境以及海洋生态灾害监测上的不足。

4.4 多任务需求优化载荷配置

水色遥感卫星是整个对地观测体系里的一个分支, 是海洋生态环境监测的主要空间仪器, 是对地观测多任务系统下的一个方向性任务。水色遥感器卫星几乎都携带多个观测仪器, 如搭载MERIS的ENVISAT卫星就是最复杂的对地观测卫星之一, OLCI所在Sentinel-3卫星、MODIS所在的Terra和Aqua卫星都是多任务载荷; 即使VIIRS是多个任务载荷的优化升级, 但是其所在的卫星, 都同时携带了其他多个任务载荷。另外一个比较突出特点是水色观测和海温观测通常会统筹在一个载荷或者一个卫星平台上, CZCS、MODIS、VIIRS、OCTS、SGLI、COCTS、COCTS2等就是在一个载荷内既配有水色观测通道, 也配备了海温观测的热红外通道; 在Sentinel-3系列卫星平台上有OLCI和海表与陆表温度辐射计SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer)。

应用需求决定了载荷的技术指标, CZCS作为水色观测的试验载荷, 在通道的动态范围和波段带宽就做了专门设计, 而SeaWiFS是单一任务的水色观测载荷, 没有过多的考虑大气与陆地的应用需求; 但在MERIS、OLCI、MODIS、VIIRS等载荷设计时, 就综合考虑了水色、陆地和大气用户的科学需求, 从而变成了通道更多、动态更大、分辨率更丰富、应用更广的综合性水色遥感器, 当然也扩大了载荷的用户影响力, 最新发射的PACE卫星也是考虑了大气、云、海洋生态(水色)的应用需求而设计的。另外一个关于海洋水色卫星载荷考虑就是近海和全球观测任务的统筹, 又代

表性的是 MODIS、VIIRS、MERIS、OLCI 以及 SGLI 等多空间分辨率通道配置, 在一个遥感载荷上要兼顾近海与全球大洋的覆盖需求。

中国在对地观测统筹管理的能力有待进一步提升, 目前是以业务部门需求为主的卫星发展模式, 海洋、陆地和大气观测多用户需求, 目前还是在同一个卫星平台上进行多用户统筹。中国海洋水色卫星一直都是多载荷配置, 每个载荷侧重不同的观测任务, 两个主要任务是全球海洋水色水温与近海/海岸带环境监测。这种统筹不是分辨率或动态响应在单一载荷上的选择, 而是根据不同的任务需求, 设计了两个及以上的独立遥感器。从 HY-1A 的 COCTS 到 HY-3A 的 COCTS2, 一直承担着全球水色水温观测任务, 该类型载荷具备窄通道、多光谱、高信噪比、宽覆盖、较低空间分辨率的特点; 而面向海岸带观测的需求, 载荷具有中高空间分辨率、通道较少、波段带宽较宽、信噪比较低、空间覆盖有限等特点; 从早期的 CZI 到目前的 CZI2 和 PMRIS, 载荷种类、通道数量、分辨率、量化能力都在增加, 也进一步表明中国对近海、海岸带以及内陆水体监测的重视。

4.5 海洋观测新体制正在谋篇布局

经过近 50 年的发展, 水色遥感无论在传感器光谱分辨率、辐射灵敏度以及相关算法模型等方面都得到了长足进步, 整个技术体系已经渐趋成熟, 然而在探寻全球海洋生态系统如何变化的科学目标上, 水色遥感目前依然停留在近表层的二维分布特征观测上, 与海洋业务及科学应用所需的水体剖面结构、物质能量迁徙与时空分布三维探测等需求存在巨大的差距 (唐军武 等, 2021)。传统水色遥感仅是海洋表层积分式成像观测 (Behrenfeld 等, 2019), 无法提供水色参数的垂直剖面信息 (Hostetler 等, 2018)。以往相关研究是对水体垂向分布情况进行假设, 如假定水体垂向均匀或者假定已知颗粒的垂直分布状态, 影响了遥感反演的准确度 (Morel 和 Gentili, 2004; Overpeck 等, 2011)。研究表明, 如果利用水体剖面分层信息可以将现有净初级生产力的估算精度提高 54% (Schulien 等, 2017), 水体剖面遥感有望引领下一场卫星海洋遥感革命 (Hostetler 等, 2018)。NASA 和意大利航天局已经规划发展星载的海洋—陆地—大气全球观测的云气溶胶激光雷达 CALIGOLA

(Cloud Aerosol Lidar for Global Observations of the Ocean—Land—Atmosphere), 旨在推进对海洋—陆地—大气耦合系统的理解 (Behrenfeld 等, 2023; Starr, 2011), 中国崂山实验室也提出了“观澜号”海洋激光卫星计划 (Chen 等, 2019)。目前尚未有在轨运行的星载海洋激光雷达, 但是各国都已经在做相关卫星载荷的技术储备工作 (Chen 等, 2021a, 2021b)。

另一个主要突破方向是海洋偏振信息获取, 海洋偏振信号携带着气溶胶、海洋悬浮颗粒物、不同粗糙度海面菲涅尔反射等的偏振信息, 其中高空间分辨率海面耀光偏振反射则具有较强的应用潜力。通过偏振信息的提取, 不仅可以修复太阳耀光污染下的离水辐射信息, 也可以给出水体浮游颗粒信息, 还可以利用海面耀光偏振反射开展溢油、波浪等研究 (Chami 和 Platel, 2007; Harmel 和 Chami, 2008, 2012, 2013; Loisel 等, 2008; Lu 等, 2017; Sokolov 等, 2010; Zhou 等, 2020)。这些偏振光谱成像载荷探索, 从早期 ADEOS 卫星上 POLDER 载荷及其改进型 PARASOL (Polarisation and Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Science coupled with Observations from a Lidar) 载荷、GCOM-C 卫星上的 SGLI, 以及目前 PACE 卫星上的两个多角度光谱偏振仪 SPEXone (Spectro-polarimeter for Planetary Exploration) 和超角度偏振仪 HARP 2 (Hyper Angular Research Polarimeter), 其设计的最初目标都是开展气溶胶和云的研究, 这些偏振载荷不仅可以改进同平台水色载荷的大气校正能力, 同时也可以得到一部分的水面与水体偏振信息。偏振载荷与水色载荷的协同应用未来有望在海洋水色、海面漂浮目标、海面环境动力特征等研究中取得重大突破。

5 结 语

海洋水色观测有着近 30 年的不间断科学数据记录, 为人类了解地球海洋生态系统的变化提供了基础研究资料。这期间, 各国在遥感器的设计、辐射定标以及数据处理都得到重大发展, 针对全球以及重点海区部署了可持续的观测计划。基于水色遥感的需求, 全球诸多学者在遥感器设计、定标技术、大气校正、海洋生物光学模型、海洋光学现场观测仪器、海洋生态环境监测等方面取得了丰硕成果, 但仍有诸如海洋偏振辐射传输、

海洋剖面激光雷达等技术待探索和突破。

中国的海洋水色遥感技术目前正处于不断积累阶段,虽然起步阶段充满坎坷,目前正实现跨越式发展,积极布局支持2035年全球以及重要海域的海洋水色观测计划,是海洋强国、科技强国建设的具体表现;还将通过开放观测数据建设,推动全球科学用户的共享共用,促进中国海洋水色卫星技术高质量发展,在全球海洋命运共同体以及全球综合治理中发挥大国责任。

志 谢 厦门大学李忠平教授、国家卫星海洋应用中心丁静、叶小敏研究员在本文撰写过程中信息和指点,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- Ahn J H and Park Y J. 2020. Estimating water reflectance at near-infrared wavelengths for turbid water atmospheric correction: a preliminary study for GOCI-II. *Remote Sensing*, 12(22): 3791 [DOI: 10.3390/rs12223791]
- Ahn J H, Park Y J, Ryu J H, Lee B and Oh I S. 2012. Development of atmospheric correction algorithm for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI). *Ocean Science Journal*, 47(3): 247-259 [DOI: 10.1007/s12601-012-0026-2]
- Ardanuy P E, Schueler C F, Miller S W, Kealy P M, Cota S A, Haas M and Welsch C. 2002. NPOESS VIIRS design process//Proceedings Volume 4483, Earth Observing Systems VI. San Diego: SPIE: 24-34 [DOI: 10.1117/12.453461]
- Babu K N, Shukla A K, Sridhar V N, Damiri A B and Reyes F J O. 2013. Post-launch calibration of Ocean Colour Monitor 2 using Kavaratti CAL-VAL site observations. *Current Science*, 104(1): 23-28
- Barnes B B, Cannizzaro J P, English D C and Hu C M. 2019. Validation of VIIRS and MODIS reflectance data in coastal and oceanic waters: an assessment of methods. *Remote Sensing of Environment*, 220: 110-123 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.034]
- Barnes R A, Eplee R E, Biggar S F, Thome K J, Zalewski E F, Slater P N and Holmes A W. 2000. SeaWiFS transfer-to-orbit experiment. *Applied Optics*, 39(30): 5620-5631 [DOI: 10.1364/AO.39.005620]
- Barnes R A, Eplee R E, Schmidt G M, Patt F S and McClain C R. 2001. Calibration of SeaWiFS. I. Direct techniques. *Applied Optics*, 40(36): 6682-6700 [DOI: 10.1364/ao.40.006682]
- Barnes R A and Zalewski E F. 2003. Reflectance-based calibration of SeaWiFS. I. Calibration coefficients. *Applied Optics*, 42(9): 1629-1647 [DOI: 10.1364/ao.42.001629]
- Barnes W L, Pagano T S and Salomonson V V. 1998. Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1088-1100 [DOI: 10.1109/36.700993]
- Behrenfeld M J, Gaube P, Della Penna A, O'Malley R T, Burt W J, Hu Y X, Bontempi P S, Steinberg D K, Boss E S, Siegel D A, Hostetler C A, Tortell P D and Doney S C. 2019. Global satellite-observed daily vertical migrations of ocean animals. *Nature*, 576(7786): 257-261 [DOI: 10.1038/s41586-019-1796-9]
- Behrenfeld M J, Lorenzoni L, Hu Y X, Bisson K M, Hostetler C A, Di Girolamo P, Dionisi D, Longo F and Zoffoli S. 2023. Satellite Lidar measurements as a critical new global ocean climate record. *Remote Sensing*, 15(23): 5567 [DOI: 10.3390/rs15235567]
- Behrenfeld M J, Westberry T K, Boss E S, O'Malley R T, Siegel D A, Wiggert J D, Franz B A, McClain C R, Feldman G C, Doney S C, Moore J K, Dall'Olmo G, Milligan A J, Lima I and Mahowald N. 2009. Satellite-detected fluorescence reveals global physiology of ocean phytoplankton. *Biogeosciences*, 6(5): 779-794 [DOI: 10.5194/bg-6-779-2009]
- Bie W J, Fei T, Liu X Y, Liu H Z and Wu G F. 2020. Small water bodies mapped from Sentinel-2 MSI (MultiSpectral Imager) imagery with higher accuracy. *International Journal of Remote Sensing*, 41(20): 7912-7930 [DOI: 10.1080/01431161.2020.1766150]
- Bourg L and Delwart S. 2006. MERIS instrument calibration// MERIS and AATSR Calibration and Geophysical Validation (MAVT-2006). Taormina, Italy, 20 - 24 March 2006
- Bramich J, Bolch C J S and Fischer A. 2021. Improved red-edge chlorophyll-a detection for Sentinel 2. *Ecological Indicators*, 120: 106876 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106876]
- Cao C, Xiong X, Wolfe R, DeLuccia F, Liu Q, Blonski S, Lin G, Nishihama M, Pogorzala D and Oudrari H. 2013. Visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) sensor data record (SDR) user's guide. NOAA technical report NESDIS, 142
- Cao C Y, De Luccia F J, Xiong X X, Wolfe R and Weng F Z. 2014. Early on-orbit performance of the visible infrared imaging radiometer suite onboard the Suomi national polar-orbiting partnership (S-NPP) Satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(2): 1142-1156 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2247768]
- Carder K L, Chen F R, Cannizzaro J P, Campbell J W and Mitchell B G. 2004. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a. *Advances in Space Research*, 33(7): 1152-1159 [DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00365-X]
- Cawse-Nicholson K, Townsend P A, Schimel D, Assiri A M, Blake P L, Buongiorno M F, Campbell P, Carmon N, Casey K A, Correa-Pabón R E, Dahlin K M, Dashti H, Dennison P E, Dierssen H, Erickson A, Fisher J B, Frouin R, Gatebe C K, Gholizadeh H, Gierach M, Glenn N F, Goodman J A, Griffith D M, Guild L, Hakkenberg C R, Hochberg E J, Holmes T R H, Hu C M, Hulley G, Huemmrich K F, Kudela R M, Kokaly R F, Lee C M, Martin R, Miller C E, Moses W J, Muller-Karger F E, Ortiz J D, Otis D B, Pahlevan N, Painter T H, Pavlick R, Poulter B, Qi Y, Realmuto V J, Roberts D, Schaepman M E, Schneider F D, Schwandner F M,

- Serbin S P, Shiklomanov A N, Stavros E N, Thompson D R, Torres-Perez J L, Turpie K R, Tzortziou M, Ustin S, Yu Q, Yusup Y and Zhang Q Y. 2021. NASA's surface biology and geology designated observable: a perspective on surface imaging algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 257: 112349 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112349]
- Chami M and Platel M D. 2007. Sensitivity of the retrieval of the inherent optical properties of marine particles in coastal waters to the directional variations and the polarization of the reflectance. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C5): C05037 [DOI: 10.1029/2006JC003758]
- Chen G, Tang J W, Zhao C F, Wu S H, Yu F J, Ma C Y, Xu Y S, Chen W B, Zhang Y H, Liu J and Wu L X. 2019. Concept design of the "Guanlan" science mission: China's novel contribution to space oceanography. *Frontiers in Marine Science*, 6: 194 [DOI: 10.3389/fmars.2019.00194]
- Chen J and Quan W T. 2012. Using Landsat/TM imagery to estimate nitrogen and phosphorus concentration in Taihu Lake, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(1): 273-280 [DOI: 10.1109/JSTARS.2011.2174339]
- Chen P, Jamet C, Mao Z H and Pan D L. 2021a. OLE: a novel oceanic lidar emulator. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(11): 9730-9744 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3035381]
- Chen P, Jamet C, Zhang Z H, He Y, Mao Z H, Pan D L, Wang T Y, Liu D and Yuan D P. 2021b. Vertical distribution of subsurface phytoplankton layer in South China Sea using airborne lidar. *Remote Sensing of Environment*, 263: 112567 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112567]
- Chen S G, Du K P, Lee Z, Liu J Q, Song Q J, Xue C, Wang D S, Lin M S, Tang J W and Ma C F. 2021c. Performance of COCTS in global ocean color remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(2): 1634-1644 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3002460]
- Choi T, Cao C Y, Shao X and Wang W H. 2022. S-NPP VIIRS lunar calibrations over 10 years in reflective solar bands (RSB). *Remote Sensing*, 14(14): 3367 [DOI: 10.3390/rs14143367]
- Clark D K, Feinholz M, Yarbrough M, Johnson B C, Brown S W, Kim Y S and Barnes R A. 2002. Overview of the radiometric calibration of MOBY//Proceedings Volume 4483, *Earth Observing Systems VI*. San Diego: SPIE: 64-76 [DOI: 10.1117/12.453473]
- Clarke G L, Ewing G C and Lorenzen C J. 1970. Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration. *Science*, 167(3921): 1119-1121 [DOI: 10.1126/science.167.3921.1119]
- Clevers J G P W, De Jong S M, Epema G F, Van Der Meer F D, Bakker W H, Skidmore A K and Scholte K H. 2002. Derivation of the red edge index using the MERIS standard band setting. *International Journal of Remote Sensing*, 23(16): 3169-3184 [DOI: 10.1080/01431160110104647]
- Curran P J and Steele C M. 2005. MERIS: the re-branding of an ocean sensor. *International Journal of Remote Sensing*, 26(9): 1781-1798 [DOI: 10.1080/01431160412331330275]
- Darecki M, Kaczmarek S and Olszewski J. 2005. SeaWiFS ocean colour chlorophyll algorithms for the southern Baltic Sea. *International Journal of Remote Sensing*, 26(2): 247-260 [DOI: 10.1080/01431160410001720298]
- Dash P, Walker N, Mishra D, D'Sa E and Ladner S. 2012. Atmospheric correction and vicarious calibration of Oceansat-1 Ocean Color Monitor (OCM) data in coastal case 2 waters. *Remote Sensing*, 4(6): 1716-1740 [DOI: 10.3390/rs4061716]
- Delwart S, Preusker R, Bourg L, Santer R, Ramon D and Fischer J. 2007. MERIS in-flight spectral calibration. *International Journal of Remote Sensing*, 28(3/4): 479-496 [DOI: 10.1080/01431160600821119]
- Doerffer R and Schiller H. 2007. The MERIS case 2 water algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 28(3/4): 517-535 [DOI: 10.1080/01431160600821127]
- Donlon C, Berruti B, Buongiorno A, Ferreira M H, Féménias P, Frerick J, Goryl P, Klein U, Laur H, Mavrocordatos C, Nieke J, Rebhan H, Seitz B, Stroede J and Sciarra R. 2012a. The global monitoring for environment and security (GMES) sentinel-3 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120: 37-57 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.07.024]
- Donlon C, Berruti B, Mecklenberg S, Nieke J, Rebhan H, Klein U, Buongiorno A, Mavrocordatos C, Frerick J, Seitz B, Goryl P, Féménias P, Stroede J and Sciarra R. 2012b. The Sentinel-3 Mission: overview and status//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich: IEEE: 1711-1714 [DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351194]
- Eplee R E, Robinson W D, Bailey S W, Clark D K, Werdell P J, Wang M, Barnes R A and McClain C R. 2001. Calibration of SeaWiFS. II. Vicarious techniques. *Applied Optics*, 40(36): 6701-6718 [DOI: 10.1364/ao.40.006701]
- Eplee R E, Meister G, Patt F S, Barnes R A, Bailey S W, Franz B A and McClain C R. 2012. On-orbit calibration of SeaWiFS. *Applied Optics*, 51(36): 8702-8730 [DOI: 10.1364/AO.51.008702]
- Fan W L, Huang X X and Fu Y T. 2022. Analysis of radiation reference anomaly of HY-1B COCTS and research on the repair algorithm. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 41(1): 342-353 (范文龙, 黄小仙, 傅雨田. 2022. 海洋B星水色仪辐射基准异常分析及修复算法研究. *红外与毫米波学报*, 41(1): 342-353) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2022.01.031]
- Faure F, Coste P, Benchetrit T, Kang G S and Kim H D. 2017. One year in orbit of the first Geostationary Ocean Colour Imager (GO-CI)//Proceedings Volume 10564, *International Conference on Space Optics — ICSO 2012*. Ajaccio: SPIE: 72-80 [DOI: 10.1117/12.2309181]
- Gordon H R, Clark D K, Brown J W, Brown O B, Evans R H and

- Broenkow W W. 1983. Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Applied Optics*, 22(1): 20-36 [DOI: 10.1364/AO.22.000020]
- Gordon H R, Clark D K, Mueller J L and Hovis W A. 1980. Phytoplankton pigments from the Nimbus-7 coastal zone color scanner: comparisons with surface measurements. *Science*, 210(4465): 63-66 [DOI: 10.1126/science.210.4465.63]
- Gordon H R and Wang M H. 1994. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics*, 33(3): 443-452 [DOI: 10.1364/AO.33.000443]
- Gorman E T, Kubalak D A, Patel D, Dress A, Mott D B, Meister G and Werdell P J. 2019. The NASA Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem (PACE) mission: an emerging era of global, hyperspectral Earth system remote sensing//*Proceedings Volume 11151, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXIII*. Strasbourg: SPIE: 78-84 [DOI: 10.1117/12.2537146]
- Guo Y Y, Wei X Q, Huang Z H, Li H H, Ma R H, Cao Z G, Shen M and Xue K. 2023. Retrievals of Chlorophyll-a from GOCI and GOCI-II data in optically complex lakes. *Remote Sensing*, 15(19): 4886 [DOI: 10.3390/rs15194886]
- Harding L W, Magnuson A and Mallonee M E. 2005. SeaWiFS retrievals of chlorophyll in Chesapeake Bay and the mid-Atlantic bight. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62(1-2): 75-94 [DOI: 10.1016/j.ecss.2004.08.011]
- Harmel T and Chami M. 2008. Invariance of polarized reflectance measured at the top of atmosphere by PARASOL satellite instrument in the visible range with marine constituents in open ocean waters. *Optics Express*, 16(9): 6064-6080 [DOI: 10.1364/OE.16.006064]
- Harmel T and Chami M. 2012. Determination of sea surface wind speed using the polarimetric and multidirectional properties of satellite measurements in visible bands. *Geophysical Research Letters*, 39(19): L19611 [DOI: 10.1029/2012gl053508]
- Harmel T and Chami M. 2013. Estimation of the sunglint radiance field from optical satellite imagery over open ocean: multidirectional approach and polarization aspects. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(1): 76-90 [DOI: 10.1029/2012JC008221]
- Hashimoto T. 2000. Geometric correction of ADEOS-II/GLI. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33: 141-147
- He X Q, Bai Y, Wei J, Ding J, Shanmugam P, Wang D F, Song Q J and Huang X X. 2017. Ocean color retrieval from MWI onboard the Tiangong-2 Space Lab: preliminary results. *Optics Express*, 25(20): 23955-23973 [DOI: 10.1364/OE.25.023955]
- Hlaing S, Harmel T, Gilerson A, Foster R, Weidemann A, Arnone R, Wang M H and Ahmed S. 2013. Evaluation of the VIIRS ocean color monitoring performance in coastal regions. *Remote Sensing of Environment*, 139: 398-414 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.013]
- Hostetler C A, Behrenfeld M J, Hu Y X, Hair J W and Schullien J A. 2018. Spaceborne lidar in the study of marine systems. *Annual Review of Marine Science*, 10(1): 121-147 [DOI: 10.1146/annurev-marine-121916-063335]
- Hou X J, Feng L, Dai Y H, Hu C M, Gibson L, Tang J, Lee Z, Wang Y, Cai X B, Liu J G, Zheng Y and Zheng C M. 2022. Global mapping reveals increase in lacustrine algal blooms over the past decade. *Nature Geoscience*, 15(2): 130-134 [DOI: 10.1038/s41561-021-00887-x]
- Hovis W A, Clark D K, Anderson F, Austin R W, Wilson W H, Baker E T, Ball D, Gordon H R, Mueller J L, El-Sayed S Z, Sturm B, Wrigley R C and Yentsch C S. 1980. Nimbus-7 coastal zone color scanner: system description and initial imagery. *Science*, 210(4465): 60-63 [DOI: 10.1126/science.210.4465.60]
- Hu C M. 2021. Remote detection of marine debris using satellite observations in the visible and near infrared spectral range: challenges and potentials. *Remote Sensing of Environment*, 259: 112414 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112414]
- Hu C M, Feng L, Lee Z, Davis C O, Mannino A, McClain C R and Franz B A. 2012a. Dynamic range and sensitivity requirements of satellite ocean color sensors: learning from the past. *Applied Optics*, 51(25): 6045-6062 [DOI: 10.1364/AO.51.006045]
- Hu C M and Le C F. 2014. Ocean color continuity from VIIRS measurements over Tampa bay. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(5): 945-949 [DOI: 10.1109/LGRS.2013.2282599]
- Hu C M, Lee Z and Franz B. 2012b. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: a novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C1): C01011 [DOI: 10.1029/2011JC007395]
- Jänicke L K, Preusker R, Docter N and Fischer J. 2023. Estimation of aerosol layer height from OLCI measurements in the O2A-absorption band over oceans. *Remote Sensing*, 15(16): 4080 [DOI: 10.3390/rs15164080]
- Jiang X W, Lin M S and Zhang Y G. 2016. Progress and prospect of Chinese ocean satellites. *Journal of Remote Sensing(in Chinese)*, 20(5): 1185-1198 (蒋兴伟, 林明森, 张有广. 2016. 中国海洋卫星及应用进展. *遥感学报*, 20(5): 1185-1198) [DOI: 10.11834/jrs.20166153]
- Jiang X W, Niu S L, Tang J W and Shao Y. 2005. The system cross-calibration between SeaWiFS and HY-1 COCTS. *Journal of Remote Sensing(in Chinese)*, 9(6): 680-687 (蒋兴伟, 牛生丽, 唐军武, 邵岩. 2005. SeaWiFS与HY-1卫星COCTS的系统交叉辐射校正. *遥感学报*, 9(6): 680-687) [DOI: 10.11834/jrs.200506100]
- Kaufman Y J, Herring D D, Ranson K J and Collatz G J. 1998. Earth observing system AM1 mission to Earth. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1045-1055 [DOI: 10.1109/36.700989]
- Kawamura H and The OCTS Team. 1998. OCTS mission overview.

- Journal of Oceanography, 54(5): 383-399 [DOI: 10.1007/BF02742442]
- King M D and Platnick S. 2018. The Earth Observing System (EOS)// Liang S L, ed. Comprehensive Remote Sensing. Oxford: Elsevier: 7-26 [DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10312-4]
- Kwiatkowska E J, Franz B A, Meister G, McClain C R and Xiong X X. 2008. Cross calibration of ocean-color bands from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer on Terra platform. Applied Optics, 47(36): 6796-6810 [DOI: 10.1364/AO.47.006796]
- Lamquin N, Clerc S, Bourg L and Donlon C. 2020. OLCI A/B tandem phase analysis, Part 1: level 1 homogenisation and harmonisation. Remote Sensing, 12(11): 1804 [DOI: 10.3390/rs12111804]
- Lee Z, Wang D S, Zheng Z H, Wang L L, Xu P M, Li X, Qiao H Y, Wu X L, Jian C L, Dai M H, Shang S L and Bao Y H. 2024. SmallSat for monitoring aquatic ecosystem of coastal and inland waters: the experience of HiSea-II. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62: 1002010 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3459912]
- Li L, Yin D Y, Li Q L, Zhang Q and Mao Z H. 2023a. An exploratory verification method for validation of sea surface radiance of HY-1C satellite UVI payload based on SOA algorithm. Electronics, 12(13): 2766 [DOI: 10.3390/electronics12132766]
- Li W K, Xia G P, Song Q J, Tong R Q and Tian L Q. 2023b. Evaluation and adjustment of the radiometric degradation of HY-1B satellite COCTS via a stable marine site. Geo-Spatial Information Science, 26(3): 321-332 [DOI: 10.1080/10095020.2022.2053303]
- Liang C, Liu L, Liu J Q, Zou B, Zou Y R and Cui S S. 2020. Extracting mangrove information using MNF transformation based on HY-1C CZI spectral indices reconstruction data. Haiyang Xuebao, 42(4): 104-112 (梁超, 刘利, 刘建强, 邹斌, 邹亚荣, 崔松雪. 2020. 基于HY-1C CZI影像光谱指数重构数据MNF变换的红树林提取. 海洋学报, 42(4): 104-112) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2020.04.012]
- Lin M S, Ye X M, Ma C F and Zou B. 2024. China's Ocean color observation satellites and their applications. Advanced Small Satellite Technology, 1(1): 30-46 (林明森, 叶小敏, 马超飞, 邹斌. 2024. 中国海洋水色观测卫星及其应用. 先进小卫星技术, 1(1): 30-46)
- Liu J C, Liu J Q, Ding J and Lu Y C. 2022. A refined imagery algorithm to extract green tide in the Yellow Sea from HY-1C satellite CZI measurements. Haiyang Xuebao, 44(5): 1-11 (刘锦超, 刘建强, 丁静, 陆应诚. 2022. HY-1C卫星CZI载荷的黄海绿潮提取研究. 海洋学报, 44(5): 1-11) [DOI: 10.12284/hyxb2022097]
- Liu J Q. 1997. Demand analysis and recommendations for China's ocean color satellite. Aerospace China, 5: 3-5, 9 (刘建强. 1997. 我国海洋水色卫星的需求分析与建议. 中国航天, 5: 3-5, 9)
- Liu J Q, Jiang X W and Lin M S. 2021. Past, current status and suggestions of Chinese oceanographic satellites. Satellite Application, (9): 14-18 (刘建强, 蒋兴伟, 林明森. 2021. 我国海洋卫星发展历程、现状与建议. 卫星应用, (9): 14-18) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-9030.2021.09.006]
- Liu J Q, Ye X M, Song Q J, Ding J and Zou B. 2023. Products of HY-1C/D ocean color satellites and their typical applications. National Remote Sensing Bulletin, 27(1): 1-13 (刘建强, 叶小敏, 宋庆君, 丁静, 邹斌. 2023. HY-1C/D海洋水色卫星产品体系及其典型应用. 遥感学报, 27(1): 1-13) [DOI: 10.11834/jrs.20235002]
- Liu M K, Guan L, Liu J Q, Song Q J, Ma C F and Li N H. 2021. First assessment of HY-1C COCTS thermal infrared calibration using MetOp-B IASI. Remote Sensing, 13(4): 635 [DOI: 10.3390/rs13040635]
- Liu M K, Merchant C J, Embury O, Liu J Q, Song Q J and Guan L. 2022. Retrieval of sea surface temperature from HY-1B COCTS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60: 5002913 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3190444]
- Liu M K, Merchant C J, Guan L and Mittaz J P D. 2018. Inter-calibration of HY-1B/COCTS thermal infrared channels with MetOp-A/IASI. Remote Sensing, 10(8): 1173 [DOI: 10.3390/rs10081173]
- Loisel H, Duforet L, Dessailly D, Chami M and Dubuisson P. 2008. Investigation of the variations in the water leaving polarized reflectance from the POLDER satellite data over two biogeochemical contrasted oceanic areas. Optics Express, 16(17): 12905-12918 [DOI: 10.1364/OE.16.012905]
- Louet J and Bruzzi S. 1999. ENVISAT mission and system//IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Hamburg: IEEE: 1680-1682 [DOI: 10.1109/IGARSS.1999.772059]
- Lu Y C, Zhou Y, Liu Y X, Mao Z H, Qian W X, Wang M Q, Zhang M W, Xu J, Sun S J and Du P J. 2017. Using remote sensing to detect the polarized sunglint reflected from oil slicks beyond the critical angle. Journal of Geophysical Research: Oceans, 122(8): 6342-6354 [DOI: 10.1002/2017JC012793]
- Madrid C R. 1978. The Nimbus 7 user's guide. 298
- Masaru H, Tanaka K, Okamura Y, Amano T and Shiratama K. 2007. Design challenge on forthcoming SGLI boarded on GCOM-C//Proceedings Volume 6744, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XI. Florence: SPIE: 184-191 [DOI: 10.1117/12.738222]
- Matsuoka A, Campbell J W, Hooker S B, Steinmetz F, Ogata K, Hirata T, Higa H, Kuwahara V S, Isada T, Suzuki K, Hirawake T, Ishizaka J and Murakami H. 2022. Performance of JAXA's SGLI standard ocean color products for oceanic to coastal waters: chlorophyll a concentration and light absorption coefficients of colored dissolved organic matter. Journal of Oceanography, 78(4): 187-208 [DOI: 10.1007/s10872-021-00617-2]
- Meister G, Knuble J J, Gliese U, Bousquet R, Chemerys L H, Choi H, Eplee R E, Estep R H, Gorman E T, Kitchen-McKinley S, Kubalak D, Lee S, McClain C, McIntire J W, Patt F S, Rhodes Z and Werdell P J. 2024. The Ocean Color Instrument (OCI) on the Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem (PACE) mission: system design and prelaunch radiometric performance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62: 5517418 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3383812]

- Morel A and Gentili B. 2004. Radiation transport within oceanic (case 1) water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C6): C06008 [DOI: 10.1029/2003JC002259]
- Mueller J L, Austin R W, Hooker S B and Firestone E R. 1992. SeaWiFS technical report series. Volume 5, Ocean optics protocols for SeaWiFS validation. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center
- Murphy R E, Barnes W L, Lyapustin A I, Privette J, Welsch C, DeLuccia F, Swenson H, Schueler C F, Ardanuy P E and Kealy P S M. 2001. Using VIIRS to provide data continuity with MODIS//Scanning the Present and Resolving the Future. *Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Sydney: IEEE: 1212-1214 [DOI: 10.1109/IGARSS.2001.976795]
- Nakajima T Y, Nakajima T, Murakami H, Hoeller R and Iguchi T. 2004. New results from ADEOS-II/GLI//*Proceedings Volume 5234, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII*. Barcelona: SPIE: 517-524 [DOI: 10.1117/12.510934]
- Neneman M, Wagner S, Bourg L, Blanot L, Bouvet M, Adriaensen S and Nieke J. 2020. Use of moon observations for characterization of Sentinel-3B Ocean and land color instrument. *Remote Sensing*, 12(16): 2543 [DOI: 10.3390/rs12162543]
- O'Reilly J E, Maritorena S, Mitchell B G, Siegel D A, Carder K L, Garver S A, Kahru M and McClain C. 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C11): 24937-24953 [DOI: 10.1029/98JC02160]
- Overpeck J T, Meehl G A, Bony S and Easterling D R. 2011. Climate data challenges in the 21st century. *Science*, 331(6018): 700-702 [DOI: 10.1126/science.1197869]
- Pan D L and Doerffer R. 1996. Potential study on the application of ocean channels of China's FY-1B satellite in ocean color remote sensing. *Acta Oceanologica Sinica*, 18(1): 43-50 (潘德炉, Doerffer R. 1996. 中国 FY-1B 卫星海洋通道应用于水色遥感的潜力研究. *海洋学报*, 18(1): 43-50)
- Pan D L, He X Q, Li S Q and Gong F. 2004. Study on application potentiality of the first China's ocean satellite HY-1A. *Acta Oceanologica Sinica*, 26(2): 37-44 (潘德炉, 何贤强, 李淑菁, 龚芳. 2004. 我国第一颗海洋卫星 HY-1A 的应用潜力研究. *海洋学报*, 26(2): 37-44) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-4193.2004.02.004]
- Pan D L, He X Q, Mao Z H and Huang H Q. 2006. CMODIS/SZ-3 data procession and marine environment products//*Proceedings Volume 6419, Geoinformatics 2006: Remotely Sensed Data and Information*. Wuhan: SPIE: 26-31 [DOI: 10.1117/12.712599]
- Pan D L, He X Q and Zhu Q K. 2004. In-orbit cross-calibration of HY-1A satellite sensor COCTS. *Chinese Science Bulletin*, 49(23): 2521-2526 [DOI: 10.1007/BF03183725]
- Park J, Lim H S and Bok J Y. 2020. Development of image pre-processing system for GEO-KOMPSAT-2 GOCI-II//2020 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI). Las Vegas: IEEE: 1702-1703 [DOI: 10.1109/CSCI51800.2020.00315]
- Qi L, Hu C, Lu Y and Ma R. 2023. Spectral analysis and identification of floating algal blooms in oceans and lakes based on HY-1C/D CZI observations. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(1): 157-170 (齐琳, 胡传民, 陆应诚, 马荣华. 2023. 基于 HY-1C/D 卫星 CZI 的海洋、湖泊中漂浮藻类华的光谱分析与识别. *遥感学报*, 27(1): 157-170) [doi: 10.11834/jrs.20235009]
- Rast M, Bezy J L and Bruzzi S. 1999. The ESA medium resolution imaging spectrometer MERIS a review of the instrument and its mission. *International Journal of Remote Sensing*, 20(9): 1681-1702 [DOI: 10.1080/014311699212416]
- Rast M, Nieke J, Adams J, Isola C and Gascon F. 2021. Copernicus hyperspectral imaging mission for the environment (Chime)//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. Brussels: IEEE: 108-111 [DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553319]
- Sarkar S S and Patel V D. 2021. OCM-3 and SSTM-1 payloads on Oceansat-3 (EOS-06) Mission//2021 IEEE International India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS). Ahmedabad: IEEE: 23-26 [DOI: 10.1109/InGARSS51564.2021.9792032]
- Schaeffer B A, Whitman P, Vandermeulen R, Hu C M, Mannino A, Salisbury J, Efremova B, Conmy R, Coffey M, Salls W, Ferriby H and Reynolds N. 2023. Assessing potential of the Geostationary Littoral Imaging and Monitoring Radiometer (GLIMR) for water quality monitoring across the coastal United States. *Marine Pollution Bulletin*, 196: 115558 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115558]
- Schueler C, Clement J E, Darnton L, DeLuccia F, Scalione T and Swenson H. 2003. VIIRS sensor performance//2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse: IEEE: 369-372 [DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1293778]
- Schulien J A, Behrenfeld M J, Hair J W, Hostetler C A and Twardowski M S. 2017. Vertically- resolved phytoplankton carbon and net primary production from a high spectral resolution lidar. *Optics Express*, 25(12): 13577-13587 [DOI: 10.1364/OE.25.013577]
- Shi J R, Shen Q, Yao Y, Li J S, Chen F, Wang R, Xu W T, Gao Z Y, Wang L B and Zhou Y T. 2022. Estimation of Chlorophyll-a concentrations in small water bodies: comparison of fused Gaofer-6 and Sentinel-2 sensors. *Remote Sensing*, 14(1): 229 [DOI: 10.3390/rs14010229]
- Shi X H, Chen S G, Lin M S, Liu J Q, Ma C F, Song Q J, Xue C and Hu L B. 2023. Preliminary performance of the COCTS onboard HY-1D satellite in the global ocean. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(4): 943-952 (史鑫皓, 陈树果, 林明森, 刘建强, 马超飞, 宋庆君, 薛程, 胡连波. 2023. 中国海洋水色卫星传感器 COCTS HY-1D 产品初步评价. *遥感学报*, 27(4): 943-952) [DOI: 10.11834/jrs.20221666]
- Shimoda H. 1999. Adeos overview. *IEEE Transactions on Geoscience*

- and Remote Sensing, 37(3): 1465-1471 [DOI: 10.1109/TGRS.1999.763259]
- Smith M E, Robertson L and Bernard S. 2018. An optimized Chlorophyll a switching algorithm for MERIS and OLCI in phytoplankton-dominated waters. Remote Sensing of Environment, 215: 217-227 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.002]
- Sokolov A, Chami M, Dmitriev E and Khomenko G. 2010. Parameterization of volume scattering function of coastal waters based on the statistical approach. Optics Express, 18(5): 4615-4636 [DOI: 10.1364/OE.18.004615]
- Song Q J, Chen S G, Xue C, Lin M S, Du K P, Li S C, Ma C F, Tang J W, Liu J Q, Zhang T L and Huang X X. 2019. Vicarious calibration of COCTS-HY1C at visible and near-infrared bands for ocean color application. Optics Express, 27(20): A1615-A1626 [DOI: 10.1364/OE.27.0A1615]
- Song Q J, Ma C F, Liu J Q, Wang X X, Huang Y, Lin G Y and Li Z F. 2022. Time series analysis-based long-term onboard radiometric calibration coefficient correction and validation for the HY-1C satellite calibration spectrometer. Remote Sensing, 14(19): 4811 [DOI: 10.3390/rs14194811]
- Song Q J, Ma R H, Tang J W and Wang X M. 2008. Models of estimated total suspended matter concentration based on hyper-spectrum in Lake Taihu, in autumn. Journal of Lake Sciences, 20(2): 196-202 (宋庆君, 马荣华, 唐军武, 王晓梅. 2008. 秋季太湖悬浮物高光谱估算模型. 湖泊科学, 20(2): 196-202) [DOI: 10.18307/2008.0210]
- Spoto F, Sy O, Laberinti P, Martimort P, Fernandez V, Colin O, Horsersch B and Meygret A. 2012. Overview of Sentinel-2//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich: IEEE: 1707-1710 [DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351195]
- Starr D. 2011. NASA's aerosol-cloud-ecosystems (ACE) mission//Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment. Toronto: Optica Publishing Group [DOI: 10.1364/HISE.2011.HMA4]
- Stavros E N, Chrone J, Cawse-Nicholson K, Freeman A, Glenn N F, Guild L, Kokaly R, Lee C, Luvall J, Pavlick R, Poulter B, Schollaert U S, Serbin S, Thompson D R, Townsend P A, Turpie K, Yuen K, Thome K, Wang W L, Zareh S K, Nastal J, Bearden D, Miller C E and Schimel D. 2023. Designing an observing system to study the surface biology and geology (SBG) of the Earth in the 2020s. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 128(1): e2021JG006471 [DOI: 10.1029/2021JG006471]
- Suo Z Y, Li L, Lu Y C, Liu J Q, Ding J, Ju W M, Li M C, Yin D Y and Xu F F. 2023. Sun glint reflection facilitates performance of spaceborne UV sensor in oil spill detection. Optics Express, 31(9): 14651-14658 [DOI: 10.1364/OE.487625]
- Suo Z Y, Lu Y C, Liu J Q, Ding J, Yin D Y, Xu F F and Jiao J N. 2021. Ultraviolet remote sensing of marine oil spills: a new approach of Haiyang-1C satellite. Optics Express, 29(9): 13486-13495 [DOI: 10.1364/OE.423702]
- Tang J W, Chen G, Chen W B, Zhao C F, He Y, Wu S H, Liu B Y, Mao Z H, He H X, Yang J, Chen S G, Hu L B, He X D, Shi J L, Zheng Y C, Liu J Q, Lin M S, Wu L X, Guo H D, Jiang X W, Pan D L and Gu Y D. 2021. Three dimensional remote sensing for oceanography and the Guanlan ocean profiling Lidar. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 460-500 (唐军武, 陈戈, 陈卫标, 赵朝方, 贺岩, 吴松华, 刘秉义, 毛志华, 何惠馨, 杨杰, 陈树果, 胡连波, 何兴道, 史久林, 郑永超, 刘建强, 林明森, 吴立新, 郭华东, 蒋兴伟, 潘德炉, 顾逸东. 2021. 海洋三维遥感与海洋剖面激光雷达. 遥感学报, 25(1): 460-500) [DOI: 10.11834/jrs.20210495]
- Tang Y, Wei J, Huang X, Feng X and Song Q. 2019. Research on on-board calibration system of Tiangong-2 wide-band imaging spectrometer//Proceedings of the Tiangong-2 Remote Sensing Application Conference. Singapore: Springer: 28-39 [DOI: 10.1007/978-981-13-3501-3_3]
- Tassan S. 1994. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters. Applied Optics, 33(12): 2369-2378 [DOI: 10.1364/AO.33.002369]
- Tauro C B, Floreani R E, Godoy F E and Valvassori G. 2022. Advances in the algorithms for the generation of science products of the SABIA-Mar mission//2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON). San Juan: IEEE: 1-7 [DOI: 10.1109/ARGENCON55245.2022.9940002]
- Urabe T, Xiong X X, Hashiguchi T, Ando S, Okamura Y and Tanaka K. 2020. Radiometric model and inter-comparison results of the SGLI-VNR on-board calibration. Remote Sensing, 12(1): 69 [DOI: 10.3390/rs12010069]
- Wang C, Li Y C, Han J Y, Song Q J, Zhang K L, Zhu J and Wang L L. 2022. Simulation and in-orbit verification of passive lunar calibration timing for Chinese ocean color satellite//Proceedings Volume 12166, Seventh Asia Pacific Conference on Optics Manufacture and 2021. Hong Kong, China: SPIE: 662-670 [DOI: 10.1117/12.2615549]
- Wang M. 1999. Validation study of the SeaWiFS oxygen A-band absorption correction: comparing the retrieved cloud optical thicknesses from SeaWiFS measurements. Applied Optics, 38 (6):937-944.[doi: 10.1364/AO.38.000937].
- Wang M H. 2002. The Rayleigh lookup tables for the SeaWiFS data processing: accounting for the effects of ocean surface roughness. International Journal of Remote Sensing, 23(13): 2693-2702 [DOI: 10.1080/01431160110115591]
- Wang M H, Ahn J H, Jiang L D, Shi W, Son S, Park Y J and Ryu J H. 2013a. Ocean color products from the Korean Geostationary Ocean Color Imager (GOCI). Optics Express, 21(3): 3835-3849 [DOI: 10.1364/OE.21.003835]
- Wang M H, Liu X M, Tan L Q, Jiang L D, Son S, Shi W, Rausch K and

- Voss K. 2013b. Impacts of VIIRS SDR performance on ocean color products. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(18): 10347-10360 [DOI: 10.1002/jgrd.50793]
- Wang M H and Shi W. 2007. The NIR-SWIR combined atmospheric correction approach for MODIS ocean color data processing. *Optics Express*, 15(24): 15722-15733 [DOI: 10.1364/OE.15.015722]
- Wang M H, Son S and Shi W. 2009. Evaluation of MODIS SWIR and NIR-SWIR atmospheric correction algorithms using SeaBASS data. *Remote Sensing of Environment*, 113(3): 635-644 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.11.005]
- Werdell P J, Behrenfeld M J, Bontempi P S, Boss E, Cairns B, Davis G T, Franz B A, Gliese U B, Gorman E T, Hasekamp O, Knobel-spiesse K D, Mannino A, Martins J V, McClain C R, Meister G and Remer L A. 2019. The plankton, aerosol, cloud, ocean ecosystem mission: status, science, advances. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(9): 1775-1794 [DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0056.1]
- Wulder M A, Roy D P, Radeloff V C, Loveland T R, Anderson M C, Johnson D M, Healey S, Zhu Z, Scambos T A, Pahlevan N, Hansen M, Gorelick N, Crawford C J, Masek J G, Hermosilla T, White J C, Belward A S, Schaaf C, Woodcock C E, Huntington J L, Lymburner L, Hostert P, Gao F, Lyapustin A, Pekel J F, Strobl P and Cook B D. 2022. Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 280: 113195 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113195]
- Xiong X, Eplee R E, Sun J, Patt F S, Angal A and McClain C R. 2009. Characterization of MODIS and SeaWiFS solar diffuser on-orbit degradation//*Proceedings Volume 7452, Earth Observing Systems XIV*. San Diego: SPIE: 288-297 [DOI: 10.1117/12.824797]
- Xiong X X, King M D, Salomonson V V, Barnes W L, Wenny B N, Angal A, Wu A S, Madhavan S and Link D O. 2015. Moderate resolution imaging spectroradiometer on terra and aqua missions// Qian S E, ed. *Optical Payloads for Space Missions*. London: John Wiley and Sons: 53-89 [DOI: 10.1002/9781118945179.ch3]
- Xu H Y, Huang W X, Si X L, Li X, Xu W W, Zhang L M, Song Q J and Gao H T. 2022. Onboard spectral calibration and validation of the satellite calibration spectrometer on HY-1C. *Optics Express*, 30(15): 27645-27661 [DOI: 10.1364/oe.460133]
- Xu H Y, Huang W X, Si X L, Song Q J, Li X, Xu W W, Ma Y and Zhang L M. 2023. Radiometric cross-calibration of Sentinel-2B MSI with HY-1C SCS based on the near simultaneous imaging of common ground targets. *Optics Express*, 31(3): 3619-3637 [DOI: 10.1364/OE.479445]
- Xu H Y, Zhang L M, Huang W X, Li X, Si X L, Xu W W and Song Q J. 2020. On-board absolute radiometric calibration and validation based on solar diffuser of HY-1C SCS. *Acta Optica Sinica*, 40(9): 0928002 (许和鱼, 张黎明, 黄文薪, 李鑫, 司孝龙, 徐伟伟, 宋庆君. 2020. 基于HY-1C SCS太阳漫反射板的星上绝对辐射定标与验证. *光学学报*, 40(9): 0928002) [DOI: 10.3788/aos202040.0928002]
- Xu H Y, Zhang L M, Huang W X, Xu W W, Si X L, Chen H Y, Li X and Song Q J. 2020. Onboard absolute radiometric calibration and validation of the satellite calibration spectrometer on HY-1C. *Optics Express*, 28(20): 30015-30034 [DOI: 10.1364/OE.402616]
- Ye X M, Liu J Q, Lin M S, Ding J, Zou B and Song Q J. 2021. Global ocean chlorophyll-a concentrations derived from COCTS onboard the HY-1C satellite and their preliminary evaluation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(12): 9914-9926 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3036963]
- Ye X M, Liu J Q, Lin M S, Ding J, Zou B, Song Q J and Teng Y. 2022. Evaluation of sea surface temperatures derived from the HY-1D satellite. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15: 654-665 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3137230]
- Yin Z Y and Lu Y C. 2025. Optical quantification of wind-wave breaking and regional variations in different offshore seas using Landsat-8 OLI images. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130(1): e2024JD041764 [DOI: 10.1029/2024JD041764]
- Zeng T, Liu J Q and Xie C H. 2008. Correction to the image rotation of "HY-1A" COCTS images. *Acta Oceanologica Sinica*, 30(1): 47-50 (曾韬, 刘建强, 谢春华. 2008. "HY-1A"卫星海洋水色扫描仪像旋转图像校正处理. *海洋学报*, 30(1): 47-50) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-4193.2008.01.006]
- Zhang M M, Chen F and Tian B S. 2018. Glacial lake detection from GaoFen-2 multispectral imagery using an integrated nonlocal active contour approach: a case study of the Altai Mountains, Northern Xinjiang Province. *Water*, 10(4): 455 [DOI: 10.3390/w10040455]
- Zhao B, Lu Y, Ding J, Jiao J and Tian Q. 2022. Discrimination of Oceanic Whitecaps Derived by Sea Surface Wind Using Sentinel-2 MSI Images. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127 (11): e2021JC018208.[doi: 10.1029/2021JC018208]
- Zhou Q, Liu J Q, Wang J R, Deng S Q and Tian L Q. 2020. Water turbidity monitoring of Zhiyin and Huangjia Lakes in Wuhan for COVID-19 epidemic using HY-1C CZI data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 45(5): 676-681 (周屈, 刘建强, 王剑茹, 邓实权, 田礼乔. 2020. 利用HY-1C卫星CZI数据在COVID-19疫情期间武汉知音湖和黄家湖的浊度监测研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 45(5): 676-681) [DOI: 10.13203/j.whugis20200101]
- Zhou Y, Lu Y C, Shen Y F, Ding J, Zhang M W and Mao Z H. 2020. Polarized remote inversion of the refractive index of marine spilled oil from PARASOL images under sunglint. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(4): 2710-2719 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2953640]
- Zibordi G, Mélin F and Berthon J F. 2006. Comparison of SeaWiFS, MODIS and MERIS radiometric products at a coastal site. *Geophysical Research Letters*, 33(6): L06617 [DOI: 10.1029/2006GL025778]

Advances in ocean color observation satellite technology

SONG Qingjun¹, MA Chaofei¹, LIN Mingsen¹, JIANG Xingwei¹, WANG Lili², XU Pengmei³,
TANG Junwu⁴, CHEN Peng⁵, LU Yingcheng⁶, WEI Jun⁷, ZHANG Keli³

1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China;

2. DFH Satellite Co. , Ltd, Beijing 100094, China;

3. Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China;

4. Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China;

5. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China;

6. Nanjing University, Nanjing 210023, China;

7. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract: Based on the global demand for ocean color climate change, this paper reviews the development process of ocean color remote sensors in the past 50 years, sorts out the deployment and scientific objectives of ocean color remote sensors in earth observation missions in various countries, expounds the advantages and disadvantages of the current imaging systems of each remote sensor, and analyzes the historical evolution and technical constraints of remote sensor channel selection. According to the spatiotemporal coverage requirements of global observation, the design objectives of the current payload resolution and width are clarified, and the technical means of on-orbit calibration of ocean color remote sensors are listed and the importance of each means is analyzed. According to the list of remote sensors that have been launched and planned to be launched by countries in the past and next decade, the focus of countries' attention to global changes and coastal disasters is given. Combined with the development history of China's ocean color observation satellites, this paper clarifies the direction of technological breakthroughs in various countries to cope with ocean color climate change, and gives suggestions on the technical route of China's ocean color remote sensing and the idea of China's breakthrough in the field of innovation..

Key words: ocean color remote sensing, on-orbit calibration, marine observation satellite, channel selection, imaging system, load configuration

Supported by Civil Space Technology Advance Research Project of China (No. D010202); National Natural Science Foundation of China (No. 42176183, 42371380)