

海洋水色卫星的发展现状及趋势

王丽丽 赵鸿志 张可立

(航天东方红卫星有限公司,北京 100094)

摘要 经过数十年的发展,中国海洋卫星及海洋遥感应应用取得了显著成绩,在中国海洋信息服务保障中发挥了重大作用。文章首先研究了国际海洋水色卫星/载荷的发展,分析了当前及未来一段时间内海洋水色卫星的发展趋势,给出了中国未来发展海洋水色观测卫星的启示;然后,回顾了海洋水色卫星的发展历程,重点分析了在海洋水色精细化观测中存在的不足;最后,结合未来海洋水色卫星的发展启示以及中国海洋水色精细化观测中的不足,提出了中国下一代海洋水色卫星的发展建议,可以作为中国未来发展海洋水色卫星的参考。

关键词 海洋水色;卫星;遥感;精细化观测;技术指标

中图分类号:V474 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1673-8748.2021.06.005

Current Status and Developing Trends of Ocean Color Satellites

WANG Lili ZHAO Hongzhi ZHANG Keli
(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: After several decades of development, remarkable achievements have been made to China's marine satellites and corresponding remote sensing applications. Satellite remote sensing has been playing an important role in China's marine information services. Firstly, the development trend of international ocean color satellites is analyzed through the research on the development course of international ocean color satellites or payloads. Secondly, the development course of ocean color satellites in China is reviewed. Thirdly, to gain an insight into future development strategy of ocean color satellites, the shortcomings in the fine observation of ocean color is focused on. Finally, the development suggestions of China's next generation ocean color satellites are put forward, which could be used as a reference for China's future development of ocean color satellites.

Key words: ocean color; satellite; remote sensing; fine observation; technical specification

海洋约占地球表面积的71%,是生命的摇篮、资源的宝库、交通的命脉、战略的要地。中国既是陆地大国,也是海洋大国,拥有漫长的海岸线、广袤的管辖海域和丰富的海洋资源,拥有广泛的海洋战略利益。

航天遥感技术的大力发展使其成为全球海洋信息获取与服务的最重要手段。经过数十年的发展,中国海洋卫星遥感技术取得了显著成果。截至目前,中国已先后成功发射了海洋一号系列4颗海洋

水色遥感卫星^[1-10],形成了在轨业务化运行能力。当前正开展的新一代海洋水色卫星的研制,其功能及性能将达到或接近国家极轨卫星伙伴计划(National Polar-orbiting Partnership, NPP,发射后更名为Suomi NPP)配置的可见近红外成像辐射计(Visible/Infrared Imager and Radiometer Suite, VIIRS)、哨兵3A/B卫星(Sentinel-3A/B)配置的海洋与陆地彩色成像光谱仪(Ocean and Land Color

收稿日期:2021-11-02;修回日期:2021-11-23

作者简介:王丽丽,女,研究员,海洋水色系列卫星总师兼总指挥,研究方向为海洋遥感卫星总体设计。Email: 13911110070@163.com。

Instrument, OLCI)等国际同类水色遥感器的水平,将在中国海洋信息服务保障中发挥更大的作用。

但应该看到,随着人类对海洋认知的不断深入以及中国国民经济的高速发展,当前中国海洋水色卫星技术指标及应用效能与未来的应用需求还存在一定的差距。因此,在新时代海洋强国建设进程中,应紧紧围绕海洋应用需求,大力发展中国海洋水色卫星,补齐海洋环境探测手段不足的短板,增强卫星遥感对海洋环境要素的探测能力,服务于海洋强国建设的国家战略。本文通过梳理国内外海洋水色卫

星/载荷的发展现状,分析未来海洋水色卫星的发展趋势,为中国发展下一代海洋水色卫星发展提出建议。

1 国际海洋水色卫星发展情况

1.1 发展现状

从 20 世纪 70 年代开始,全球共发射海洋水色遥感卫星(载荷)20 多颗^[4,11-12],典型技术指标如表 1 所示。

表 1 国外典型海洋水色卫星/载荷指标比较

Table 1 Comparison of typical ocean color spacecraft and payloads in the world

卫星	国家	发射日期	水色 传感器	分辨率/m	幅宽 /km	光谱 范围/nm	谱段数	水色谱段 带宽/nm	水色谱段 信噪比
OrbView-2	美国	1997	SeaWiFS	1100	2806	402~885	8	20~40	442~674
Terra/Aqua	美国	1999/2002	MODIS	250/500/1000	2330	405~14 385	36(水色 9)	10~20	516~1087
Suomi NPP/ NOAA-20	美国	2011/2017	VIIRS	375/700	3000	402~12 488	22	15~20	164~739
PACE	美国	预计 2023	OCI	1000	2663	342.5~2260	可见近红:109 短波红外:7	5	—
SENTINEL-3A/B	欧洲	2016/2018	OLCI	300	1270	403~1040	21(水色 16)	7.5~20	大于 600
GCOM-C1	日本	2017	SGLI	250/1000	1600	380~868.5	13	8~20	200~400
COMS-1	韩国	2010	GOCI	500	2500×2500	392~905	8	10~40	大于 1000
KOMPSAT-2B	韩国	2020	新一代 GOCI	250	2500×2500	370~1280	可见近红:12 宽谱段:1	10~40	大于 1000

根据卫星(载荷)发射时间及水色遥感应应用情况,基本可以分为三个阶段。

(1)第一阶段(探索应用阶段):以 1978 年发射的云雨-7 卫星(Nimbus-7)为代表,是世界第一代水色观测卫星,开始海洋水色探测及应用研究,首次实现了对海洋水色要素的探测,推动了国际海洋水色遥感的发展。

(2)第二阶段(初步应用阶段):以 1997 年美国发射的第一颗专用海洋水色观测卫星轨道观测 2 号卫星(OrbView-2)配置的海洋宽视场传感器(Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor, SeaWiFS)、1999 年和 2002 年分别发射的美国土卫星(Terra)和水卫星(Aqua)上配置的中等分辨率成像光谱辐射计(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)、2002 年欧洲发射的环境卫星(Environmental Satellite, Envisat)卫星上配置的中等分辨率成像光谱仪(Medium Resolution Imaging Spectrometer, MERIS)为代表的第二代水色观测卫星(载荷),在谱段范围、光谱分辨率、信噪比等指标有一定提升,开启了国际水色遥感业务化应用时代。

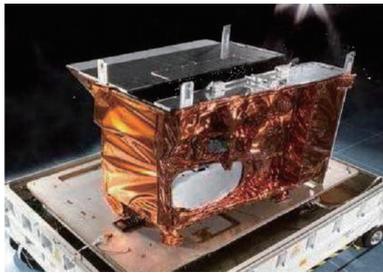
(3)第三阶段(精细化应用阶段):以美国 2011 年发射的 Suomi NPP 卫星(见图 1(a))和 2017 年发射的联合极轨卫星系统 1 号(Joint Polar Satellite System-1, JPSS-1)卫星配置的 VIIRS(见图 1(b))、欧洲 2016 年和 2018 年分别发射的 Sentinel-3A 卫星和 Sentinel-3B 卫星(见图 2(a))配置的 OLCI(见图 2(b))为代表的第三代海洋水色观测卫星(载荷),是当前国际海洋水色观测的主流,实现了水色遥感的精细化应用。

根据当前国际海洋水色观测计划,未来 5~10 年仍然以第三代海洋水色观测卫星(载荷)为主,美国 NPP 计划中规划的 JPSS-2(预计 2022 年发射)、JPSS-3(预计 2027 年发射)、JPSS-4(预计 2032 年发射)3 颗卫星仍然以当前的 VIIRS 载荷作为未来海洋水色观测主载荷接续当前海洋水色观测任务。预计 2023 年发射的浮游生物-气溶胶-云-海洋生态系统卫星(Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem, PACE)配置的海洋水色光谱仪(Ocean Color Instrument, OCI)载荷也只是对 MODIS 和 VIIRS 等载荷的延续,将光谱分辨率提升到 5 nm 的水平。同时,欧洲规划的 Sentinel-3 后

续系列卫星仍然以 OLCI 为海洋水色观测主载荷。

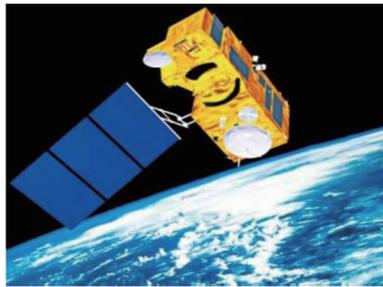


(a) SuomiNPP卫星

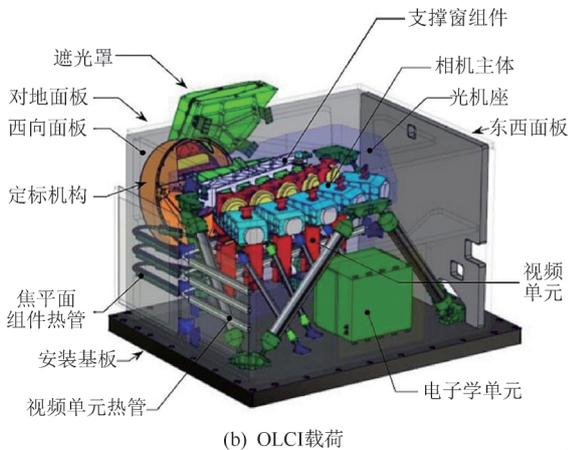


(b) VIIRS载荷

图 1 SuomiNPP 卫星及其配置的 VIIRS 载荷
Fig 1 SuomiNPP satellite and its VIIRS instrument



(a) Sentinel-3A/B卫星



(b) OLCI载荷

图 2 Sentinel-3A/B 卫星及其配置的 OLCI 载荷
Fig 2 Sentinel-3A/B satellite and its OLCI instrument

1.2 发展趋势分析

纵观国际海洋水色探测卫星(载荷)的发展规律,

可以发现国际海洋水色遥感的发展具有如下趋势。

1) 形成持续稳定的观测体系

海洋观测是一项长期任务,通过长期、连续的观测来发现海洋变化的规律,最终服务于海洋研究及应用。国际上注重观测体系的顶层设计,通过制定长远的发展计划,建立全球性、立体、多维度的综合海洋观测体系,注重观测数据的持续性,实现多种海洋卫星联合观测和持续稳定运行。

2) 海洋水色观测由综合型观测卫星向专用的观测卫星发展

早期的海洋水色观测,通常将水色载荷与其他载荷装配在同一卫星上进行观测,如 MODIS 搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上。但随着海洋水色观测要素的增多,海洋水色观测任务越来越复杂,目前大多发展专用的海洋卫星,如 Sentinel-3A/B、全球变化观测任务-气候 1 卫星(Global Change Observation Mission-Climate 1, GCOM-C1)、PACE 等,进一步提升海洋观测业务能力。

3) 海洋水色观测已由传统的海洋水色要素观测逐渐向海洋光学环境要素的精细化观测过渡

在已发射的海洋水色观测遥感器中,空间分辨率越来越高,由典型的 1.1 km(SeaWiFS)提高到 250 m(新一代地球静止海洋水色成像仪(Geostationary Ocean Color Imager, GOCI))的观测能力;谱段范围由传统的可见近红外谱段扩展到紫外到热红外全谱段,谱段数由最初的 8 个(SeaWiFS)谱段发展到数十个(VIIRS 有 22 个),光谱带宽越来越窄,由典型的 20~40 nm 发展到 7.5~20 nm 的精细光谱,而正在研制的 PACE/OCI 为带宽 5 nm 的光谱成像仪;信噪比由典型的 500 提高到 1000。空间分辨率、光谱分辨率、信噪比等性能指标的提升,伴随光谱分辨率的大幅提高,使得海洋水色探测能力向精细化方向迈进。此外,由于谱段范围越来越宽带来的好处就是观测手段就越来越丰富,尤其是一些新发展水色探测卫星/载荷补充了偏振第二代全球成像仪(Second generation Global Imager, SGLI)、夜光(VIIRS)等新型探测手段,海洋水色探测已由传统的水色探测拓展到水色水温、水体透明度、藻类辨识、浮游生物等海洋环境要素探测,并正向更广阔的应用领域(如海洋溢油)发展。

4) 卫星重访周期进一步缩短,覆盖范围由局部海域变为全球海洋

四维动态变化的海洋监测要求卫星重访周期要短,一般都在 1~3 天以内,随着静止轨道卫星和星

座组网在海洋水色观测中的应用,对特定区域的重访周期将甚至提高到 1 天多次,观测覆盖范围也由局部海域变为全球大洋。

2 中国海洋水色卫星发展情况

2.1 发展现状

中国海洋卫星发展起步较晚,2000 年 11 月发布的《中国的航天》白皮书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 5 月 15 日成功发射了中国第一颗海洋卫星——海洋一号(HY-1A)卫星,也是第一颗海洋水色观测卫星,实现了中国海洋卫星零的突破,开启了

国产化海洋水色探测和应用研究的序幕。2007 年 4 月 11 日成功发射的中国第二颗海洋卫星——海洋一号 B(HY-1B)卫星实现了海洋水色遥感卫星由试验型向业务服务型的过渡。2018 年和 2020 年分别发射的海洋一号 03(HY-1C)卫星和海洋一号 04(HY-1D)卫星两颗水色卫星在 HY-1A/B 卫星基础上进行了功能、性能升级,在轨组网形成了中国首个海洋水色业务卫星星座,实现了对全球大洋和中国近海近岸等重点区域的高精度、高频次监测。HY-1A/B/C/D 系列卫星为中国第一代海洋水色遥感专用卫星,主要技术指标与 SeaWiFS、MODIS 等国际第二代水色卫星(载荷)相近,具体如表 2 所示,形成了中国国产化水色遥感业务体系。

表 2 中国第一代海洋水色卫星与国际第二代水色卫星/载荷比较情况

Table 2 Comparison of ocean color spacecraft and payloads between the 1st generation in China and the 2nd generation in the world

卫星	发射时间	主要载荷	光谱范围/ μm	谱段设置	分辨率/m	幅宽/km
SeaStar	1997 年	SeaWiFS	0.402~0.855	8 个可见近红外,带宽 15~20 nm	1100	2806
Terra/Aqua	1997 年/2002 年	MODIS	0.405~0.877(海洋水色)	9 个可见近红外,带宽 10~15 nm	1000	2330
Envisat-1	2002 年	MERIS	0.407~0.905	15 个可见近红外,带宽 10~20 nm	300/1200	1150
HY-1A/B	2002 年/2007 年	水色水温扫描仪	0.402~12.50	8 个可见近红外(带宽 20~40 nm)+ 2 个中长波红外	1100	A 星:1600 B 星:3000
		海岸带成像仪	A 星:0.42~0.89 B 星:0.43~0.69	4 个多光谱	250	500
HY-1C/D	2018 年/2020 年	水色水温扫描仪	0.402~12.50	8 个紫外可见近红外+2 个中长波 红外	1100	3000
		海岸带成像仪	0.42~0.89	4 个多光谱	50	950
		紫外成像仪	0.345~0.395	2 个	550/1100	3000

中国海洋水色卫星的发展历程如图 3 所示。当前中国正开展以新一代海洋水色卫星为代表的第二代海洋水色卫星的研制工作,其是在中国第一代海洋水色卫星的基础上进一步提升海洋水色探测精

度,主要技术指标与 VIIRS、OLCI 等国际第三代海洋水色卫星(载荷)技术指标相当(如表 3 所示),将使中国海洋水色遥感实现从“跟跑者”向“并跑者”角色的转变。

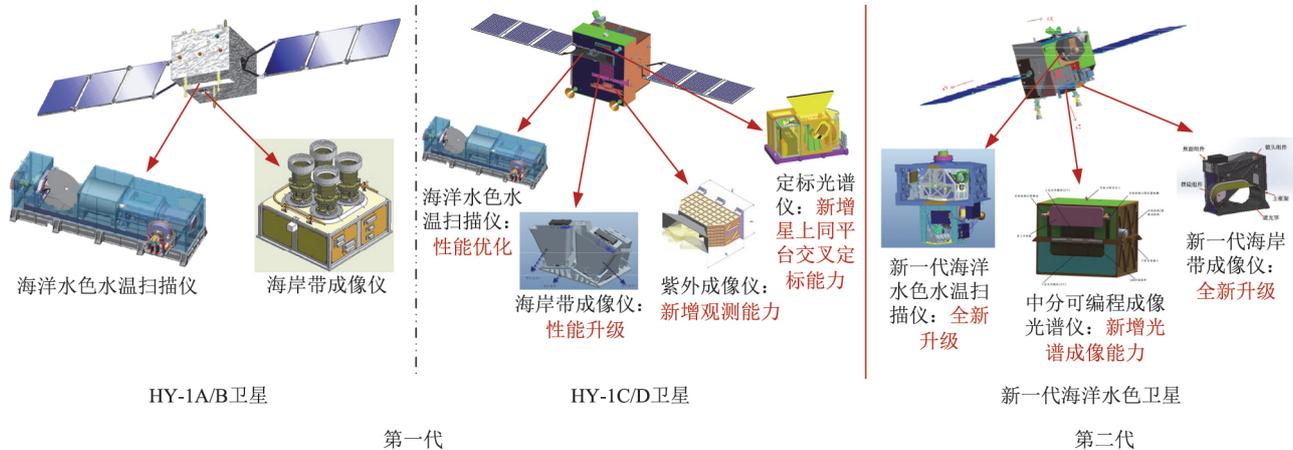


图 3 中国海洋水色卫星发展历程

Fig 3 Development course of China's ocean color satellites

表 3 中国第二代海洋水色卫星与国际第三代水色卫星/载荷比较情况

Table 3 Comparison of ocean color spacecraft and payloads between the 2nd generation in China and the 3rd generation in the world

卫星	Sentinel-3A/B	Suomi NPP/JPSS-1	中国新一代海洋水色卫星		
载荷	OLCI	VIIRS	水色水温扫描仪	海岸带成像仪	中分光谱仪
分辨率/m	300	375/750	≤500	全色: ≤5 多光谱: ≤20	≤100
幅宽/km	1270	3000	≥3000	有效: ≥60 可视: ≥950	≥950
光谱范围/μm	0.403~1.04	0.4~12.5	0.35~12.5	0.40~1.04	0.35~2.5
谱段数	21个可见近红外, 其中16个用于水色观测	22个(可见近红外9个+短波红外5个+中波红外3个+热红外4个+夜光1个)	18个辐射谱段	1全色+8多光谱	可见近红外15个+短波红外4个
光谱分辨率/nm	大部分在7.5~20之间	可见近红外: 18~50; 短波红外: 15~60	紫外、可见近红外: 15~40; 短波红外: 40~80	多光谱 40~180	可见近红外: 10~40; 短波红外: 20~50
信噪比/噪声等效温差 (NEΔT)	0.4~0.625 μm 之间的7个均大于1000 K; 除了4个近红外及2个特殊谱段外, 其他均在600~900 K之间	可见近红外: 164~739 K; 短波红外: 122~463 K; 中红外: 0.058~0.549 K; 热红外: 0.029~0.414 K	紫外和可见近红外(除2个近红外): >1000 K; 短波红外: ≥180 K; 中/长波红外: ≤0.1 K	0.4~0.7 μm 间优于300 K, 其余优于200 K	0.4~0.65 μm 之间的优于500 K, 其余<500 K

2.2 存在的不足

随着中国国民经济高速发展,对海洋水色精细化、快速化、常态化的观测需求越来越高,海洋水色观测效益日益凸显。然而,随着观测需求的不断提高^[13-15],受当前水色探测技术发展的局限,现有海洋水色卫星不能完全满足精细化探测需求,具体表现如下。

1) 信噪比需要进一步提高

由于海洋水色观测主要是针对水体目标,为了能有效反演水体光学特性参数必须要求观测数据有高信噪比,尤其是要实现精细化观测,对信噪比的要求更高。如当前国际主流的 OLCI 载荷^[16-18],水色观测主要谱段在 300 m 空间分辨率、光谱带宽 10 nm 的情况下,能够实现信噪比大于 1000 的观测能力,部分谱段信噪比甚至超过 2000,具体如表 4 所示。中国第一代海洋水色卫星上配置的海洋水色水温扫描仪信噪比一般在 300~500,与其空间分辨率相当的 MODIS 载荷相比(MODIS 主要谱段信噪比如表 5 所示),也存在较大的差距。当前正研发的第二代海洋水色卫星上配置的水色水温扫描仪伴随大量技术革新,能够实现信噪比大于 1000 的观测能力,但是分辨率比 OLCI 低约 1 倍,光谱带宽近似为 OLCI 对应谱段的 2.7 倍。因此,在高信噪比观测能力上与 OLCI 还是存在一定的差距。

表 4 OLCI 载荷主要水色谱段信噪比

Table 4 Signal-to-noise ratio of typical spectral bands for OLCI instrument

波段号	中心波长/nm	带宽/nm	信噪比(典型条件)
Oa1	400	10	2188
Oa2	412.5	10	2061
Oa3	442.5	10	1811
Oa4	490	10	1541
Oa5	510	10	1488
Oa6	560	10	1280
Oa7	620	10	997
Oa8	665	10	883
Oa9	673.75	7.5	707
Oa10	681.25	7.5	745
Oa11	708.25	10	785
Oa12	753.75	7.5	605

表 5 MODIS 载荷主要水色谱段信噪比

Table 5 Signal-to-noise ratio of ocean color bands for MODIS instrument

波段号	光谱范围/μm	信噪比(典型条件)
8	0.405~0.420	880
9	0.438~0.448	838
10	0.483~0.493	802
11	0.526~0.536	754
12	0.546~0.556	750
13	0.662~0.672	910
14	0.673~0.683	1087
15	0.743~0.753	586
16	0.862~0.877	516

2) 光谱带宽需要进一步优化

从水体光谱的响应特性可以看到,水体反射率随波长变化较为平缓,响应特征峰对应谱段带宽较窄,主要谱段带宽在 5~10 nm 左右。为精细分辨出这些特征,要求水色载荷观测谱段设计时必须考虑水体响应特征谱段^[19-20],只有带宽较窄的情况下才能够识别出相应水体的光学特性。例如,国际第二代水色载荷 MODIS 海洋观测谱段光谱带宽基本在 10 nm,当前国际上典型的 OLCI 载荷主要水色观测谱段带宽在 7.5~10 nm,美国即将发射的 PACE 卫星上配置的 OCI 载荷为成像光谱仪,光谱带宽为 5 nm。中国第一代海洋水色卫星上配置的海洋水色水温扫描仪主要水色观测谱段的光谱带宽均在 20 nm,正研发的第二代海洋水色卫星上配置的水色水温扫描仪水色观测谱段的光谱带宽一般在 15~20 nm。因此,针对精细化水色观测需求,在光谱带宽设置上还需要进一步提升水色光谱的分辨能力。

3) 探测谱段需要进一步丰富

随着人类对海洋认知的加深,传统水色产品服务外的新的用户需求不断增加。因此,除了传统的水色探测谱段外,还需要针对新的应用需求增加相应的探测谱段和探测能力。例如,OLCI 载荷在 MERIS 载荷^[21]的基础上,增加了 673 nm 通道用于叶绿素荧光测量,增加 764.4 nm 和 767.5 nm 两个氧气吸收谱线和 940 nm 的水汽吸收谱段用于提高云层厚度的反演,增加 1.02 μm 的谱段用于提升近岸水体大气和气溶胶校正的能力。另外,当前国际上广泛使用的海洋水色载荷 VIIRS 增加高灵敏度的日夜观测谱段(Day night band, DNB)以满足夜间海洋观测应用需求^[22]。此外,日本的 SGLI 载荷为了反演全球气溶胶分布,增加了 2 个三方向的偏振谱段。同时,相关研究表明,可见光偏振在海面溢油检测以及油种区分方面展现出的潜力使其成为未来海洋观测需要重点关注的手段^[23-24]。对于中国海洋水色卫星而言,目前仍然以海洋水色水温观测为主,大气校正通道不丰富,尤其是针对近岸水体大气校正^[25-30],针对新的应用需求的探测手段稍显不足。

4) 海洋水色观测空间尺度需进一步提升

海洋每天都发生着各种尺度的海洋现象。为了研究各种海洋现象,需要开展精细化监测。对于海洋水色环境研究,需要进行中小尺度的观测。以美国典型的海洋水色载荷 VIIRS 为例^[31-32],其水色空间分辨率为 375 m,水温空间分辨率为 750 m;而欧

洲的典型水色载荷 OLCI 空间分辨率达到 300 m。当前,中国海洋水色观测仍以大中尺度海洋现象为主,空间分辨率一般在 1 km 左右,即使在新一代海洋水色卫星中提升到 500 m,但与海岸带等区域的精细化监测需求仍有较大的差距。

5) 重访能力需要进一步提高

海洋是动态变化的水体,海洋水色环境也不断地发生着变化。因此,对海洋水色环境的观测需要高频次的观测能力。以美国 JPSS 计划为例,VIIRS 单个载荷幅宽在 3000 km,单颗卫星可以实现 1 天 1 次的全球覆盖,在 SuomiNPP、JPSS-1 两星组网运行后可以实现 1 天 2 次的重访能力,如果考虑到跟美国的国防气象卫星计划(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)、欧洲的气象卫星运行计划(Meteorological Operational Satellite Program of Europe, MetOp)组网运行,将能够实现每天 3 个不同时间段多次的全球覆盖能力。中国目前在轨的 HY-1C/D 卫星,双星组网可实现 1 天 2 次的全球覆盖能力,基本能够满足用户对全球大洋的观测需求。但对于中国海岸带区域,由于海岸带成像仪幅宽相对偏窄,导致对近海等重点关注区域只能 1 天 1 次的重访能力,需要更高频次的重访能力来满足海岸带区域的监测需求。

3 中国下一代海洋水色卫星发展建议

纵观中国海洋水色卫星的发展历程可以看出,中国海洋水色卫星的发展与国际发展趋势基本一致,但在具体发展中又按照中国海洋遥感应用特色不断推进,即按照大洋和海岸带不同探测区域的目标特性设计与观测需求相适应的载荷,如海洋水色水温扫描仪主要针对全球大洋水色水温观测,而海岸带成像仪主要针对海岸带等重点区域进行观测。

根据国家总体规划,中国将发展海洋水色卫星、海洋动力环境卫星和海洋监视监测卫星的三大系列海洋卫星,逐步形成以中国为主导的海洋空间监测网^[4-7]。结合国际海洋水色卫星的发展趋势,根据当前中国海洋强国建设的背景和未来需求,对下一代海洋水色卫星的发展建议如下。

(1) 下一代海洋水色卫星应该接续中国第二代海洋水色观测卫星,继续发展专用的海洋水色卫星来维持保持我国海洋水色卫星的观测体系,保持对海洋水色环境等要素长期、连续、稳定的观测能力。

(2) 继续按照中国特色的海洋水色遥感发展思

路推进,在关注全球大洋的同时,重点关注中国近海近岸、大江大河、大湖等不同区域的水体特征,着重服务于海洋强国建设需要。

(3)下一代海洋水色卫星要以满足精细化观测需求为驱动,需要发展具备高信噪比、窄光谱带宽、多观测谱段、高空间分辨率的海洋水色观测载荷/卫星,实现从传统海洋水色水温观测向海洋光学环境要素探测拓展;同时,针对新兴应用需求,应考虑增加偏振、夜光等探测手段来提升探测能力,实现中国海洋水色遥感从“并跑”到“领跑”的跨越。

(4)为了提高对海洋水色观测的时效性,应充分发挥小卫星低成本、快速研制的优势,在轨采用多星组网实现对全球大洋以及海岸带等重点区域的快速覆盖和高频次重访。

参考文献 (References)

- [1] 王丽丽. 小卫星在海洋遥感应用中的发展与贡献[C]// 2011 年小卫星技术交流会论文集. 北京:中国宇航学会,2011:1-12
Wang Lili. Small satellite progress in ocean color remote sensing and applications [C]// Proceedings of 2015 Small Satellite Technology Symposium. Beijing, Chinese Society of Astronautics, 2011:1-12 (in Chinese)
- [2] 张可立,白照广,王丽丽. 我国海洋水色卫星发展回顾、现状及展望[J]. 卫星应用,2018(5):24-27
Zhang Keli, Bai Zhaoguang, Wang Lili. Development history and prospect of China's ocean color satellites [J]. Satellite Applications, 2018(5):24-27 (in Chinese)
- [3] 白照广,李一凡,杨文涛. 中国海洋卫星技术成就与展望[J]. 航天器工程,2008,17(4):17-23
Bai Zhaoguang Li Yifan Yang Wentao. Achievements and prospect of China ocean satellite technology [J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(4):17-23 (in Chinese)
- [4] 林明森,何贤强,贾永君,等. 中国海洋卫星遥感技术进展[J]. 海洋学报,2019,41(10):99-112
Lin Mingsen, He Xianqiang, Jia Yongjun, et al. Advances in marine satellite remote sensing technology in China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 41(10):99-112(in Chinese)
- [5] 林明森,张有广,袁欣哲. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望[J]. 海洋学报(中文版),2015,37(1):1-10
Lin Mingsen, Zhang Youguang, Yuan Xinzhe. The development course and trend of ocean remote sensing satellite [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(1):1-10(in Chinese)
- [6] 贾永君,林明森,张有广. 自主海洋卫星遥感技术进展与发展方向[J]. 海洋技术学报,2015,34(3):21-25
Jia Yongjun, Lin Mingsen, Zhang Youguang. Progress and development orientation of independent oceanic satellite remote sensing technology in China [J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 37(1):21-25(in Chinese)
- [7] 蒋兴伟,刘建强,林明森. 我国卫星海洋空间探测[J]. 中国工程科学,2008,10(6):56-62
Jiang Xingwei, Liu Jianqiang, Lin Mingsen. Satellite ocean exploration of space in China [J]. Engineering Science, 2008, 10(6):56-62(in Chinese)
- [8] 贺明霞,贺双颜,王云飞,等. 中国卫星海洋观测系统及其传感器(1988—2025)[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2011,41(12):91-103
He Mingxia, He Shuangyan, Wang Yunfei, et al. Chinese spaceborne ocean observing systems and onboard sensors (1988—2025) [J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(12):91-103(in Chinese)
- [9] 杨保华. 构建中国海洋卫星体系提升海洋环境与灾害监测能力[J]. 中国空间科学技术,2011(5):1-8
Yang Baohua. Constructing China's ocean satellite system to enhance the capability of ocean environment and disaster monitoring [J]. Chinese Space Science and Technology, 2011(5):1-8(in Chinese)
- [10] 李科,张靓,魏兰,等. 海洋卫星军民融合发展现状及几点思考[J]. 海洋测绘,2018,38(3):78-82
Li Ke, Zhang Liang, Wei Lan, et al. Thoughts on the developing status of seasat civil-military integration [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2018, 38(3):78-82(in Chinese)
- [11] 陈双,刘韬. 国外海洋卫星发展综述[J]. 国际太空,2014,427(7):29-36
Chen Shuang, Liu Tao. Review of international marine satellites [J]. Space International, 2014, 427(7):29-36 (in Chinese)
- [12] 汪文杰,贾东宁,许佳立,等. 全球海洋遥感卫星发展综述[J]. 测绘通报,2020(5):1-6
Wang Wenjie, Jia Dongning, Xu Jiali, et al. Review of the development of global marine remote sensing satellite [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(5):1-6(in Chinese)
- [13] C R Mc Clain, G Meister. Mission requirements for future ocean-colour sensors, in Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group [R]. Dartmouth, Canada: IOCCG, 2012
- [14] Qi L, Z Lee, C Hu, et al. Requirement of minimal signal-to-noise ratios of ocean colorsensors and uncertainties of ocean color products [J]. Geophys. Res. Oceans, 2017, 122(10):1-17
- [15] Chuanmin Hu, Lian Feng, Zhongping Lee, et al. Dy-

- dynamic range and sensitivity requirements of satellite ocean color sensors: learning from the past[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6045-6062
- [16] Donlon C, Berruti B, Buongiorno A, et al. The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 37-57
- [17] Berruti B, Mavrocordatos C. The Sentinel-3 Mission [C]// *Proceedings of the ESA Living Planet Symposium*. Paris: ESA, 2010
- [18] Klein U, Berruti B, Borde F, et al. Sentinel-3 payload overview[J]// *Proc. of SPIE*, 2009, 7474: 747405
- [19] Tao Z, Lv T T, Zhou X, et al. Monitoring of sinking flux of ocean particulate organic carbon using remote sensing methods[C]// *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. New York: IEEE, 2016
- [20] 邵连军, 张红雷, 杨静飞, 等. 气象及海洋卫星遥感信息核心元数据研究[J]. *遥感信息*, 2015, 30(4): 104-108
Shao Lianjun, Zhang Honglei, Yang Jingfei, et al. Core metadata for remote sensing data of meteorological and oceanic satellite [J]. *Remote Sensing Information*, 2015, 30(4): 104-108 (in Chinese)
- [21] Cui Tingwei, Zhang Jie, Groom S, et al. Validation of MERIS ocean-color products in the Bohai Sea: a case study for turbid coastal waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10): 2326-2336
- [22] 伍亿真, 施开放, 余柏菡. 利用 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据分析城市蔓延对雾霾污染的影响[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(5): 208-237
Wu Yizhen, Shi Kaifang, Yu Bolang. Analysis of the impact of urban sprawl on haze pollution based on the NPP-VIIRS nighttime light remote sensing data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(5): 208-237 (in Chinese)
- [23] 李英超, 刘嘉楠, 史浩东. 基于偏振特性的海洋溢油油种识别研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(7): 0712001
Li Yingchao, Liu Jianan, Shi Haodong. Research on identification of marine oil spill based on polarization characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 0712001 (in Chinese)
- [24] 陆应诚, 刘建强, 丁静, 等. 中国东海“桑吉”轮溢油污染类型的光学遥感识别[J]. *科学通报*, 2019, 64(31): 3213-3222
Lu Yingcheng, Liu Jianqiang, Ding Jing, et al. Optical remote identification of spilled oils from the SANCHI oil tanker collision in the East China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(31): 3213-3222 (in Chinese)
- [25] He X Q, Stamnes K, Bai Y, et al. Effects of earth curvature on atmospheric correction for ocean color remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 118-133
- [26] Pan D L, Mao Z H. Atmospheric correction for China's coastal water color remote sensing[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 20(3): 343-354
- [27] 丁静, 唐军武, 宋庆君, 等. 中国近岸浑浊水体大气修正的迭代与优化算法[J]. *遥感学报*, 2006, 10(5): 732-741
Ding Jing, Tang Junwu, Song Qingjun, et al. Atmospheric correction for Chinese coastal turbid waters using iteration and optimization method[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 732-741 (in Chinese)
- [28] Chen Jun, Lee Z, Hu Chuanmin, et al. Improving satellite data products for open oceans with a scheme to correct the residual errors in remote sensing reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(6): 3866-3886
- [29] Pan Yanli, Tang Danling, Weng Dehe. Evaluation of the SeaWiFS and MODIS chlorophyll a algorithms used for the Northern South China Sea during the summer season[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2010, 21(6): 997-1005
- [30] Menghua Wang, Howard R. Gordon. Sensor performance requirements for atmospheric correction of satellite ocean color remote sensing [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7390-7403
- [31] M D Goldberg, H Kilcoyne, H Cikanek, et al. Joint Polar Satellite System: The United States next generation civilian polar-orbiting environmental satellite system[J]. *Geophys. Res. Atmos.*, 2013, 118(24): 13463-13475
- [32] M Wang, X Liu, L Tan, et al. Impact of VIIRS SDR performance on ocean color products [J]. *Geophys. Res. Atmos.*, 2013, 118(18): 10347-10360

(编辑:张小琳)