

海洋水色遥感器发展趋势初探

刘良明, 祝家东

(武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079)

摘要: 海洋水色遥感技术是近年兴起的海洋探测技术。它通过各种遥感平台上的探测器对海洋表面的水色进行探测, 反演出海洋水体中的叶绿素浓度、泥沙含量及黄色物质浓度, 进而得到关于海洋的各种信息。本文介绍了未来几年的星载海洋水色遥感器, 并将其与第二代海洋水色遥感器进行了初步对比, 对其未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 水色遥感器; 可见光红外成像辐射仪; 第二代海洋水色监视仪; 地球静止海洋水色成像仪; 海洋和陆地颜色仪; 第二代全球成像仪; 超光谱成像仪; 水色水温扫描仪

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.02.021

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-3177(2011)114-111-09

Preliminary Study on Trend of Ocean Color Sensor Development

LIU Liang ming, ZHU Jia dong

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract: Ocean color technology is an ocean exploration technology raised in recent years. The ocean surface water color is detected by a variety of sensors located on remote sensing platforms, then the chlorophyll concentration, sediment concentration and yellow substance concentration of marine waters can be retrieved. By this means, the information on oceans are recognized. This article describes the space borne ocean color sensors in the next few years, carries out a preliminary comparison with the second generation ocean color sensors, and makes a simple prediction of its development trend in the future.

Key words: ocean color sensor; the visible infrared imaging radiometer suite; ocean color monitor 2; geostationary ocean color imager; ocean land color instrument; second generation global imager

1 引言

海洋水色遥感是指利用地球轨道卫星上搭载的遥感仪器获得的海洋表层离水辐射亮度研究海洋现象或海洋过程的新兴遥感技术^[1]。海洋水色遥感的原理是通过卫星传感器接收信号的变化, 来反演水体中引起海洋水色变化的各种成分的含量, 如叶绿素浓度、悬浮泥沙含量、可溶有机物含量等^[2]。通常, 我们按照其光学性质的不同, 把海水分为一类水体(开阔大洋)和二类水体(近岸海域)。一类水体的

水色主要由浮游植物及其伴生生物决定, 二类水体的光学成因则比较复杂, 但它也是水色探测的重点^[3]。因为它与人类关系最密切, 受人类的影响也最强烈。遥感技术是唯一一种能够在全局视野上监测海洋的技术手段, 通过它监测和研究一类水体和二类水体的水色, 并结合海面风场、温度场、洋流、海面波浪等数据, 人类能够更好地了解海洋并及时认识到海洋的动态变化。正因为如此, 近几年的海洋水色遥感技术方兴未艾, 被广泛地应用到气象预报、渔业规划、环境监测及领土划分等领域。

收稿日期: 2010-01-29 修订日期: 2010-05-05

基金项目: 2009年湖北省高等学校省级教学研究项目“高校重大科研平台用于本科生创新科研能力培养的模式研究与示范”(编号: 2009013)和国家科技支撑计划“巨灾应急救援信息系统集成与示范”(编号: 2008BAK49B07)。

作者简介: 刘良明, 武汉大学教授, 博士生导师, 武汉大学MODIS卫星数据地面接收站负责人, 环境与灾害遥感研究所所长。

E-mail: lm_liu69@sohu.com

海洋水色遥感起始于 1978 年美国国家宇航局的海岸带彩色扫描仪 (CZCS) 的成功发射。尽管 CZCS 作为一次实验性质的尝试只有一年的工作计划,但直到 1986 年之前,它都持续提供着有实用性的数据。随后,到了上个世纪 90 年代中后期,人类又陆续发射了模块式光电扫描仪 (MOS)、海洋水色—温度扫描仪 (OCTS)、地球反射偏振和方向性探测仪 (POLDER) 和海视宽视野传感器等。这些传感器的发射与应用使得人类对于海洋水色的探测逐渐变得成熟起来。进入 21 世纪后,人类面临着愈来愈大的环境挑战,并由此带来了认识海洋和研究海洋的迫切需要。在此背景下,遥感技术在海洋水色探测方面的应用越来越广泛,一大批先进的海洋水色传感器被搭载在了卫星平台上。比较有代表性的有美国 Aqua 和 Terra 卫星平台上的中分辨率光谱成像仪 (MODIS)、欧洲 Envisat-1 卫星平台上的中等分辨率成像频谱仪 (MERIS)、日本 ADEOS-2 卫星平台上的全球成像仪 (GLI)、印度遥感卫星 IRS 平台上的海洋水色监测仪 (OCM)、韩国多功能卫星 Kompsat 平台上的海洋多光谱扫描成像仪 (OSMI) 以及中国台湾福卫一号上的海洋水色相机 (OCI)^[1]。我国的海洋水色探测起步较晚,但发展迅速。比较著名的有神舟 3 号上的中分辨率光谱成像仪 (CMODIS)、HY-1A 及 HY-1B 上的水色水温扫描仪 (COCTS)、海岸带成像仪 (CZI) 等,它们是当前国际海洋水色遥感的主流传感器。

随着包括遥感技术在内的全球科学技术的不断进步,更多功能强大的海水水色探测器将会被搭载到遥感平台上,从而使得对于海洋水色的研究不断走向深入。未来几年新增的海洋水色传感器主要有可见光红外成像辐射仪 (VIIRS)、第二代海洋水色监视仪 (OCM-2)、地球静止海洋水色成像仪 (Geostationary Ocean Color Imager, GOCI)、海洋和陆地颜色仪 (Ocean and Land Color Instrument, OLCI)、第二代全球成像仪 (SGLI)、超光谱成像仪 (HSI)、以及改进型 COCTS 及 CZI 等。

2 未来的海洋水色传感器

2.1 VIIRS

VIIRS 是 MODIS 在未来的替代传感器,将被搭载在“美国国家极轨业务环境卫星系统计划预备计划”NPP 及“美国国家极轨业务环境卫星系统计划”NPOESS G-1 卫星上^[4]。首个传感器搭载在 NPP 上,计划于 2011 年升空。VIIRS 是在 MODIS 的基础上

发展起来的,用途非常广泛,其水色遥感功能和 MODIS 相仿,辐射特征也差不多。MODIS 用于海洋水色遥感的有 8 个波段,其空间分辨率为 1000m,而 VIIRS 的 7 个水色波段分辨率为 800m^[5]。

VIIRS 重 275kg,功率为 240W,预计将在轨工作 7 年。星下点空间分辨率为 400m,扫描带边缘的空间分辨率约为 800m。它将在星下点左右 5° 的范围内进行扫描^[6],每 4 个小时经过赤道一次,刈幅约为 3000km。共有 22 个波段,可见光与近红外 9 个,中波红外 8 个,长波红外 4 个,还有一个用于低照度的可见光波段。用于海洋水色遥感共有 7 个波段,全部分布在可见光与近红外波段。图 1 表示了 VIIRS 的可见光及近红外波段的海洋遥感性能。

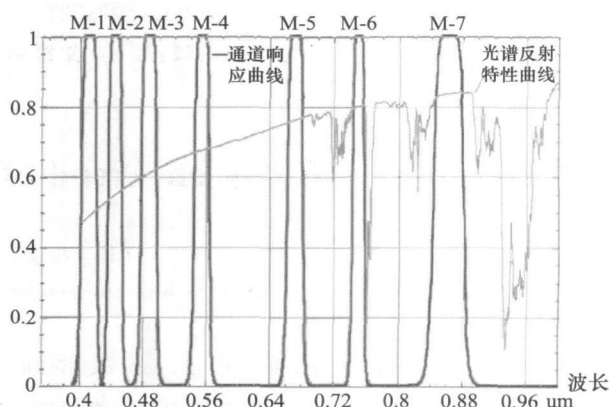


图 1 VIIRS 海洋水色遥感波段响应曲线图

对于 VIIRS 的海洋水色遥感,美国国家航空航天局 (NASA)、美国国家海洋局 (NOAA) 以及美国海军联合建立了一个跨机构的数据校准验证系统。该系统以现有的海洋水色传感器 (如 SeaWiFS、MODIS、MERIS、AVHRR 等) 为基础架构,将它们的数据与 VIIRS 取得的数据 (又叫“环境数据记录”,简称 EDR) 进行全面的对比和校准,以保证它们的一致性^[7]。

2.2 OCM-2

OCM-2 是在第一代海洋水色监视仪 (OCM-1) 的基础上发展起来的,被搭载在已发射的 Oceansat-2 和即将发射的 Oceansat-3 上。OCM-2 的幅宽为 1420km,每两天就可以覆盖印度全境一次,局部区域覆盖的分辨率为 350m,其数据被实时下行到地面处理站进行处理,而全球区域覆盖的分辨率为 4km,其数据则被暂时存储在卫星上。OCM-2 与 OCM-1 相似,共设置了 12 个波段,其中用于水色遥感的为 8 个波段。但它的波段设置在 OCM-1 的基础上做了些许改动。如把 OCM-1 上的 765nm 波段移到了 740nm 处,目的是减少氧气吸收;把 670nm

处的波段替换为了 620nm, 以便更好地观测水体中的悬浮物质^[8]。OCM-2 的数据将被用于如下方面: 浮游植物及有害藻华监视; 渔业动态监测; 潮流、潮汐等对近岸水体中的悬浮物质的传输及疏散产生的影响; 河口监测等。

2.3 GOCI

GOCI 是韩国的新一代海洋水色遥感器, 主要用来监测朝鲜半岛周围的海洋水色。GOCI 被搭载在韩国 2010 年发射的首颗地球静止气象卫星 COMS (Communication, Ocean, Meteorological Satellite) 上, COMS 是韩国的一颗多功能卫星, 除了用来监测天

气变化外, 还兼具海洋遥感及通讯功能。GOCI 就是用来做海洋水色遥感的, 由 EADS-Astrium 公司研制成功。它的主要任务是观测以朝鲜半岛为中心的一定范围内的海洋环境的变化, 对该区域的海洋生态系统进行长期的和短期的监测并提供不断更新的关于叶绿素、藻华等的的数据。GOCI 重约 84kg, 功率略小于 100W, 尺寸为 1.39m × 0.89m × 0.85m。GOCI 的精度非常高, 其辐射校正误差小于 3.8%, 地面采样距离为 500m, 时间分辨率为 1 小时。GOCI 的谱带选择刚好适应其进行水色遥感, 如表 1 所示:

表 1 GOCI 的基本参数

| 空间分辨率 | | 500m × 500m | | | | |
|--------|--------------|---------------------|---|---|--------------|------|
| 覆盖范围 | | 2500km × 2500km | | | | |
| 波段数 | | 8 个可见光波段 | | | | |
| 波段号 | 中心波长 (nm) | 波段宽度 (nm) | 标称辐射亮度 $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$ | 最大辐射亮度 $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$ | 噪声等效 功率 W | 信噪比 |
| 1 | 412 | 20 | 100 | 150.0 | 0.100 | 1000 |
| 2 | 443 | 20 | 92.5 | 145.8 | 0.085 | 1090 |
| 3 | 490 | 20 | 72.2 | 115.5 | 0.067 | 1170 |
| 4 | 555 | 20 | 55.3 | 85.2 | 0.056 | 1070 |
| 5 | 660 | 20 | 32.0 | 58.3 | 0.032 | 1010 |
| 6 | 680 | 10 | 27.1 | 46.2 | 0.031 | 870 |
| 7 | 745 | 20 | 17.7 | 33.0 | 0.020 | 860 |
| 8 | 865 | 40 | 12.0 | 23.4 | 0.016 | 750 |
| 调制传递函数 | | 在奈奎斯特频率处 ≥ 0.3 | | | | |
| 量化等级 | | $\geq 11bit$ | | | | |

GOCI 的波段设置与第二代水色遥感器如 MODIS 有许多相似之处, 很好地继承了它们的优点。以 412nm 为中心波长的波段能够很好地区分活的藻类和死去的腐败物(黄色物质), 而近红外的两个通道(745nm 和 865nm) 主要用来方便大气效应校正。对于大洋水, 这两个波段的离水辐射都可以视为零, 因而可以很方便地计算出其他通道的纯粹气溶胶散射构成的路径辐射以及分子散射和气溶胶散射相互作用下的大气路径辐射^[2]。同 MODIS 相比, GOCI 各波段的信噪比都有所提高, 这对于 GOCI 来说是不容易的。因为与处于低轨道的 MODIS、SeaWiFS 等第二代水色遥感器相比, GOCI 距离水面更远。而高信噪比的获得, 归功于 CMOS 技术在 GOCI 上的使用。GOCI 是世界上首个搭载在地球静止轨道上的海洋水色遥感器, 虽然不能像其

他极地轨道或是太阳同步轨道上的遥感器那样提供全球视场的海洋遥感, 但是 GOCI 能对以 130°E、36°N 为中心的一定范围的海洋区域进行高光谱分辨率和高空间分辨率的遥感^[9]。同时, GOCI 的地球静止轨道位置也使得它能在同一天内对同一区域进行多次遥感, 数据更新很快, 能进行高频率的监测, 有利于处理突发事件。因而与 MODIS、SeaWiFS 等第二代水色遥感器相比, GOCI 在轨运行时, 将体现出以下优势:

①能够很好地消除云层对水色遥感的影响。每日的 10:00–17:00, GOCI 将对视场内的每一个目标进行 8 次观测, 如此高频率的观测, 使得云层对卫星信号产生较大影响的可能性大大降低。

②更有利于对赤潮的监测。赤潮也称有害藻华(HAB), 是指在海水中浮游生物数量急剧增加而种类

大量减少的情况,此时某种或某几种浮游生物占据了绝对优势,对其他海洋生物和海洋水质构成了严重威胁。因此及时获知赤潮的发生并实时跟踪其发展对于消除赤潮具有重要意义。GOCI的高时空分辨率的特征,对于处理赤潮这种偶发性事件具有很大优势。

③为建立一个海洋每日循环性能数据库提供了可能性。海洋是时时在变化的,其循环机制包括碳循环、洋流、海面水汽循环等一直是人类研究的热点。因此利用水色卫星的探测资料,建立一个关于海洋每日循环性能的数据库,对于进一步了解海洋循环机理具有重要作用。

④对于不同的观测目的,都能匹配合适的时间尺度。GOCI对于兴趣点,既能提供长期观测又能提供短期观测,这大大地扩展了它的应用范围。

2.4 OLCI

OLCI是欧盟新一代海洋水色遥感仪,是在MERIS的基础上发展起来的,将被搭载在欧盟新一代地球观测卫星“哨兵”-3上。作为该系列卫星的首发星,“哨兵”-3A将于2012年秋季发射升空。“哨兵”系列卫星是欧洲“全球环境监测与安全”

(GMES)计划的首个卫星系列,旨在对全球的陆地及海洋进行高时间分辨率的遥感监测,为GMES提供数据支持。GMES是欧洲的大型地球观测计划,将对地球进行全方位的监测,包括陆地、海洋、大气、冰雪等都会被纳入其观测范围内^[10]。其目的主要有以下几个方面:欧洲陆地覆盖变化;欧洲环境变化;全球植被监测;全球海洋监测;全球大气监测;支持区域营救;危机管理系统:突发事件管理和人道救援系统:为欧洲对地观测数据库提供信息和管理工具支持。OLCI将是GMES计划中海洋观测的重要一环。

OLCI重约150kg,由5个倾斜的可见光和热红外相机组成,对海岸带和陆地的空间分辨率为300m,可以实时传回地面站,对宽阔海域观测的分辨率则为1200km,记录在星上记录器上。刈幅1270km,视场68.5°,能在2-3天内将地球全部覆盖一遍。OLCI针对海洋水色遥感的共有16个波段,与MERIS相比,除了多了一个以1.02um为中心波长的波段以增强大气和气溶胶校正外,其余波段设置都相同^[11]。如表2所示:

表2 OLCI的波段设置

| 波段号 | 中心波长(nm) | 波段范围(nm) | 信噪比 | 主要应用 |
|-----|----------|-----------------|-------|----------------|
| 01 | 413 | 403-423 | 2006 | 黄色物质及其他颜色块 |
| 02 | 443 | 438-448 | 2087 | 叶绿素吸收峰值 |
| 03 | 490 | 485-495 | 1683 | 叶绿素及其他色素 |
| 04 | 510 | 505-515 | 1629 | 叶绿素、悬浮泥沙、赤潮 |
| 05 | 560 | 555-565 | 1481 | 叶绿素荧光参考线 |
| 06 | 620 | 615-625 | 1131 | 悬浮物质 |
| 07 | 665 | 660-670 | 1022 | 叶绿素、泥沙、黄色物质、植被 |
| 08 | 681 | 677.25-684.75 | 829 | 叶绿素荧光峰值 |
| 09 | 709 | 704-714 | 956 | 叶绿素荧光基线 |
| 010 | 754 | 750.25-757.75 | 673 | 氧气吸收、云层 |
| 011 | 761 | 759.125-762.875 | 407 | 氧气吸收、气溶胶校正 |
| 012 | 779 | 771.5-786.5 | 810 | 大气/气溶胶校正 |
| 013 | 865 | 855-885 | 688 | 气溶胶、云层 |
| 014 | 885 | 885-895 | 417 | 水汽吸收 |
| 015 | 900 | 895-905 | 312 | 水汽吸收、植被 |
| 016 | 1020 | 1000-1040 | 检测前跟踪 | 大气/气溶胶校正 |

与第二代水色遥感器如MODIS、SeaWiFS等相比,OLCI的16波段水色遥感的功能可谓大大增强。如设置的悬浮物质敏感波段620nm、叶绿素荧光性大气校正波段709nm、氧气吸收波段761nm、

大气含水量900nm等,使得OLCI能够对海洋水色进行全方位、高精度的遥感,基本上构建了一个完整的数据收集体系。OLCI设置了779nm和885nm两个近红外波段进行大气校正。对于一类水体,可

以借鉴经验算法,假设这两个波段的离水辐射率为零,从而比较方便的进行大气校正。对于二类水体,则需要另外发展大气校正算法^[2]。

2.5 HSI

HSI 是搭载在德国“环境制图与分析”卫星(EnMAP)上的超光谱成像仪。EnMAP 是德国的一个超光谱卫星,计划于 2012 年发射升空,旨在实时地提供高质量的超光谱图像数据,并在一个相当大的范围内进行生态系统参量的调查与分析,包括农业、森林、土壤、地质环境、海岸区域以及内陆水体。这项工作将有助于我们了解相互联系在一起的

生物圈及地质圈的各种过程,进而管理与规划各种地球资源^[2]。EnMAP 总重 766kg,运行于 643km 高的太阳同步轨道上,倾角 97.96°,可以在横跨轨道±30°的范围内对地面进行扫描,其降交点时间为上午 11:00,目标重访周期 3~4 天,最小地面覆盖范围为 5km×30km,数据存储容量 512Gbit,数据通过 X 波段下行,速度 100~300Mbps,卫星设计寿命 5 年。

HIS 光谱覆盖范围为 420nm~2450nm,跨越可将光与近红外(VNIR)及短波红外(SWIR)。各波段性质如表 3:

表 3 HSI 波段概况

| 波段 | VNIR | SWIR |
|---|---|---|
| 噪声等效辐射亮度 (mW/cm ² ·sr·um) | 420-1030nm:0.005 | SWIR I (950-1390nm):0.003 SWIR II (1480-1760nm):0.003 SWIR III(1950-2450nm):0.001 |
| 光谱采样情况 | 420-500nm:10nm(8 波段) 500-850nm:5nm(70 波段,水体模式) 10nm(35 波段,陆地模式) 850-1030nm:10nm(18 波段) | 950-1390nm:10nm(44 波段) 1480-1760nm:10nm(28 波段) 1950-2450nm:10nm(50 波段) |
| 光谱通道数 | 96 | 136 |
| 信噪比 | > 500:1 | > 150:1 |
| 地面采样距离(GSD) | 30m×30m | |
| 条带长度 | 1000km/轨 | |
| 平均光谱采样间隔 | 6.5nm | 10nm |
| 光谱校准精度 | 0.5nm | 1nm |
| 辐射校准精度 | < 5% | |
| 偏振敏感性 | < 5% | |

HIS 由 3 个子系统组成,分别为光学系统、能量系统和仪器控制处理系统,其中光学系统由两个光学仪器组成,分别对应着 VNIR 波段和 SWIR 波段。其中 VNIR 波段的探测器运用了 CCD 技术,其设计时除了考虑帧速率和噪声特征外,还要考虑到仪器所接收信号的高动态范围(HSI 观测对象从反射率极低的水体到反射率很高的积雪)^[13],因此 HIS 的 VNIR 模块是可以运用在海洋水色遥感方面的。事实上在 HSI 接收到的 VNIR 和 SWIR 重叠的 900nm 到 1000nm 波长数据就有助于离水辐射信号的大气校正,950nm 附近短波红外有足够的信噪比推得水吸收信息^[14]。

2.6 SGLI

SGLI 是针对全球成像仪(GLI)而说的,是日本的新一代海洋水色传感器,将被搭载在“全球变化观

测”(GCOM)中的 GCOM-C1 上,计划于 2013 年发射升空。GCOM 是日本一项旨在观测全球变化的长期卫星计划。GCOM 包括两个卫星系列,GCOM-W 和 GCOM-C。GCOM-W 上搭载有先进微波扫描辐射计 AMSR-2,主要观测与水有关的目标,比如降水、水蒸汽、海面风速、海面温度、土壤湿度以及积雪深度等。GCOM-C 则主要观测地表以及大气中有关碳循环和地球辐射收支的现象,比如云、气溶胶、水色、植被覆盖、冰雪等,SGLI 是其重要载荷之一^[15]。

SGLI 的质量为 400kg,正常工作时功率为 480w,刈幅为 1600km。主要由可见光和近红外辐射计(VNR)以及红外扫描辐射计(IRS)两个部分组成。VNR 的光谱范围从 380nm 到 868.5nm,共 13 个波段,包括 11 个非极化波段和 2 个极化波段。在

11 个非极化波段中, 除了一个中心波长为 763nm 的波段因为用于一类水体的观测而把空间分辨率定为 1000m 外, 其余的 10 个波段其空间分辨率均为 250m^[16]。在这 11 个波段中, 有一个中心波长为 380nm 的窄波段值得注意, 它可以用来判别海面上空吸收性气溶胶的存在并了解其相关性质, 增加了大气校正的精度。该波段还可以用来探测海水中的黄色物质^[17]。而另外两个极化波段可以进行极化测量, 其中心波长分别为 670nm 和 865nm。这两个极化波段, 共有 3 个极化方向, 空间分辨率都为 1000m。利用它们, 可以很好地解决水体耀光的问题。近年来研究发现, 二类水体中的初级生产力与其温度存在一种线性回归关系, 故而 SGLI 还设置了两个热红外波段, 用来估计二类水体的初级生产力。SGLI 最终的海洋水色产品将会融合多个水色遥感器(比如可见光红外成像辐射仪 VIIRS)的数据。

SGLI 拥有非常高的分辨率(250m), 因而它对于陆海交接处的变化非常敏感, 在监测二类水体时有着独特的优势。它能够精准地探测出近岸水体中叶绿素浓度及悬浮物质、溶解有机物的相关性质。利用这些数据, 人类可以了解海水的初级生产力、水质等, 进而可以进行渔业规划。SGLI 还可以用来监

测赤潮的发生。同时, 它能够监测河口水的变化, 能够帮助科学家了解人类活动对海洋的影响。

2.7 我国未来的海洋水色遥感器

我国的海洋水色遥感卫星主要是“海洋一号”卫星(HY-1), 其中, “HY-1A”、“HY-1B”已分别于 2002 年、2007 年发射升空, 行将过期。未来的海洋水色卫星系列是“HY-1C”及“HY-1D”, 按照国家海洋局规划, 二者将分别于 2011 年 4 月和 8 月发射升空, 届时将实现上、下午各一颗星同时运行, 通过不同时刻对海洋环境的监测, 达到提高监测水平和缩短重复观测周期的能力。“HY-1C”的成功运行将标志着“海洋一号”系列卫星业务化运行的成功, 以后将会逐步发射“HY-1E/F”、“HY-1G/H”等。“HY-1C/D”中上午星的轨道降交点地方时 10: 30; 下午星的轨道降交点地方时 13: 30。“HY-1C/D”重 600kg, 周期 100.34 分钟, 倾角 98.5°, 卫星运行于 782km 的太阳同步轨道^[18], 和其他运行于 CAST2000 平台上的卫星一样, 采用 3 轴稳定的的姿态控制模式, 拥有侧摆机动能力。

“HY-1C”及“HY-1D”的水色遥感器仍是一个十波段水色扫描仪(COCTS)和一个四波段 CCD 相机(CZI), 是在 HY-1B 卫星上的遥感器的基础上发展起来的, 性能更好。它们的主要参数如表 4 所示:

表 4 HY-1C/HY-1D 上的 COCTS 及 CZI 的基本参数

| 仪器 | COCTS | CZI |
|--------|---|--|
| 光学分辨率 | 1.1km | 0.25km |
| 幅宽 | 2900km | 100km |
| 覆盖周期 | 1天 | 3天 |
| 量化等级 | 12bit | |
| 辐射精度 | 10% | |
| 数据传输率 | 30Mb/s | |
| 星载内存 | 7.5GB | |
| 水色波段设置 | 0.402- 0.422nm: 黄色物质、水质 0.433- 0.453nm: 叶绿素吸收 0.480- 0.500nm: 叶绿素、海冰 0.510- 0.530nm: 叶绿素、水深、污染、悬浮泥沙 0.555- 0.575nm: 叶绿素、滩涂 0.660- 0.680nm: 荧光、悬浮泥沙、大气校正、气溶胶 0.730- 0.770nm: 悬浮泥沙、大气校正、植被 0.845- 0.885nm: 大气校正、水汽 10.30- 11.40nm: 表层温度 11.40- 12.50nm: 表层温度 | 0.433- 0.453nm: 悬浮泥沙、水质、海冰 0.555- 0.575nm: 水质污染、水色、海冰 0.660- 0.680nm: 大气校正、水汽 0.845- 0.885nm: 大气校正、水汽 |

COCTS 和 CZI 的应用主要体现于以下几个方面: 叶绿素 a 含量的时空分布; 海洋污染监测, 主要是赤潮和溢油污染; 海温和海冰要素反演; 渔场环境信息的提取; 海岸带资源和植被的动态监测; 海岸带潮间带范围估算; 河口悬浮泥沙; 河流和上升流的应用研究; 海洋初级生产力的应用研究^[19]。

3 海洋水色遥感器发展趋势

近几十年来, 海洋水色遥感已经取得了长足的进展。通过遥感技术得到的海洋水色数据被广泛地应用到气候、渔业、环境等各个领域, 取得了很好的经济效益和社会效益。随着海洋越来越受到人类的重视, 海色遥感也越来越成为地球观测的重要一环。当前, 世界上主要的航天组织如 NOAA、ESA、JAXA 等都有水色遥感的相关规划, 而一些大型国际计划如“全球海洋观测计划”、“全球气候观测系统”、“全球海洋通量观测计划”等也都把水色遥感作为重要一环来进行对待。可以预计, 海洋水色遥感在 21 世纪将取得更大的发展。那么未来的海洋水色遥感器将会有哪些发展特征呢? 综合第一、二代水色遥感器及本文介绍的一些新型遥感器的发展历程来看, 以下几点将是我们对海洋水色遥感器需重点关注的方面。

3.1 海洋水色遥感平台将形成一个专门化的“虚拟星座”

第一代水色遥感器如 CZCS 带有试验性质, 功能比较简单; 第二代水色遥感器如 MODIS、SeaWiFS 虽然功能强大了不少, 但是它们的波段设置并不专门针对水色遥感, 这样显然会带来一些弊端。因而国际上越来越有这样的一种趋势, 即发展专门针对海洋水色的遥感器, 像台湾“福卫二号”上的 OCI 以及印度的 OCM、OCM-2 等就是这种类型。这些遥感器除了海洋水色监测外一般不再具有其他用途, 因而它们在设置影像光谱带时可以尽量满足水色遥感的要求。同时, 各水色遥感平台的联合将会越来越明显, 最终将会形成一个完整的功能强大的网络。不久前, 国际海洋水色专家组 (IOCCG) 提出了一个“海洋水色辐射测量虚拟星座” (OCR-VC) 的概念, 旨在联合各海洋水色遥感仪, 提供一条不被中断的海洋水色关键波段遥感数据流^[8]。如果这个概念得以实现, 将有效避免各机构在海洋水色遥感方面的重复努力, 并且减少数据差距, 从而促进建立一个全球范围内的海洋水色观测网。在这个网内, 各种水色遥感器的数据可以进行最大限度的融合,

从而提高了数据的精度和适用范围。

3.2 水色波段增多且配置更合理

众所周知, 一类水体的水色遥感要比二类水体容易得多, 二类水体的水体组分和光学特性都比一类水体要复杂, 通过水色资料反演叶绿素浓度的标准算法对二类水体并不适用。因而针对二类水体的水色遥感需要更合理的大气校正波段配置。目前人类利用较多的水色波段主要集中在可见光及近红外波段, 如表 5 所示:

表 5 当前国际通用的水色波段^[20]

| 波段 | 作用 |
|----------------------------|----------------------|
| 413nm | 有色可溶性有机物的辨别 |
| 443nm, 490nm, 510nm, 560nm | 从基于蓝绿比值的经验算法中得出叶绿素浓度 |
| 560nm, 620nm, 665nm+ | 基于红绿算法的二类水体水柱属性 |
| 665nm, 681nm, 709nm+ | 叶绿素荧光峰值对叶绿素浓度进行检索 |
| 779nm, 870nm | 大气校正 |

另外, 从前文我们知道, 第二代全球成像仪 (SGLI) 在以上这些常用波段的基础上还增加了 380nm 波段以及 1000nm 以上的波段, 它们都可以用来加强对浑浊水体的观测及大气校正精度。同时, 超光谱遥感也是未来水色遥感的一个趋势。GLI 及 SGLI 就有点类似超光谱传感器了, GLI 在 380nm~680nm 波谱范围内, 设置了 12 个光谱分辨率为 10nm 的波段^[21]。而同样在规划中的兼有水色遥感功能的欧洲“环境制图与分析”卫星 EnMAP 上搭载的“超光谱成像仪” HIS 则直接是使用超光谱技术来进行水色遥感了。

3.3 应用范围拓宽使得水色遥感器的空间分辨率越来越高

对于全球范围的水色遥感器, 其空间分辨率至少要达到 2km~4km, 而针对于局部区域 (二类水体) 的水色遥感器, 其空间分辨率至少要达到 0.2km~0.5km, 有时甚至要达到几十米。在未来, 人们对二类水体的关注度会增加。这些水域是海洋渔业和农业的主要分布区, 其光学性质也最复杂, 与人类生存和健康的联系也最密切。在这些水域, 人们需要通过高分辨率的水色遥感器来合理规划渔业、救助濒危动物、监测水质变化等。针对一类水体水色遥感的空间分辨率也会提高, 主要是因为一类水体的水

色状况反映了全球碳通量的变化及洋流走向, 对它们进行更细致的观测显然能提高人类应对气候变化的能力。本文介绍的这几个未来的水色遥感器如 VIIRS、SGLI、OLCI 等的空间分辨率都在现有遥感器的基础上有所提高。

3.4 一日多次的水色观测将成为必然

现有的水色遥感器都是对某一水域进行一日一次的观测, 这对于二类水体的观测显然是不够的。云层的遮挡使得一些多变的水域(如一些近岸水域)在一天内甚至得不到观测, 从而造成了明显的疏漏^[8]。未来将有相当一部分水色遥感器会运行在地球静止轨道上, 只针对某一特定区域(主要是二类水体)进行不间断的监测。韩国的 GOCI 就是例证。除了韩国, 美国也计划于 2013 年至 2016 年发射一颗名为“沿海地带空气污染地球静止卫星”(GEO-CAPE)^[22], 定位在西经 80° 附近。卫星上将安装 1 个能够每小时提供一次资料的 UV- 可见- 近红外成像仪, 1 个视角为 300km 的高分辨率(250m)分光成像仪以及 1 个 IR 辐射计。GEO-CAPE 主要用来监测海岸地区的空气污染, 同时也能用来观测二类水体的海洋水色。同时, 美国的 GOES-R 地球静止卫星上也计划搭载一个名为海岸水体成像仪(HES-CW)的传感器, 对美国领海内感兴趣的区域进行全天不间断的成像。地球静止轨道上的水色遥感器使得一日多次的水色观测成为可能, 从而最大限度地避免了疏漏。

3.5 辐射探测性能将会得到大幅提高

未来的水色遥感器将会向高灵敏度、高信噪比、宽动态范围的方向发展^[17], 以满足人类对海洋越来越精细的观测。目前水色遥感器的量化等级一般都达到 12 比特以上, 考虑到对近岸水体进行遥感时, 大气或云层对传感器的复杂影响, 传感器的动态范围、量化等级等均会进一步提高。如中国的“HY-1”卫星上就使用了多元并扫及深冷技术来保证高信噪比, 并使用 K 镜消像旋机构提高辐射探测性能^[23]。

3.6 未来的水色遥感器将提供更高精度的水色遥感数据

高精度处理和信息定量化是海洋水色遥感永恒

的主题。而随着海洋水色卫星遥感观测优势的日益凸显, 人们对高精度的区域性水色信息的获取提出了更高的要求^[24], 这也是未来的水色遥感器发展的必然趋势。首先是大气校正精度的提高。众所周知, 海洋水色辐射数据受到大气的影响非常大, 因而大气校正算法是水色遥感的关键技术。对于二类水体来说, 并不存在一个通行的大气校正算法体系, 不同的水色遥感器, 其重点关注的区域不同, 用途也不同, 其大气校正算法就不同。未来的水色遥感器将会根据其自身特点发展其独特的反演算法, 并采用各种手段提高算法的精度。以现有的“HY-1B”为例, 我国学者针对 COCTS 的具体情况, 开发了我国海洋水色系列卫星的精确大洋一类水体大气校正算法, 达到了国际先进水平。同时, 水色遥感反演模式的精度也会提高。遥感器关注的区域不同, 则其叶绿素浓度、海水透明度、初级生产力、水质参数等遥感反演模型也就会存在一定差距^[24], 因而不同的水色遥感器需要发展不同的水色反演模型。如我国的唐军武等就提出了针对水色遥感波段的中国典型海域水体成分反演算法^[25]。未来海洋水色遥感器的数据处理精度也会提高。随着 e-Science 平台下 DiscoveryNet 传感器网络的完善, 海量的水色遥感数据将会被实时地处理、解析、可视化和精简^[26], 而 OCR-VC 的建立则为水色数据的集成提供了绝佳的机会。这些都使得未来的水色数据具有很高的精度, 可以满足人们对海洋进行更细致观测的要求。

4 结束语

21 世纪, 随着海洋的不断开发, 其与人类的关系越来越密切, 包括海色遥感在内的海洋探测技术也必将取得日新月异的发展。展望未来, 灵敏度高、功能强大、系统化的海洋水色遥感器是适应潮流的必然要求。本文所介绍的这几种水色遥感器只是未来几年的主流, 它们也会在在更远的将来被淘汰, 被更先进的仪器所替代。在全球数字化浪潮下, 数字化海洋也将在未来得到实现, 届时, 网络化的高精度的水色遥感器将揭开海洋的神秘面纱, 为人类监测全球变化、合理规划环境及应对自然灾害提供有力帮助。

参考文献

- [1] 黄世任. 中华卫星一号海洋水色照相仪资料之大气校正及其应用[D]. 国立中央大学太空科学研究所, 2002.
- [2] 徐希孺编著. 遥感物理[M]. 北京大学出版社.
- [3] 陈森. 海洋水色卫星遥感算法综述[D]. 中国海洋大学, 2005.
- [4] NPOESS Instruments VIIRS[EB/OL]. www.npoess.noaa.gov, 2009-12-30.

- [5] OSU MODIS Workshop. The NPOESS Preparatory Project NPP[Z]. 2003- 9- 4
- [6] 赵增亮, 孙泽中, 韩志刚, 毛节泰. NPOESS/VIIRS 及其云图产品的应用[J]. 气象科技, 2008, 36(3).
- [7] Robert Arnone. Ocean EDR Product Calibration and Validation Plan For the VIIRS sensor for ocean products[R]. NRLSSC report, 2009. 4
- [8] Why Ocean Colour? The Societal Benefits of Ocean Colour Technology[R]. IOCCG Report Number7, 2008.
- [9] Francois Faure, Pierre Coste, Gmisil Kang. The GOCI Instrument On COMS Mission The First Geostationary Ocean Color Imager[EB/OL]. <http://www.ioccg.org/sensors/GOCI/Faure.pdf>.
- [10] Miguel Aguirre, Bruno Berruti, Jean-Loup Beay, Mark Drinkwater, Florence Heliere, . etc. Sentinel 3 The Ocean and Medium Resolution Land Mission for GMES Operational Services[EB/OL]. www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin131/bulletin131.pdf.
- [11] 高中灵, 汪小钦, 陈云芝. MERIS 遥感数据特性及应用[J]. 海洋技术, 2006(3).
- [12] EnMAP- German Hyperspectral Satellite Mission[EB/OL]. http://www.enmap.org/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1.
- [13] S. Hofer, H. J. Kaufmann, T. Stuffer, B. Penré, G. Schreier, A. Müller, A. Eckardt. EnMAP hyperspectral imager: An advanced optical payload for future applications in earth observation programs[C]//Proceedings of the 59th International Astronautical Congress. 2008.
- [14] R. Müller, M. Bachmann, C. Makasy, A. deMiguel, A. Müller, A. Neumann, G. Palubinskas, R. Richter, M. Schneider, T. Storch, T. Walzel. EnMAP The Future Hyperspectral Satellite Mission Product Generation[EB/OL]. http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/ispr/Hannover2009/Mueller_R183.pdf.
- [15] What is GCOM-C[EB/OL]. http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/what_s_c.html.
- [16] Honda, Y, Yamamoto, H, Hori, M, Murakami, H, Kikuchi, N. Global environment monitoring using the next generation satellite sensor[C]//IGARSS 05. 2005.
- [17] 任敬萍, 赵进平. 二类水体水色遥感的主要进展与发展前景[J]. 地球科学进展, 2002(3).
- [18] LiuJianqiang. The development of ocean color the remote sensing satellite in China remote China[EB/OL]. http://ocean-color.soed.org.cn/data/t4/Jianqiang_Liu.pdf.
- [19] 王其茂, 蒋兴伟, 林明森, 马超飞. HY-1 卫星资料在海洋上的典型应用[J]. 遥感技术与应用, 2003(6).
- [20] Mark R. Drinkwater, H. Rebhan. Sentinel 3: Mission Requirements Document Of ESA[EB/OL]. http://esamultimedia.esa.int/docs/GMES/GMES_Sentinel3_MRD_V2.0_update.pdf. 2007. 2. 19
- [21] 白照广, 李一凡, 杨文涛. 中国海洋卫星技术成就与展望[J]. 中国航天, 2008(6).
- [22] 周为峰. 静止卫星的海洋水色观测计划[J]. 世界科技研究与发展, 2008, 30(2).
- [23] 郑列华, 尹达一, 冯鑫. K 镜消旋机构在海洋卫星水色仪中的应用[J]. 红外技术, 2007, 1(29).
- [24] 潘德炉, 白雁. 我国海洋水色遥感应用工程技术的新进展[J]. 中国工程科学, 2008, 10(9).
- [25] 唐军武, 马超飞, 牛生丽, 等. CBERS-02 卫星 CCD 相机资料定量化反演水体成分初探[J]. 中国科学 E 辑(信息科学), 2005, 35(增刊 I): 156- 170.
- [26] 孙坦. 数字化科研—e Science 研究[M]. 电子工业出版社, 2009.

(上接第 40 页)

- [5] 钱乐祥, 崔海山. 运用归一化光谱混合模型分析城市地表组成[J]. 国土资源遥感, 2006(2): 64- 68.
- [6] 马耀明, 刘东升, 王介民, 等. 卫星遥感敦煌地区地表特征参数研究[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 531- 536.
- [7] 覃志豪, 张明华, Arnon Karnieli, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001(4): 456- 466.
- [8] 覃志豪, 李文娟, 张明华, 等. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感, 2003(2): 37- 43.
- [9] 钱乐祥, 丁圣彦. 珠江三角洲土地覆盖变化对地表温度的影响[J]. 地理学报, 2005(5): 761- 770.
- [10] 刘含海. 非渗透表面对地表温度的影响[D]. 河南大学, 2007.
- [11] Ridd M K. Exploring a V-FS (vegetation impervious surface soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995(16): 2165- 2185.
- [12] 李明杰, 钱乐祥, 夏丽华等. 汕头市土地利用景观指数粒度效应初探[J]. 地理与地理信息科学, 2008(6): 93- 96.
- [13] Lu DS, Q. Weng. Use of impervious surface in urban land use classification[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(1- 2): 146- 160.
- [14] 钱乐祥, 崔海山, 冯艳芬. 非渗透表面对广州主城区地表热特征的影响[J]. 地理与地理信息科学, 2008(1): 91- 95.