

# HY-1C 卫星 COCTS L2A 级产品在中国和欧洲近海的真实性检验

韩冰<sup>1</sup>, 贾迪<sup>1</sup>, 高飞<sup>1</sup>, 郭凯<sup>1</sup>, 朱建华<sup>1</sup>, 李铜基<sup>1</sup>, 马超飞<sup>2</sup>,  
刘建强<sup>2</sup>, Giuseppe Zibordi<sup>3</sup>

1. 国家海洋技术中心, 天津 300112;

2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100086;

3. Institute of Environment and Sustainability, Joint Research Center, Ispra 21027, Italy

**摘要:** 随着 HY-1C 卫星于 2018 年 9 月成功发射, 中国海洋水色遥感进入业务化全球观测时代。海洋环境观测、生态环境监测以及海洋防灾减灾等都对海洋水色遥感提出了较高的定量化要求。本文基于国际通用的时空匹配方法, 利用 2018 年和 2020 年海洋卫星在轨测试海上试验以及在中国东海、欧洲亚得里亚海近岸海域部署的自动太阳光度计 (SeaPRISM) 观测数据, 对 HY-1C 卫星搭载的水色水温扫描仪 (COCTS) 的 L2A 级业务化产品 (包括遥感反射率和气溶胶光学厚度) 进行了真实性检验。研究发现, SeaPRISM 自动测量能够提升数据获取效率和观测数据时间跨度, 有助于更好刻画水色遥感产品误差的时间分布规律。检验结果表明, COCTS 的遥感反射率与现场实测数据具有较好的一致性, 但匹配数据的离散度较高, 其蓝光波段、绿光波段和红光波段的遥感反射率在不同海域与实测数据的平均相对百分比偏差 (RPD) 和平均绝对百分比偏差 (APD) 分别为 -5.6% 和 46.8%、11.8% 和 53.0%、101.4% 和 173.9%, 而其气溶胶光学厚度的在不同海域与实测数据的 RPD 和 APD 分别为 -14.2% 和 79.5%; COCTS 遥感反射率光谱形状与实测数据一致性较高, 但在不同海域表现出较大差异: 中南海海域的谱形一致性非常高, 但呈显著高估特点; 中国东海海域的谱形相似度高, 但存显著的低估; 而欧洲亚得里亚海海域的谱形差异较大, 即在蓝光波段呈现高估特点, 而在绿光和红光波段呈现低估特点。对比同期的 HY-1C 卫星 COCTS L2A 及产品与 AQUA 卫星 MODIS 二级产品的检验结果发现, 后者在遥感反射率估算精度和光谱谱形相似度方面表现更好, 而在气溶胶光学厚度定量反演方面则没有表现出显著优势。本文的研究认为 COCTS 数据虽然已经在多个应用领域发挥了重要作用, 但其业务化产品的定量化精度和水平仍有较大提升空间, 至少 L2A 级产品是如此。

**关键词:** HY-1C 卫星, COCTS, L2A 级产品, 真实性检验, 中国近海, 欧洲近海, 遥感反射率, 气溶胶光学厚度  
**中图分类号:** P2

**引用格式:** 韩冰, 贾迪, 高飞, 郭凯, 朱建华, 李铜基, 马超飞, 刘建强, Giuseppe Zibordi. 2023. HY-1C 卫星 COCTS L2A 级产品在中国和欧洲近海的真实性检验. 遥感学报, 27(1): 26-42

Han B, Jia D, Gao F, Guo K, Zhu J H, Li T J, Ma C F, Liu J Q and Zibordi G. 2023. Validation of L2A operational products of COCTS onboard HY-1C satellite across coastal waters in China and Europe. National Remote Sensing Bulletin, 27(1): 26-42 [DOI: 10.11834/jrs.20235007]

## 1 引言

自 1997 年全球第一颗业务化水色遥感器 SeaWiFS 发射以来, 海洋水色遥感在 SeaWiFS、MODIS、MERIS、VIIRS、OLCI 等遥感器的支持下

得到了快速的发展。目前, 海洋水色遥感数据历史已经超过了 20 年。海洋水色遥感已成为业务化海洋观测的重要组成部分, 提供的基本地球物理参数 (遥感反射率) 及其反演得到的叶绿素 a 浓度、悬浮泥沙、有色可溶有机物 (CDOM) 等对

收稿日期: 2022-01-10; 预印本: 2022-04-20

基金项目: 中欧科技合作“龙计划”五期 (编号: 59053); 国家重点研发计划 (编号: 2016YFC1400906); “十二五”海洋观测卫星地面系统黄东海光学遥感海上检验场观测系统建设 (编号: HYYW01-HT-FZH-010); HY-1D 卫星在轨测试海上试验与评价 (编号: HYYW01-HT-SHY-001/K420CY022); HY-1C 卫星在轨测试海上现场同步观测试验 (编号: K4180C008)

第一作者简介: 韩冰, 研究方向为海洋遥感机理与算法、遥感应用及定标检验技术。E-mail: hotrice@sina.com

于理解水体的生物地球化学过程及其海洋生态系统对气候变化的响应至关重要 (IOCCG, 2000; Groom 等, 2019), 特别是在“碳达峰”、“碳中和”战略目标下的水体富营养化、有害藻华、泥沙输运等生态环境要素的监测具有非常重要的价值。

卫星上搭载的水色遥感器观测到的大气层顶辐亮度包含了来自水体离水辐射和大气程辐射贡献, 其中水体的贡献仅约占 10% (Morel 和 Prieur, 1977; Gordon 和 Morel, 1983)。卫星观测到的辐亮度经过大气校正后 (Gordon 和 Wang, 1994; Jamet 等, 2011), 得到水体的离水辐射信息, 如可见光-近红外谱段的遥感反射率光谱  $R_{rs}(\lambda)$  (Remote-sensing reflectance,  $\lambda$  为波长)。气溶胶光学厚度 AOT (Aerosol Optical Thickness) 是大气校正过程的重要参数。遥感反射率受到水体中浮游植物、CDOM 和无机悬浮颗粒物等含量和类型等的影响, 作为基本气候变量, 长时间序列的遥感反射率数据对于刻画生态环境和理解气候变化具有十分重要的作用 (Mélin 和 Franz, 2014)。

2018 年 9 月 7 日, HY-1C 卫星在太原发射中心发射成功, 是中国第一颗业务化海洋卫星, 也是继中国 HY-1A 和 HY-1B 卫星后的第三颗海洋水色卫星 (苗珊珊, 2018)。随着 2020 年 6 月 11 日 HY-1D 卫星的发射成功, 中国首次实现海洋水色卫星的组网观测 (Suo 等, 2021; Liu 等, 2022)。HY-1C 卫星搭载的有效观测载荷包括海洋水色水温扫描仪 (COCTS)、海岸带成像仪 (CZI) 和紫外成像仪 (UVI) 等, 可每天对全球海洋进行有效监测, 服务于自然资源调查、环境生态、应急监测等行业 (王利民等, 2019; 刘建强等, 2020 和 2021; 邹亚荣等, 2020; 周屈等, 2020; 沈亚峰等, 2020), 其中 COCTS 的幅宽为 2900 km, 星下点分辨率约为 1.1 km。COCTS 提供 L2A、L2B 和 L2C 这 3 类标准业务化二级产品, 其中 L2A 级产品包括可见光到近红外共 8 个波段 (412 nm、443 nm、490 nm、520 nm、565 nm、670 nm、750 nm 和 865 nm) 的遥感反射率和 865 nm 气溶胶光学厚度; L2B 级产品包括水色要素 (叶绿素 a 浓度、总悬浮物浓度、悬浮泥沙浓度、黄色物质浓度等) 和海表面温度; L2C 级产品为试验产品。基于全自动太阳光度计 (法国 CIMEL 公司生产, CE318-SeaPRISM) 的观测网络 (AERONET-OC)

能够实现自动的大气和水体光学测量, 其观测数据已经在海洋水色遥感产品真实性检验中发挥了重要的作用 (Hlaing 等, 2014; Qin 等, 2017; He 等, 2021)。在中国海洋卫星工程地面系统定标检验场网的支持下, 全自动的 SeaPRISM 已经在中国东海海域部署并从 2019 年 3 月开始业务化运行。本文利用中国东海和南海以及欧洲近岸海域的海上试验和 SeaPRISM 自动观测的实测数据, 对 HY-1C 卫星搭载的 COCTS 提供的业务化 L2A 级产品 (包括遥感反射率和气溶胶光学厚度) 进行了系统性的真实性检验。

## 2 数据和方法

本文的研究对象为 HY-1C 卫星 COCTS 获取的业务化 L2A 级数据产品的真实性检验。真实性检验所用的源数据包括 HY-1C 卫星首次在轨测试 (IOT2018) (Han 等, 2019) 和 HY-1D 卫星首次在轨测试 (IOT2020) 期间的实测数据 (滕越等, 2022), 以及在中国东海和欧洲亚得里亚海部署的 SeaPRISM 的自动观测数据 (Zibordi 等, 2009a), 见表 1。需要注意的是, 表 1 中仅给出了在  $\pm 2$  h 内可能与 HY-1C 卫星 COCTS 数据匹配的站位。其中欧洲亚得里亚海部署的 SeaPRISM 位于距威尼斯 15 km 的近岸海域 (Venise), 已纳入 AERONET-OC 观测网络 (Zibordi 等, 2009a), 该网络专门用于海上大气光学特性的研究和水色遥感产品的真实性检验 (Lawson 等, 2021; Gilerson 等, 2017); 而中国东海部署的 SeaPRISM 位于距离温州洞头约 30 km 的近岸海域 (Dongtou)。表 2 给出了海上试验数据在典型水色波段 (如 412 nm、443 nm、490 nm、565 nm、670 nm) 及其临近波段的遥感反射率  $R_{rs}$  (Remote-sensing reflectance) 率和近红外波段 (如 865 nm 或 870 nm) 气溶胶光学厚度 AOT 的统计结果。

图 1 给出了各个波段遥感反射率和 870 nm 气溶胶光学厚度的直方图, 从图 1 中可以发现, 各波段遥感反射率和气溶胶光学厚度基本符合正态分布趋势。海上试验、中国东海海域 SeaPRISM 和亚得里亚海 SeaPRISM 的遥感反射率的众数差异较大, 特别是在绿光 (565 nm 附近) 和红光波段 (670 nm 附近), 说明 3 种水体的光学性质存在较大的差异。气溶胶光学厚度亦是如此。

表1 现场实测数据采集区域和站位  
Table1 Sampling region and location of in-situ data collection

| 站点                        | 位置       |         | 区域/航次                               | 站点                        | 位置       |         | 区域/航次                               |
|---------------------------|----------|---------|-------------------------------------|---------------------------|----------|---------|-------------------------------------|
|                           | 经度/(°E)  | 纬度/(°N) |                                     |                           | 经度/(°E)  | 纬度/(°N) |                                     |
| SeaPRISM_Dongtou          | 121.3580 | 27.6750 | East China Sea                      | ST01_IOT2020              | 121.3488 | 27.6823 | East and South China<br>Sea/IOT2020 |
| SeaPRISM_Dongtou          | 12.5083  | 45.3139 | Adriatic Sea/<br>AERONET-OC         | ST02_IOT2020              | 119.3409 | 24.7221 |                                     |
|                           |          |         |                                     | ST03_IOT2020              | 116.9981 | 22.5717 |                                     |
| ST01_IOT2018 <sup>+</sup> | 122.7386 | 30.0061 | East and South China<br>Sea/IOT2018 | ST04_IOT2020              | 117.1775 | 21.5181 |                                     |
| ST02_IOT2018 <sup>+</sup> | 120.3970 | 26.6243 |                                     | ST05_IOT2020              | 117.0252 | 21.7072 |                                     |
| ST03_IOT2018              | 115.4855 | 22.3880 |                                     | ST06_IOT2020              | 113.1785 | 21.3064 |                                     |
| ST04_IOT2018 <sup>+</sup> | 115.3342 | 22.2869 |                                     | ST07_IOT2020              | 114.2172 | 21.6365 |                                     |
| ST05_IOT2018              | 110.8565 | 19.4268 |                                     | ST08_IOT2020              | 114.3492 | 21.4095 |                                     |
| ST06_IOT2018              | 111.0373 | 19.4230 |                                     | ST09_IOT2020              | 114.6950 | 18.7492 |                                     |
| ST07_IOT2018              | 110.9729 | 19.0979 |                                     | ST10_IOT2020 <sup>+</sup> | 114.7105 | 18.4591 |                                     |
| ST08_IOT2018              | 113.3163 | 18.8493 |                                     | ST11_IOT2020              | 113.9928 | 18.3108 |                                     |
| ST09_IOT2018              | 112.1944 | 18.7647 |                                     | ST12_IOT2020              | 113.9959 | 18.4276 |                                     |
| ST10_IOT2018              | 112.1066 | 18.7643 |                                     | ST13_IOT2020              | 114.0062 | 18.6703 |                                     |
| ST11_IOT2018              | 111.7376 | 18.7761 |                                     | ST14_IOT2020              | 112.5901 | 17.8941 |                                     |
| ST12_IOT2018              | 110.3213 | 18.5062 |                                     | ST15_IOT2020 <sup>×</sup> | 114.0484 | 18.0058 |                                     |
| ST13_IOT2018 <sup>×</sup> | 112.2633 | 17.1514 |                                     | ST16_IOT2020 <sup>+</sup> | 114.3738 | 18.0046 |                                     |
| ST14_IOT2018              | 110.0575 | 17.1812 |                                     | ST17_IOT2020              | 115.1944 | 17.8994 |                                     |
| ST15_IOT2018              | 110.0419 | 17.2870 |                                     | ST18_IOT2020              | 115.2138 | 18.2411 |                                     |
| ST16_IOT2018              | 108.5324 | 17.8254 |                                     | ST19_IOT2020              | 113.0770 | 17.8896 |                                     |
| ST17_IOT2018              | 109.2629 | 17.6872 |                                     | ST20_IOT2020              | 114.3653 | 18.4997 |                                     |
| ST18_IOT2018              | 108.3109 | 18.4392 |                                     | ST21_IOT2020              | 115.3073 | 18.8854 |                                     |
| ST19_IOT2018              | 108.7874 | 17.6047 |                                     | ST22_IOT2020              | 115.0138 | 18.9000 |                                     |
| ST20_IOT2018 <sup>×</sup> | 108.8282 | 17.6855 |                                     | ST23_IOT2020              | 113.1221 | 18.4484 |                                     |
| ST21_IOT2018              | 109.8370 | 18.0759 |                                     | ST24_IOT2020 <sup>+</sup> | 112.7095 | 18.4562 |                                     |
| ST22_IOT2018              | 109.9608 | 17.9620 |                                     | ST25_IOT2020 <sup>×</sup> | 111.3756 | 18.2829 |                                     |
| ST23_IOT2018 <sup>+</sup> | 110.1834 | 17.8086 |                                     | ST26_IOT2020              | 111.1756 | 17.4998 |                                     |
| ST24_IOT2018              | 109.4349 | 17.4553 |                                     | ST27_IOT2020              | 111.2054 | 17.4971 |                                     |
| ST25_IOT2018 <sup>+</sup> | 109.5335 | 17.4566 |                                     | ST28_IOT2020              | 109.4557 | 17.8746 |                                     |
| ST26_IOT2018 <sup>×</sup> | 111.9828 | 17.5548 |                                     | ST29_IOT2020              | 110.8167 | 17.3048 |                                     |
| ST27_IOT2018              | 112.1983 | 17.9557 |                                     | ST30_IOT2020 <sup>+</sup> | 111.2129 | 17.3080 |                                     |
| ST28_IOT2018              | 112.1905 | 18.0945 |                                     | ST31_IOT2020              | 113.3927 | 18.4421 |                                     |
| ST29_IOT2018              | 112.1814 | 18.2720 |                                     | ST32_IOT2020              | 112.2426 | 19.2424 |                                     |
| ST30_IOT2018              | 111.2530 | 18.2759 |                                     | ST33_IOT2020              | 111.8977 | 19.3652 |                                     |
| ST31_IOT2018              | 109.3984 | 17.8267 |                                     | ST34_IOT2020              | 111.8884 | 19.3645 |                                     |
| ST32_IOT2018              | 108.8217 | 17.9049 |                                     | ST35_IOT2020              | 113.7603 | 19.3111 |                                     |
|                           |          |         |                                     | ST36_IOT2020              | 120.2404 | 25.9396 |                                     |

注：<sup>×</sup>：与 COCTS 数据实际匹配的站位；<sup>+</sup>：与 MODIS 数据实际匹配的站位。

表2 中国和欧洲近海海域现场实测主要水色波段遥感反射率和近红外波段气溶胶光学厚度统计信息  
Table 2 Statistics of in-situ remote-sensing reflectance and aerosol optical thickness in offshore waters around China and Europe

| 航次/SeaPRISM 位置                    | 参数                           | 单位        | 数值范围(平均值/中值)                   | 标准偏差   |
|-----------------------------------|------------------------------|-----------|--------------------------------|--------|
| 海上试验<br>IOT2018 &<br>IOT2020      | 412 nm 遥感反射率 $R_{rs412}$     | $sr^{-1}$ | 0.002—0.022 (0.0084/0.0086)    | 0.0033 |
|                                   | 443 nm 遥感反射率 $R_{rs443}$     |           | 0.0023—0.0223 (0.0071/0.0069)  | 0.0033 |
|                                   | 490 nm 遥感反射率 $R_{rs490}$     |           | 0.0031—0.0241 (0.0061/0.0052)  | 0.0037 |
|                                   | 565 nm 遥感反射率 $R_{rs565}$     |           | 0.0011—0.0243 (0.0026/0.0015)  | 0.0040 |
|                                   | 670 nm 遥感反射率 $R_{rs670}$     |           | 0—0.0102 (0.0006/0.0002)       | 0.0014 |
|                                   | 870 nm 气溶胶光学厚度 $AOT_{870}^*$ | —         | 0.051—0.2406 (0.1357/0.1353)   | 0.0539 |
| 中国东海洞头近岸海域<br>SeaPRISM_Dongtou    | 412 nm 遥感反射率 $R_{rs412}$     | $sr^{-1}$ | 0.0001—0.0122 (0.0071/0.0078)  | 0.0027 |
|                                   | 443 nm 遥感反射率 $R_{rs443}$     |           | 0.0003—0.0155 (0.0091/0.01)    | 0.0037 |
|                                   | 490 nm 遥感反射率 $R_{rs490}$     |           | 0.0003—0.0253 (0.0131/0.0146)  | 0.0050 |
|                                   | 565 nm 遥感反射率 $R_{rs565}$     |           | 0.0017—0.0308 (0.0172/0.0187)  | 0.0071 |
|                                   | 667 nm 遥感反射率 $R_{rs667}$     |           | 0.0001—0.0223 (0.0065/0.0054)  | 0.0047 |
|                                   | 870 nm 气溶胶光学厚度 $AOT_{870}^*$ | —         | 0.0245—0.639 (0.158/0.1328)    | 0.0860 |
| 欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域<br>SeaPRISM_Venise | 412 nm 遥感反射率 $R_{rs412}$     | $sr^{-1}$ | 6.26E-6—0.0227 (0.0052/0.0044) | 0.0028 |
|                                   | 443 nm 遥感反射率 $R_{rs443}$     |           | 0.0008—0.0236 (0.0057/0.0048)  | 0.0032 |
|                                   | 490 nm 遥感反射率 $R_{rs490}$     |           | 1.21E-6—0.0278 (0.0075/0.0064) | 0.0042 |
|                                   | 551 nm 遥感反射率 $R_{rs551}$     |           | 4.45E-6—0.0346 (0.0072/0.0060) | 0.0043 |
|                                   | 667 nm 遥感反射率 $R_{rs667}$     |           | 8.01E-6—0.0140 (0.0014/0.0011) | 0.0012 |
|                                   | 870 nm 气溶胶光学厚度 $AOT_{870}^*$ | —         | 0.0049—0.639 (0.1236/0.1022)   | 0.0875 |

注: 现场试验使用的太阳光度计和SeaPRISM自动太阳光度计在近红外的波段均为870 nm。

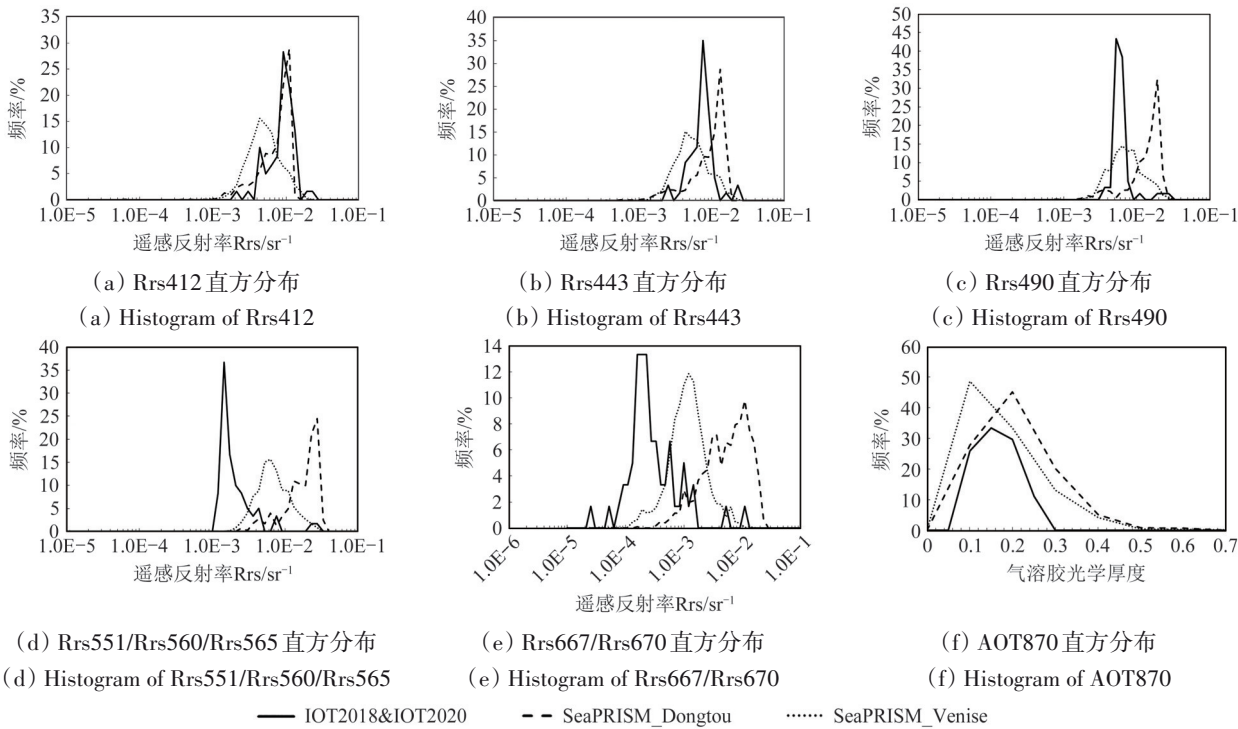


图1 海上试验(IOT2018 & IOT2020,实线)、中国东海SeaPRISM(SeaPRISM\_Dongtou,虚线)和欧洲亚得里亚海SeaPRISM(SeaPRISM\_Venise,点线)获取的各个波段遥感反射率和870 nm 气溶胶光学厚度的直方分布图

Fig.1 Histogram of remote-sensing reflectance at various wavelengths and aerosol optical thickness @ 870 nm collected by field campaigns (IOT2018&IOT2020, solid lines), SeaPRISM deployed in the East China Sea (SeaPRISM\_Dongtou, dashed lines) and SeaPRISM deployed in the northern Adriatic Sea (SeaPRISM\_Venise, dotted lines)

## 2.1 卫星遥感产品

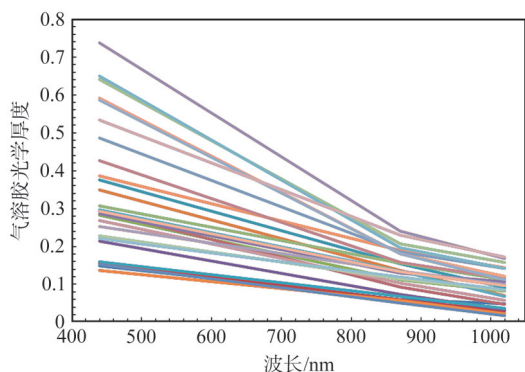
HY-1C 卫星 COCTS L2A 数据产品从中国海洋卫星数据服务系统 (osdds.nsoas.org.cn[2021-08-01]) 获取。该产品为标准业务化产品, 其包含的主要地球物理产品为遥感反射率 ( $R_{rs}$ ) 和气溶胶光学厚度 (AOT)。本文使用的数据包括 IOT2018 和 IOT2020 海上试验期间、2019 年 3 月至 2021 年 6 月期间中国东海洞头近岸海域以及 2018 年 9 月至 2021 年 6 月期间欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域的 L2A 级 COCTS 数据, 其标称的空间分辨率为 1.1 km; 此外, 本文还使用了 NASA 发布的 AQUA 卫星 MODIS 的二级数据产品作为参考数据, 该数据从 NASA 官方网站 (oceancolor.gsfc.nasa.gov[2021-08-01]) 获取, 同样包括  $R_{rs}$  和 AOT, 标称的空间

分辨率为 1 km。AQUA MODIS 水色遥感数据是目前持续时间最长、应用最广泛的水色遥感产品之一 (McClain, 2009; Joo 等, 2015; Glover 等, 2018)。

## 2.2 现场实测数据

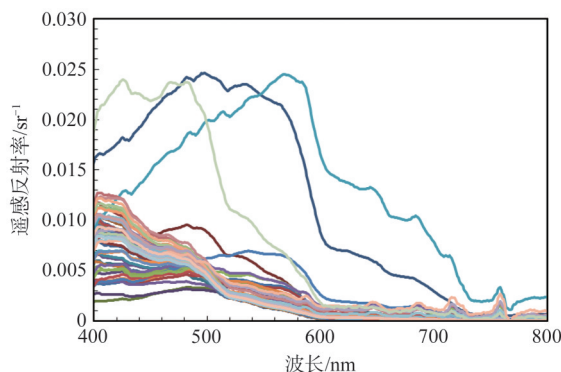
### 2.2.1 海上试验现场观测与数据处理方法

国家海洋技术中心和国家卫星海洋应用中心分别于 2018 年 9—10 月和 2020 年 7—8 月, 联合在中国东海和南海海域组织实施了 HY-1C 卫星和 HY-1D 卫星的首次在轨测试试验, 获取了包括遥感反射率和气溶胶光学厚度在内的现场实测数据。图 2 给出了中国南海和东海海上试验的遥感反射率光谱和气溶胶光学厚度光谱。



(a) 海上试验现场实测气溶胶光学厚度

(a) *In-situ* aerosol optical thickness



(b) 海上试验现场实测遥感反射率

(b) *In-situ* remote-sensing reflectance

图 2 中国东海和南海海上试验(IOT2018 和 IOT2020)获取的气溶胶光学厚度光谱和遥感反射率光谱

Fig.2 *In-situ* aerosol optical thickness and remote-sensing reflectance during field campaigns in the East and South China Sea, i.e. IOT2018 and IOT2020

遥感反射率的现场测量使用 Satlantic 公司的海面光谱仪 (HYPERAS), 测量几何为  $[\theta, \Phi] = [40^\circ, 135^\circ]$ , 以尽量避开太阳耀斑 (glint), 其中  $40^\circ$  为仪器探头与海面法线方向夹角  $\theta$ ,  $135^\circ$  为仪器观测平面与太阳入射平面的夹角  $\Phi$  (图 3)。气溶胶光学厚度的测量使用 Microtops II 太阳光度计。遥感反射率、气溶胶光学厚度观测和数据处理均参考 NASA SeaWiFS 海洋光学规范 (Mueller 等, 2003) 进行, 其中遥感反射率计算时用到的海面反射率采用 Ruddick 等 (2006) 推荐的方法。

遥感反射率计算方法如下:

$$T_{rs}(\lambda) = \frac{L_t(\lambda)}{E_s(\lambda)} \quad (1)$$

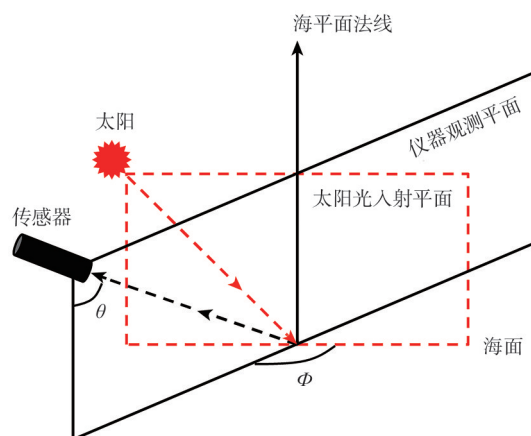


图 3 海面光谱仪现场测量遥感反射率的观测几何

Fig.3 Observation geometry of spectroradiometer determining remote-sensing reflectance

$$S_{rs}(\lambda) = \frac{L_i(\lambda)}{E_s(\lambda)} \quad (2)$$

$$R_{rs}(\lambda) = R_{rs}(\lambda) - \rho \cdot S_{rs}(\lambda) \quad (3)$$

式中,  $L_i(\lambda)$ 、 $L_r(\lambda)$ 和 $E_s(\lambda)$ 分别为海面光谱仪观测得到的海面上行辐亮度、天空下行辐亮度和天空下行辐照度, 而 $T_{rs}(\lambda)$ 和 $S_{rs}(\lambda)$ 分别为海面总反射率和天空下行光反射率。 $\rho$ 为海面反射率。

### 2.2.2 SeaPRISM 太阳光度计观测与数据处理方法

SeaPRISM 太阳光度计自动观测包括太阳直射数据、天空扫描数据、海面光谱数据在内的3类数据, 采用与海面光谱仪类似的观测几何和数据处理方法, 不同的是它的天空下行辐照度数据是根据测量得到的太阳直射辐照度观测数据和辅助参数(臭氧含量等)计算得到而不是实际测量得到的, 详细的数据处理方法可参考 Zibordi 等

(2004和2009b)和Jia等(2020)。图4分别展示了中国东海2019年3月至2021年6月、欧洲亚得里亚海2018年9月至2021年6月之间的遥感反射率和气溶胶光学厚度光谱的部分数据。可以看出, 中国东海的气溶胶光学厚度变化范围比欧洲亚得里亚海要大; 中国东海和欧洲亚得里亚海的遥感反射率均具有显著的二类水体光谱特征, 但中国东海的遥感反射率在565 nm具有更为显著的峰值, 即565 nm左右两侧呈现出快速的增大或减小, 而欧洲亚得里亚海的遥感反射率在490—551 nm范围内的变化要平缓的多, 峰值在490 nm、532 nm或551 nm都有可能出现, 甚至会出现平峰。这说明中国东海洞头近岸水体成分造成的光学特性变化规律性更明显, 而欧洲亚得里亚海威尼斯近岸水体则呈现更为复杂的变化(Zibordi等2004和2009b)。

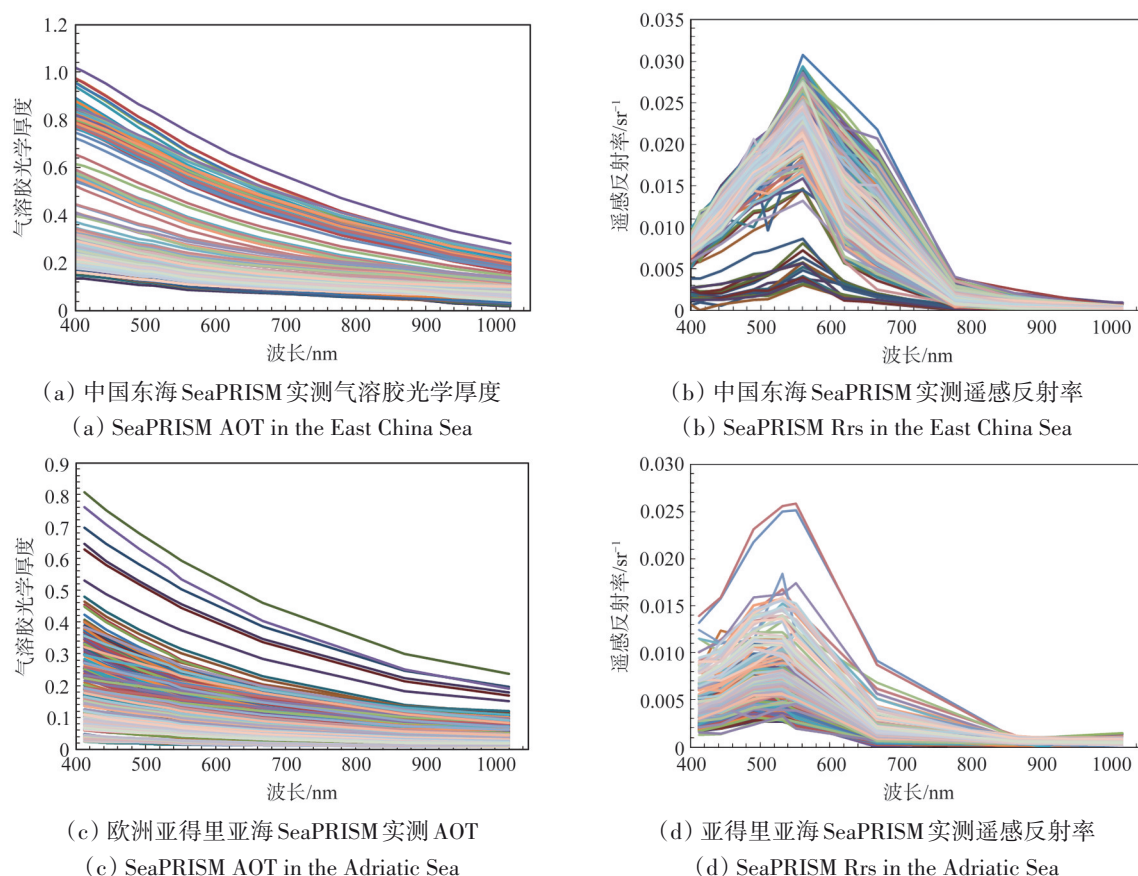


图4 SeaPRISM 获取的部分实测数据: 中国东海洞头近岸海域气溶胶光学厚度光谱和遥感反射率光谱, 欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域气溶胶光学厚度光谱和遥感反射率光谱

Fig.4 *In-situ* part of data collected by SeaPRISM sun-photometer. Aerosol optical thickness and remote-sensing reflectance in the East China Sea around Dongtou, and aerosol optical thickness and remote-sensing reflectance in the Northern Adriatic Sea around Venice in Europe

### 2.3 星地时空匹配方法

在利用现场实测数据对卫星遥感数据真实性检验之前,二者需要进行时空匹配(Bailey和Werdell, 2006; Han等, 2019),时空匹配准则为:(1)时间窗口 $\pm 1.0$  h, (2)以距离现场实测站点最近(距离不超过星下点分辨率或3 km)的卫星象元为中心的 $5 \times 5$ 象元(空间窗口)的数据纳入最终统计分析。

此外在 $5 \times 5$ 象元窗口内,只有满足以下条件的匹配数据为有效匹配数据:(1)参考波段(通常选择蓝绿波段)的遥感反射率的有效比例应不低

于50%;(2)参考波段的遥感反射率的空间均匀性满足其变异系数(标准偏差/平均值)不高于0.3;(3)遥感数据象元处太阳天顶角不超过 $75^\circ$ 、观测天顶角不超过 $60^\circ$ ;(4)对于遥感反射率,选择COCTS与实测数据中最邻近的波段进行匹配(各数据的波段配置见表3);(5)考虑二级产品标识(flag)对检验结果的影响,本文采用的flag(Bailey和Werdell, 2006)包括:ATMFAIL、LAND、STRAYLIGHT、HIGLINT、NAVWARN、NAVFAIL、PRODFAIL。

表3 HY-1C卫星COCTS L2A产品和AQUA卫星MODIS二级产品的光谱波段与各种现场实测数据的波段匹配

Table 3 Spectral bands of HY-1C COCTS L2A and AQUA MODIS L2 products matched with various in-situ data

| COCTS Spectral Bands Matched with in-situ data/nm |                     |                      |                     | MODIS Spectral Bands Matched with in-situ data/nm |                    |                      |                     |
|---------------------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------------------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| HY-1C COCTS                                       | IOT2018&<br>IOT2020 | SeaPRISM_<br>Dongtou | SeaPRISM_<br>Venise | AQUA MODIS                                        | OT2018&<br>IOT2020 | SeaPRISM_<br>Dongtou | SeaPRISM_<br>Venise |
| 412                                               | 412                 | 412                  | 412                 | 412                                               | 412                | 412                  | 412                 |
| 443                                               | 443                 | 443                  | 443                 | 443                                               | 443                | 443                  | 443                 |
| —                                                 | —                   | —                    | —                   | 469                                               | 469                | —                    | —                   |
| 490                                               | 490                 | 490                  | 490                 | 488                                               | 488                | 490                  | 490                 |
| 520                                               | 520                 | 510                  | 532                 | 531                                               | 531                | 510                  | 532                 |
| —                                                 | —                   | —                    | —                   | 547                                               | 547                | —                    | —                   |
| 565                                               | 565                 | 560                  | 551                 | 555                                               | 555                | 560                  | 551                 |
| —                                                 | —                   | —                    | —                   | 645                                               | 645                | —                    | —                   |
| 670                                               | 670                 | 667                  | 667                 | 667                                               | 667                | 667                  | 667                 |
| —                                                 | —                   | —                    | —                   | 678                                               | 678                | —                    | —                   |
| 865                                               | 870                 | 870                  | 870                 | 865                                               | 870                | 870                  | 870                 |

得到所有的有效匹配数据后,采用平均相对百分比偏差RPD(Relative Percentage Difference)和平均绝对百分比偏差APD(Absolute Percentage Difference)评价卫星遥感数据的质量。RPD主要用于刻画被检验数据相对于检验源数据的变化趋势,而APD则主要用于刻画被检验数据相对于检验源数据的准确度。

$$RPD = 100\% \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Y_i - X_i}{X_i} \quad (4)$$

$$APD = 100\% \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_i - X_i}{X_i} \right| \quad (5)$$

始终,  $X_i - Y_i$ 为一组匹配数据,  $X_i$ 为检验源数据(实测数据),  $Y_i$ 为被检验数据(遥感产品),  $N$ 为匹配数据量。

## 3 结果与讨论

### 3.1 遥感反射率检验结果

#### 3.1.1 基于海上试验数据的检验结果

基于IOT2018和IOT2020海上试验现场实测的遥感反射率数据,共发现5组有效的与COCTS L2A产品的匹配数据,全部在中国南海区域(具体可见表1中标注“×”的站位)。从图5(a)的对比结果可以看出,COCTS遥感反射率与现场实测的遥感反射率一致性较好,都围绕在1:1线附近。从表4可以发现,相比于现场实测数据,COCTS的遥感反射率出现高估。在蓝光波段(412 nm、443 nm、490 nm),RPD在24.4%—27.4%(平均值25.6%),APD在50%—69.7%(平均值62.7%);而

在绿光波段 (520 nm、565 nm) 高估现象加重, RPD 在 83.1%—91.2% (平均值 87.2%), APD 在 92.4%—94.9% (平均值 93.7%); 到了红光波段 (670 nm), 出现严重高估, RPD 超过了 200%, APD 则超过了 300%。总体来看, COCTS 的遥感反射率相对于现场实测数据高估了 90.82% (所有波段 RPD 平均值), 总体误差为 120.43% (所有波段 APD 平均值)。如果放松时空匹配的条件 (即不考虑空间均一性和有效象元比例, 观测天顶角不超

过 65°), 除 Rrs565 之外, 有效匹配数据显著增加约 2 倍, 达到 15 组左右 (表 4 括号内的匹配数据量), 其中 1 组在东海而其余全部在南海。在这种情况下, COCTS 的遥感反射率与现场实测数据依然保持很好的一致性, 见图 5 (b): 总体平均高估了 60.66% (所有波段 RPD 平均值), 总体平均误差为 92.37% (所有波段 APD 平均值), 详见表 3 括号内的统计数字。二级产品标识对 COCTS 遥感反射率与海上试验数据的匹配结果没有产生影响。

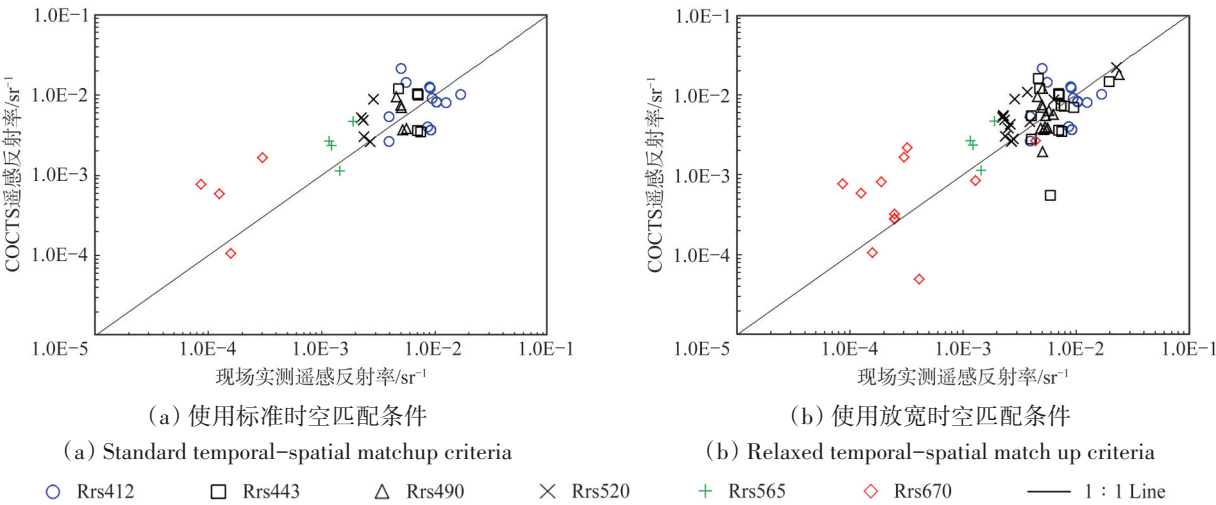


图 5 COCTS L2A 数据的遥感反射率与 IOT2018 和 IOT2020 海上试验现场实测数据的对比散点  
Fig.5 Scatter plot between remote-sensing reflectance given in COCTS L2A data and in-situ data collected in SIOT2018 and IOT2020 cruises

表 4 基于 IOT2018 和 IOT2020 海上试验现场实测数据对 COCTS L2A 遥感反射率的检验统计结果  
Table 4 Statistics of validation of COCTS L2A remote-sensing reflectance as compared with in-situ data collected in IOT2018 and IOT2020 cruises

| 统计参数 | Rrs412           | Rrs443           | Rrs490           | Rrs520           | Rrs565           | Rrs670             | 平均值                |
|------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| N    | 5<br>(15)        | 5<br>(16)        | 5<br>(16)        | 5<br>(16)        | 4<br>(4)         | 5<br>(13)          | —                  |
| RPD  | 24.4%<br>(16.7%) | 27.4%<br>(10.1%) | 25.1%<br>(5.8%)  | 91.2%<br>(75.7%) | 83.1%<br>(83.1%) | 293.7%<br>(195.3%) | 90.8%<br>(64.4%)   |
| APD  | 69.7%<br>(63.1%) | 68.2%<br>(54.9%) | 50.0%<br>(36.0%) | 92.4%<br>(77.1%) | 94.9%<br>(94.9%) | 347.4%<br>(228.3%) | 120.4%<br>(92.40%) |

注: 括号内给出了放松了时空匹配条件后的统计结果。

通过对同期的 AQUA 卫星 MODIS 的二级数据的遥感反射率的真实性检验发现, MODIS 的遥感反射率共有 9 组有效匹配数据, 其中东海 3 组、南海 6 组 (具体可见表 1 中标注 “+” 的站位), 它们之间一致性优于 COCTS, 且 RPD 和 APD 均优于 COCTS。具体来讲, MODIS 的遥感反射率更靠近与现场实测数据的 1:1 线, 蓝光波段 (412 nm、443 nm、469 nm、488 nm)、绿光波段 (531 nm、547 nm、555 nm) 和红光波段 (645 nm、667 nm、

678 nm) 的遥感反射率的 RPD 平均值分别为 12.1%、7.8% 和 54.6%, 而其 APD 平均值分别为 15.0%、17.1% 和 91.8%; 在放松时空匹配的条件 (不考虑空间均一性和有效象元比例, 观测天顶角不超过 65°) 之后, MODIS 数据与现场实测数据的有效匹配数据达到 17 组, 增加的匹配数据全部出现在南海。蓝光波段、绿光波段和红光波段的遥感反射率的 RPD 平均值分别为 22.1%、32.2% 和 231.6%, 而其 APD 平均值分别为 26.0%、37.9% 和

261.0%。

### 3.1.2 基于 SeaPRISM 观测数据的检验结果

(1) 中国东海 SeaPRISM 数据。基于中国东海洞头近岸海域 SeaPRISM 的现场实测数据, 共找到 21 组与 HY-1C 卫星 COCTS 的 L2A 遥感反射率有效匹配的数据 (其中 412 nm 和 443 nm 分别为 13 组和 16 组), 如图 6 (a) 所示。可以看出 COCTS 的遥感反射率与实测数据存在较好的一致性, 但整体上要低于现场实测数据 (表 4)。具体来讲, COCTS 蓝光波段遥感反射率相比于实测数据的 RPD 和 APD 分别为 -40.2% 和 61.6%, 绿光波段的 RPD 和 APD 分别为 -22.9% 和 30.1%, 红光波段的 RPD 和 APD 分别为 -36.7% 和 46.0%; 总体上,

COCTS 遥感反射率相比于实测数据的 RPD 和 APD 在主要水色波段的平均值分别为 -33.8% 和 48.5%。在应用 COCTS 二级产品标识筛选后, 有效匹配数据大幅较少, 仅剩余 13 组匹配数据 (其中 412 nm 和 443 nm 分别为 9 组和 10 组), 此时, COCTS 遥感反射率与实测数据总体一致性变化不大, 但在蓝光波段的 RPD 和 APD 变得更好, 所有波段的 RPD 和 APD 平均值分别为 -23.0% 和 47.1%; 在放松时空匹配条件 (不考虑空间均一性和有效象元比例) 之后, 有效匹配数据量增加幅度不大, 只增加 3 组, 见图 6 (b), COCTS 遥感发射率相比于实测数据的 RPD 和 APD 在主要水色波段的平均值变化也不大, 它们分别为 -32.4% 和 46.3%, 详见表 5 括号内的统计数字。

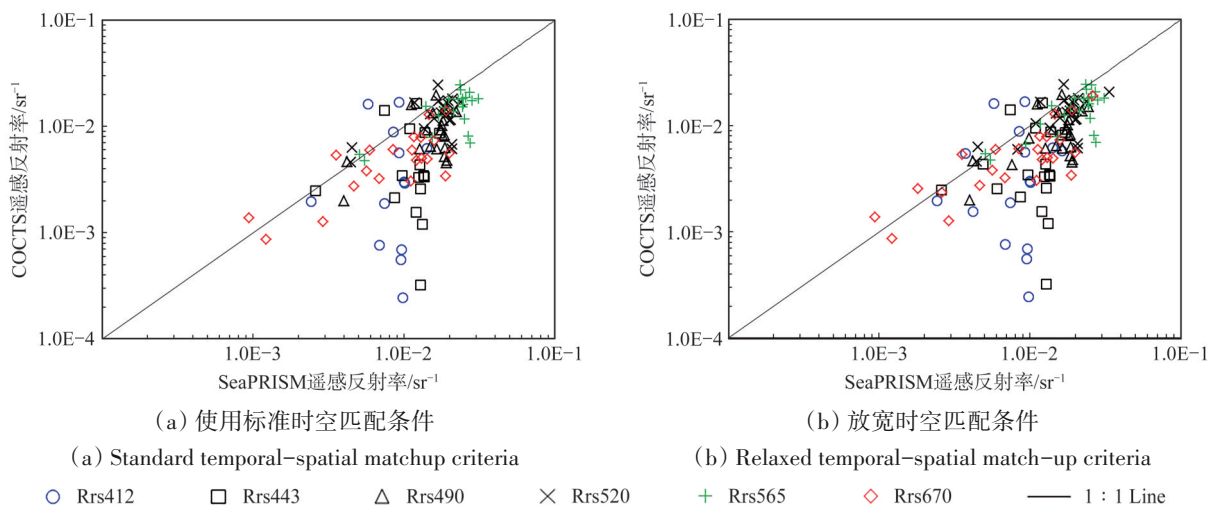


图 6 COCTS L2A 数据的遥感反射率与中国东海洞头近岸海域的 SeaPRISM 现场实测数据的对比散点  
Fig.6 Scatter plot between remote-sensing reflectance given in COCTS L2A data and in-situ data collected by SeaPRISM in the East China Sea around Dongtou

表 5 基于中国东海洞头近岸海域附近的 SeaPRISM 现场实测数对 COCTS L2A 遥感反射率的检验统计结果  
Table 5 Statistics of validation of COCTS L2A remote-sensing reflectance as compared with in-situ data collected by SeaPRISM in the East China Sea around Dongtou

| 统计参数     | Rrs412             | Rrs443             | Rrs490             | Rrs520             | Rrs565             | Rrs670             | 平均值                |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <i>N</i> | 13<br>(36)         | 16<br>(45)         | 21<br>(53)         | 21<br>(53)         | 21<br>(53)         | 21<br>(53)         | —                  |
| RPD      | -33.3%<br>(-29.6%) | -47.5%<br>(-47.0%) | -39.7%<br>(-37.9%) | -17.4%<br>(-17.2%) | -28.4%<br>(-27.8%) | -36.7%<br>(-33.9%) | -33.8%<br>(-32.2%) |
| APD      | 74.7%<br>(73.8%)   | 63.3%<br>(61.4%)   | 46.8%<br>(45.1%)   | 29.9%<br>(30.7%)   | 30.3%<br>(29.6%)   | 46.0%<br>(44.1%)   | 48.5%<br>(47.4%)   |

注: 括号内给出了放松了时空匹配条件后的统计结果。

对同期的 AQUA 卫星 MODIS 的二级数据的遥感反射率的真实性检验发现, MODIS 的遥感反射率与中国东海洞头近岸海域 SeaPRISM 共有 48 组

有效匹配数据 (412 nm 为 47 组), 它们之间一致性很好, 其 RPD 和 APD 均优于 COCTS。具体来讲, MODIS 的遥感反射率更靠近与现场实测数据

的 1 : 1 线, 蓝光波段 (412 nm、443 nm、488 nm)、绿光波段 (531nm、555 nm) 和红光波段 (667 nm) 的遥感反射率的 RPD 平均值分别为-1.1%、-14.5% 和 1.7%, 而其 APD 平均值分别为 19.8%、16.4% 和 16.1%; 在放松时空匹配的条件 (不考虑空间均一性和有效象元比例, 观测天顶角不超过 65°) 之后, 有效匹配数据的数量及其 RPD 和 APD 的平均值没有变化。值得一提的是, MODIS 的二级产品标识的应用会使的有效匹配数据锐减到 6 组, 此时, 蓝光波段、绿光波段和红光波段的遥感反射率的 RPD 和 APD 平均值不减反增。

(2) 亚得里亚海 SeaPRISM 数据。基于欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域 SeaPRISM 的现场实测数据, 共发现超过 40 组与 HY-1C 卫星 COCOTS 的 L2A 遥感反射率的有效匹配数据 (其中 565 nm 为 24 组), 如图 7 (a) 所示。可以看出, 除 670 nm 之外, COCTS 的遥感反射率与实测数据存在较好的一致

性, 但 COCTS 的  $R_{rs670}$  明显低于实测数据 (表 6)。具体来讲, COCTS 蓝光波段 (412 nm、443 nm、490 nm) 遥感反射率相比于实测数据的 RPD 和 APD 的平均值分别为 34.2% 和 85.8%, 绿光波段 (520 nm、565 nm) 的 RPD 和 APD 的平均值分别为-7.0% 和 38.1%, 而红光波段的 RPD 和 APD 分别为-51.1% 和 66.6%; 总体上, COCTS 遥感反射率相比于实测数据的 RPD 和 APD 在主要水色波段的平均值分别为-6.2% 和 66.7%。COCTS 二级产品标识的应用并没有改变有效匹配数据量。在放松时空匹配的条件之后, 有效匹配数据量有所增加约 50% (如  $R_{rs490}$  匹配数据从 45 组增加值 72 组), 一致性态势没有明显变化, 但离散更大, 见图 7 (b)。COCTS 遥感发射率相比于实测数据的 RPD 和 APD 在蓝光、绿光和红光波段的平均值变化分别为 22.9% 和 84.2%、-7.6% 和 42.3%、78.5% 和 192.8%, 详见表 5 括号内统计数字。

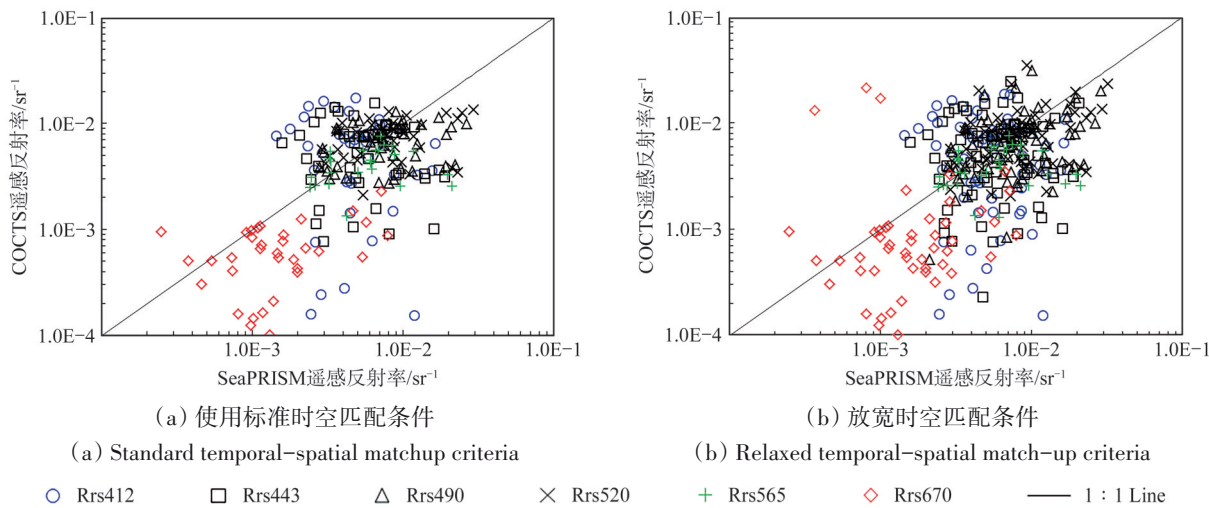


图 7 COCTS L2A 数据的遥感反射率与欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域 SeaPRISM 现场实测数据的对比散点  
Fig.7 Scatter plot between remote-sensing reflectance given in COCTS L2A data and in-situ data collected by SeaPRISM in the Adriatic Sea around Venice in Europe

表 6 基于欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域 SeaPRISM 现场实测数对 COCTS L2A 遥感反射率的检验统计结果  
Table 6 Statistics of validation of COCTS L2A remote-sensing reflectance as compared with in-situ data collected by SeaPRISM in the Adriatic Sea around Venice in Europe

| 统计参数 | $R_{rs412}$        | $R_{rs443}$      | $R_{rs490}$      | $R_{rs520}$      | $R_{rs565}$        | $R_{rs670}$       | 平均值              |
|------|--------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| $N$  | 41<br>(62)         | 42<br>(65)       | 45<br>(72)       | 45<br>(72)       | 24<br>(31)         | 41<br>(59)        | —                |
| RPD  | 63.3%<br>(45.3%)   | 37.4%<br>(27.1%) | -2.1%<br>(-3.8%) | 5.2%<br>(8.7%)   | -19.3%<br>(-23.9%) | -51.3%<br>(78.5%) | 6.2%<br>(22.0%)  |
| APD  | 122.7%<br>(113.5%) | 90.4%<br>(88.6%) | 43.7%<br>(50.6%) | 42.5%<br>(49.1%) | 33.7%<br>(33.5%)   | 66.6%<br>(192.8%) | 66.7%<br>(88.3%) |

注: 括号内给出了放松了时空匹配条件后的统计结果。

通过对同期的 AQUA 卫星 MODIS 的二级数据的遥感反射率的真实性检验发现, MODIS 的遥感反射率与欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域 SeaPRISM 观测数据共有 341 组有效匹配数据 (667 nm 匹配数据 328 组), 它们之间一致性优于 COCTS, 且 RPD 和 APD 均优于 COCTS。具体来讲, MODIS 的遥感反射率更靠近与现场实测数据的 1:1 线, 蓝光波段 (412 nm、443 nm、488 nm)、绿光波段 (531 nm、555 nm) 和红光波段 (667 nm) 的遥感反射率的 RPD 平均值分别为 -6.3%、-18.6% 和 -28.8%, 而其 APD 平均值分别为 24.5%、20.3% 和 36.6%; 应用 MODIS 二级产品 flag 之后, 有效匹配数据降至 211 组, 二者一致性更好, 蓝光波段、绿光波段和红光波段的遥感反射率的 RPD 和 APD 平均值也比未使用 flag 之前更好, 分别为 -2.8% 和 21.6%、-18.5% 和 19.8%、-29.8% 和 35.5%。在放松时空匹配的条件 (不考虑空间均一性和有效象元比例, 观测天顶角不超过  $65^\circ$ ) 之后, MODIS 数据与现场实测数据的有效匹配数据增加到 400 组左右 (667 nm 为 382 组), 蓝光波段、绿光波段和红光波段的遥感反射率的 RPD 和 APD 平均值基本不变, 分别为 -6.1% 和 26.2%、-18.4% 和 21.4%、-27.8% 和 37.7%。

### 3.2 气溶胶光学厚度检验结果

#### 3.2.1 基于海上试验数据的检验结果

基于 IOT2018 和 IOT2020 海上试验现场实测的气溶胶光学厚度, 共找到 5 组与 COCTS L2A 数据匹配的匹配数据 (图 8, 黑色红色实心圆形)。可以明显看出, COCTS 的气溶胶光学厚度相比于现场实测数据出现整体性低估, RPD 为 -71.1%, 而 APD 为 71.1%。如果放松时空匹配的条件 (不考虑空间均一性和有效象元比例, 观测天顶角不超过  $65^\circ$ ), 有效匹配数据达到 13 组 (图 8, 黑色正方形), 除部分匹配数据更靠近 1:1 线之外, COCTS 气溶胶光学厚度整体低估的趋势没有改变但有所减弱, RPD 和 APD 分别为 -56.1% 和 56.1%。二级产品标识对 COCTS 气溶胶光学厚度与海上试验数据的匹配结果没有产生影响。

通过对同期 AQUA 卫星 MODIS 的二级数据的气溶胶光学厚度的真实性检验发现, MODIS 的气溶胶光学厚度与现场实测数据共有 9 组有效匹配数据, 它们一致性优于 COCTS, 且它们的 RPD 和

APD 均优于 COCTS。具体来讲, MODIS 气溶胶光学厚度相对于现场实测数据的 RPD 和 APD 分别为 22.4% 和 42.5%。在放松时空匹配的条件后, 有效匹配数据可增加至 17 组, RPD 和 APD 分别增大至 73.3% 和 84.8%。

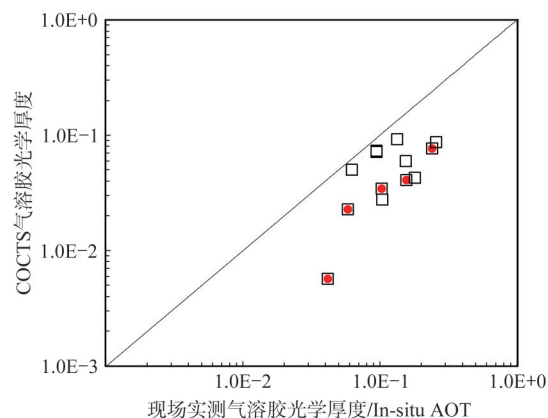


图 8 COCTS L2A 数据的气溶胶光学厚度与 IOT2018 和 IOT2020 海上试验现场实测数据的对比散点

Fig.8 Scatter plot between aerosol optical thickness given in COCTS L2A data and *in-situ* data collected in IOT2018 and IOT2020 cruises. Red solid circles: standard temporal-spatial match-up criteria are applied, black squares: temporal-spatial match-up criteria are relaxed

#### 3.2.2 基于 SeaPRISM 观测数据的检验结果

(1) 中国东海 SeaPRISM 数据。基于中国东海洞头近岸海域附近的 SeaPRISM 实测的气溶胶光学厚度, 共找到 67 组与 COCTS L2A 数据匹配的匹配数据 (图 9)。可以明显看出, COCTS 的气溶胶光学厚度相比于现场实测数据出现整体性低估, RPD 为 -59.9%, 而 APD 为 59.9%; 当应用 COCTS L2A 二级产品 flag 时, 与 SeaPRISM 实测数据的有效匹配数据减小到 29 组, 其低估趋势基本没有变化, RPD 和 APD 分别变为 -62.1% 和 62.1%, 变化也不大。如果放松时空匹配的条件 (不考虑空间均一性和有效象元比例, 观测天顶角不超过  $65^\circ$ ), 有效匹配数据达到 117 组, 除部分匹配数据更靠近 1:1 线之外, COCTS 气溶胶光学厚度整体低估的趋势没有改变但有所减弱, RPD 和 APD 分别为 -55.4% 和 56.0%。

通过对同期的 AQUA 卫星 MODIS 的二级数据的气溶胶光学厚度的真实性检验发现, MODIS 的气溶胶光学厚度与中国东海洞头近岸海域 SeaPRISM 共有 59 组有效匹配数据, 它们之间一致性较好,

更靠近 1:1 线, 且 RPD 和 APD 均优于 COCTS。具体来讲, MODIS 的气溶胶光学厚度与实测数据相比的 RPD 和 APD 分别为 8.5% 和 35.7%。值得一提的是, MODIS 的二级产品标识 (通遥感反射率) 的应用会使的有效匹配数据锐减到 5 组, MODIS 气溶胶光学厚度的 RPD 和 APD 分别为 -11.2% 和 21.8%; 而在放松时空匹配的条件后, 有效匹配数据可增加至 81 组, RPD 和 APD 分别增大至 4.4% 和 36.0%。

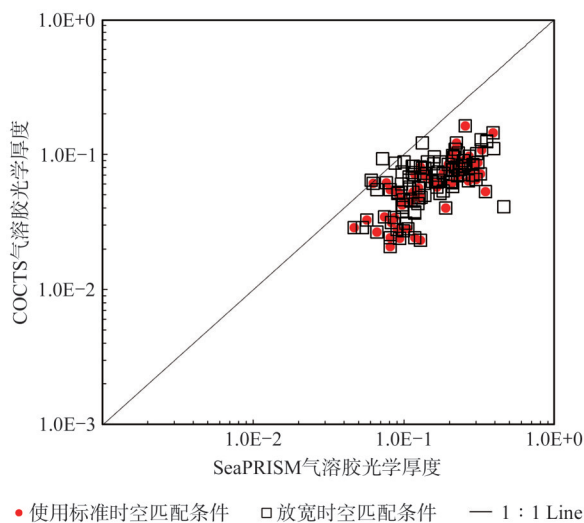


图9 COCTS L2A 数据的气溶胶光学厚度与中国东海洞头近岸海域 SeaPRISM 现场实测数据的对比散点

Fig.9 Scatter plot between aerosol optical thickness given in COCTS L2A data and in-situ data collected by SeaPRISM in the East China Sea around Dongtou. Red solid circles: standard temporal-spatial match-up criteria are applied, black squares: temporal-spatial match-up criteria are relaxed

(2) 欧洲亚得里亚海 SeaPRISM 数据。基于欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域 SeaPRISM 实测的气溶胶光学厚度, 共找到 45 组与 COCTS L2A 数据匹配的匹配数据 (图 10)。可以明显看出, COCTS 的气溶胶光学厚度相比于现场实测数据具有较好的一致性, 但出现整体性的高估, RPD 为 88.4%, 而 APD 为 107.6%; 如果放松时空匹配的条件 (不考虑空间均一性和有效象元比例, 观测天顶角不超过  $65^\circ$ ), 有效匹配数据达到 73 组, COCTS 气溶胶光学厚度整体高估的趋势没有改变, RPD 和 APD 分别为 83.2% 和 100.9%。二级产品标识对 COCTS 气溶胶光学厚度与 SeaPRISM 实测数据的匹配结果没有产生影响。

通过对同期的 AQUA 卫星 MODIS 的二级数据的气溶胶光学厚度的真实性检验发现, MODIS 的

气溶胶光学厚度与欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域 SeaPRISM 共有 348 组有效匹配数据, 它们之间一致性较好但存在显著高估的趋势, MODIS 的气溶胶光学厚度与实测数据相比的 RPD 和 APD 分别为 188.4% 和 188.4%。值得一提的是, MODIS 的二级产品 flag 的应用会使的有效匹配数据锐减到 217 组, MODIS 气溶胶光学厚度高估的趋势没有变化, 其 RPD 和 APD 分别为 176.9% 和 176.9%; 而在放松时空匹配的条件后, 有效匹配数据可增加至 400 组, RPD 和 APD 分别增大至 213.2% 和 213.2%。

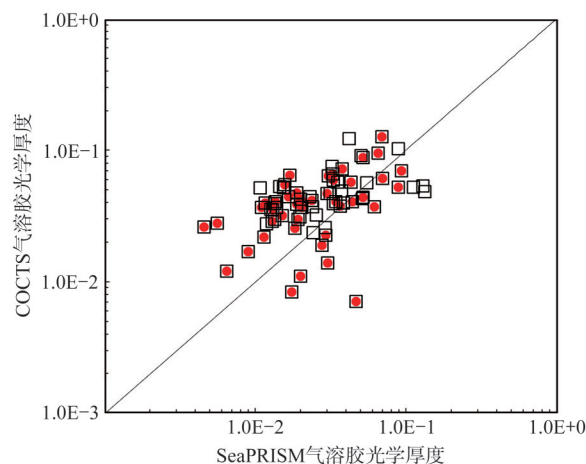


图10 COCTS L2A 数据的气溶胶光学厚度与欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域 SeaPRISM 现场实测数据的对比散点  
Fig.10 Scatter plot between aerosol optical thickness given in COCTS L2A data and in-situ data collected by SeaPRISM in the Adriatic Sea around Venice in Europe. Red solid circles: standard temporal-spatial match-up criteria are applied, black squares: temporal-spatial match-up criteria are relaxed

### 3.3 COCTS L2A 产品总体评价与比对

图 11 给出了 COCTS L2A 产品的 490 nm、565 nm 和 670 nm 遥感反射率以及气溶胶光学厚度在不同海域与现场实测数据的比对结果 (严格匹配但不考虑二级产品标识影响)。表 7 给出了相应的统计结果及其与同期 MODIS 的验证结果。

可以看出, COCTS 的遥感反射率在蓝光波段 (490 nm) 与实测数据不论总体上还是在不同海域均具有较好一致性, 较为均衡的分布在 1:1 线两边。两者 RPD 和 APD 不同海域的平均值分别为 -5.6% 和 46.8%, 表明 COCTS 在蓝光波段有轻微低估。在绿光波段 (565 nm), 两者仍表现出较好的

一致性，但 COCTS 在不同海域的表现不一致，如相对海上试验数据（中国东海和南海）高估，而在欧洲亚德里亚海威尼斯近岸海域，两者 RPD 和 APD 在不同海域的平均值分别为 11.8% 和 53.0%。

而对于红光波段（670 nm），COCTS 总体上存在低估现象，且在不同海域的均出现明显的低估，二者 RPD 和 APD 不同海域的平均值分别为 -51.3% 和 173.9%。

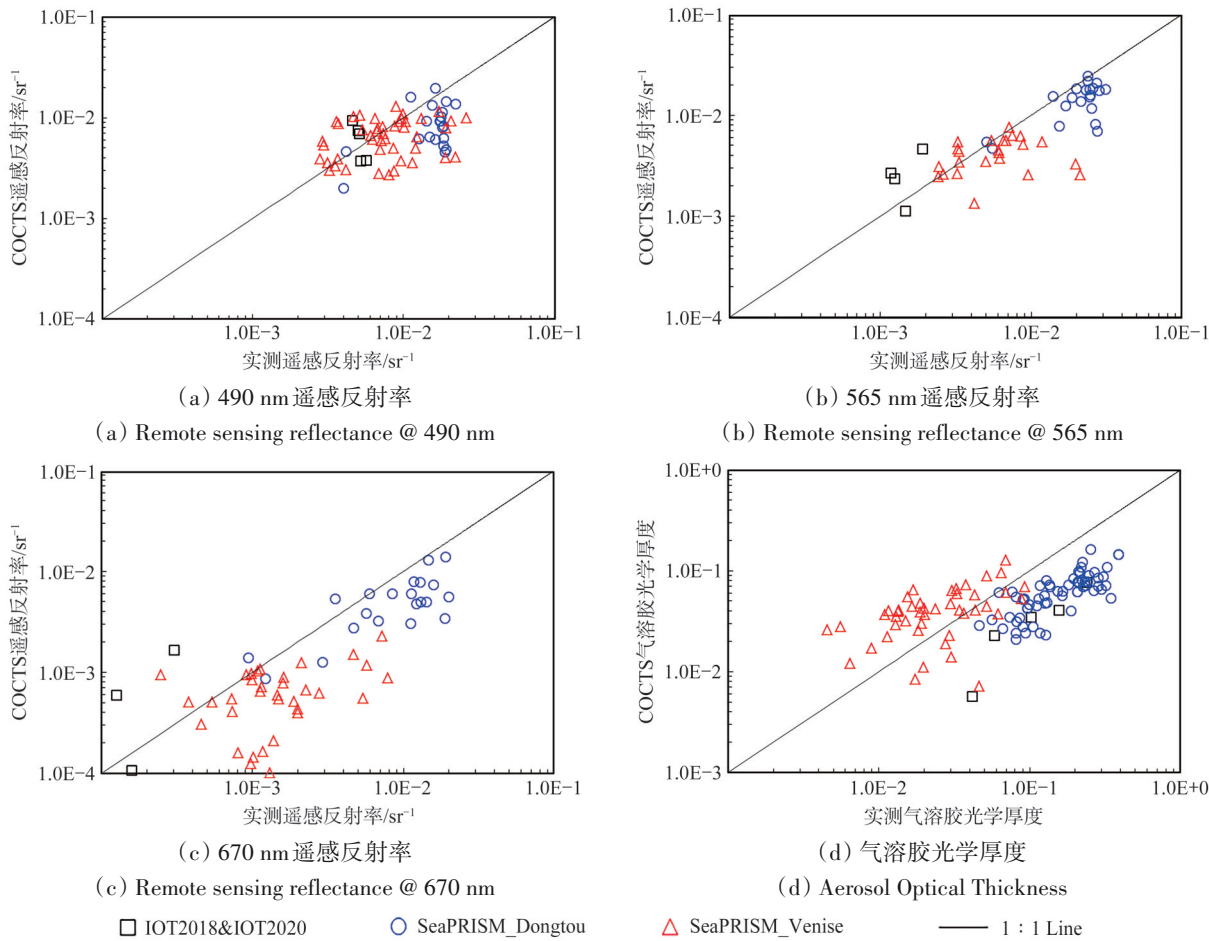


图 11 COCTS L2A 的遥感反射率和气溶胶光学厚度产品在中国和欧洲近海不同海域(IOT2018&IOT2020、SeaPRISM\_Dongtou 和 SeaPRISM\_Venise)与实测数据的比对散点

Fig.11 Scatter plot between COCTS L2A products and in-situ measurements in various region across China and Europe (IOT2018&IOT2020, SeaPRISM\_Dongtou and SeaPRISM\_Venise)

表 7 基于中国和欧洲近海不同海域现场实测数对 COCTS L2A 遥感反射率和气溶胶光学厚度的检验统计结果  
Table 7 Statistics of validation of COCTS L2A remote-sensing reflectance and aerosol optical thickness as compared with in-situ data collected in various regions across China and Europe

| 统计参数 | 解决/SeaPRISM 位置  | Rrs490        | Rrs565         | Rrs670         | AOT            |
|------|-----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| RPD  | IOT2018&IOT2020 | 25.1%(10.3%)  | 83.1%(1.2%)    | 392.1%(92.6%)  | -71.1%(22.4%)  |
|      | Dongtou         | -39.7%(-4.1%) | -28.4%(-14.5%) | -36.7%(1.7%)   | -59.9%(8.5%)   |
|      | Venise          | -2.1%(-15.8%) | -19.3%(-21.2%) | -51.3%(-28.8%) | 88.4%(188.4%)  |
|      | Average         | -5.6%(-3.2%)  | 11.8%(-11.5%)  | 101.4%(21.8%)  | -14.2%(73.1%)  |
|      |                 |               |                |                |                |
| APD  | IOT2018&IOT2020 | 50.0%(12.9%)  | 94.9%(15.3%)   | 409.2%(111.7%) | 71.1%(35.7%)   |
|      | Dongtou         | 46.8%(13.0%)  | 30.3%(16.4%)   | 46.0%(16.1%)   | 59.9%(42.5%)   |
|      | Venise          | 43.7%(18.4%)  | 33.7%(22.9%)   | 66.6%(36.6%)   | 107.6%(188.4%) |
|      | Average         | 46.8%(14.8%)  | 53.0%(18.2%)   | 173.9%(54.8%)  | 79.5%(88.9%)   |
|      |                 |               |                |                |                |

注：括号内的数字为同期 MODIS 的检验统计结果。

至于气溶胶光学厚度, COCTS 在中国近海(海上试验和洞头近岸海域)存在显著的低估现象,但在欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域则出现高估趋势,总体上来看,二者 RPD 和 APD 不同海域的平均值分别为-14.2%和 79.5%。

相比于 MODIS 二级产品的遥感反射率和气溶胶光学厚度, COCTS 与实测数据的偏差更大一些特别是在蓝光和红光波段。而 COCTS 气溶胶光学厚度总体上比 MODIS 与实测数据更接近,但 COCTS 在不同海域的趋势不同,如在中国近海出现低估现象,而在欧洲近海则出现高估现象;但

是 MODIS 的高估现象则一直存在,特别是在欧洲亚得里亚海威尼斯近岸海域高估现象特别严重(RPD 和 APD 均为 188.4%)。

图 12 给出了 COCTS L2A 产品以及 MODIS 二级产品的遥感反射率在不同海域的平均值与现场实测数据的平均值的比对结果(严格匹配但不考虑二级 flag 标识影响)。可以看出, COCTS 的遥感反射率光谱形状与现场实测基本一致,但中国东海洞头近岸海域的光谱差异较大,即前者明显高于后者。

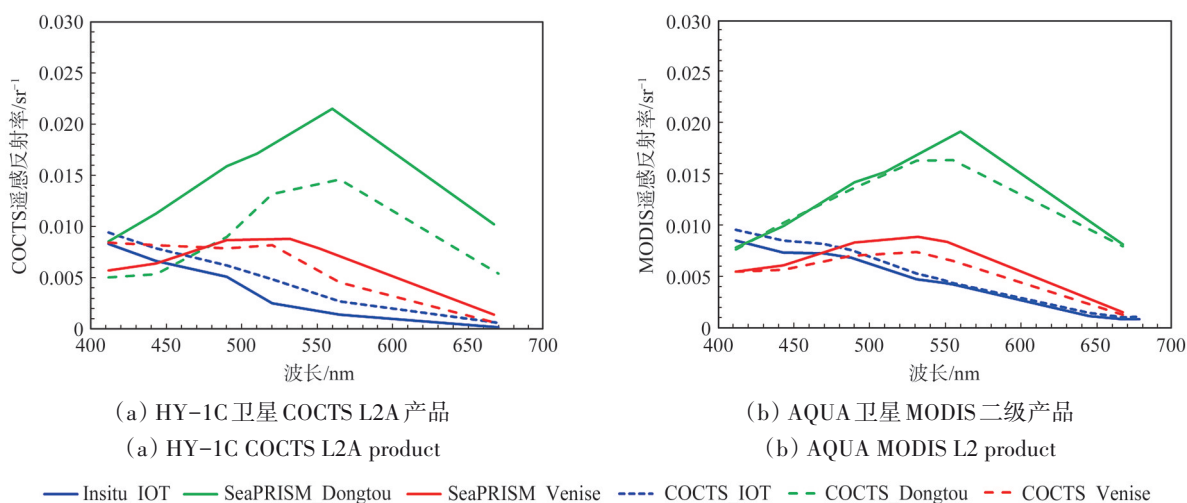


图 12 卫星反演的遥感反射率产品在中国和欧洲近海不同海域(蓝色:IOT2018&IOT2020,绿色:中国东海 SeaPRISM,红色:欧洲亚得里亚海 SeaPRISM)与实测数据(实线)的比较

Fig.12 Comparison of satellite-derived remote-sensing reflectance with in-situ measurements (solid lines) in various region across China and Europe (Blue: IOT2018&IOT2020, Green: SeaPRISM in the East China Sea around Dongtou, Red: SeaPRISM in the Adriatic Sea around Venise in Europe)

## 4 结 论

作为中国第一颗业务化海洋水色卫星, HY-1C 卫星提供的业务化遥感数据已经在海洋环境监测、海洋防灾减灾等行业和领域发挥了重要作用。基于现场实测数据的遥感产品真实性检验是国际上公认最可靠的方式。本文利用海洋卫星在轨测试海上试验获取的现场实测数据和在中国东海和欧洲亚得里亚海部署的 SeaPRISM 太阳光度计获取的自动连续观测数据,对近海水体的 HY-1C 卫星 COCTS 的 L2A 级业务化产品(遥感反射率和气溶胶光学厚度)进行了质量评估。相比于传统的船基测量方式, SeaPRISM 太阳光度计自动测量能够节省数据获取成本、提升数据获取效

率,且观测数据有更宽的时间跨度,有助于研究水色遥感产品误差的时间分布规律。

研究发现, COCTS 的 L2A 级业务化产品提供的遥感反射率与现场实测数据在不同海域均具有较好的一致性,但匹配数据的离散度较高,其蓝光波段、绿光波段和红光波段的遥感反射率在不同海域与实测数据的平均相对百分比偏差(RPD)和平均绝对百分比偏差(APD)分别为-5.6%和 46.8%、11.8%和 53.0%、101.4%和 173.9%。COCTS 遥感反射率在红光波段出现明显的低估。COCTS 遥感反射率光谱形状与实测数据基本一致,但在不同海域表现出较大差异。在中南海海域,二者光谱形状一致性非常高,但 COCTS 遥感反射率整体高于实测数据,各波段的 RPD 介于 24.4%和 293.7%

之间, 平均值为90.8%; 在中国东海海域, COCTS 遥感反射率光谱形状与实测数据相似度高, 但存在非常显著的低估现象, 各波段 RPD 介于-47.5% 和-17.4%之间, 平均值为-33.8%; 在欧洲亚得里亚海海域, 二者的谱形差异较大, 具体表现为: 在蓝光波段 (412 nm 和 443 nm) 呈现高估特点, RPD 平均值为34.2%, 而在绿光和红光波段 (565 nm 和 670 nm) 呈现低估特点, RPD 平均值为-35.3%。而对于 AQUA 卫星 MODIS 的遥感反射率而言, 其与实测数据的谱形一致性非常高, 在中国南海蓝绿波段遥感反射率呈现轻微高估特点, 在中国东海绿光和红光波段呈现高估特点, 而在欧洲亚得里亚海总体呈现低估特点。

研究发现, COCTS 卫星 L2A 级业务化产品提供的气溶胶光学厚度在不同海域呈现整体性的低估趋势, RPD 平均值分别为-14.2%。在中国东海和南海海域则呈现整体性的低估趋势, RPD 分别为-59.9% 和-55.9%, 而在欧洲亚得里亚海海域则呈现高估趋势, RPD 为 88.4%。对于 AQUA 卫星 MODIS 而言, 其气溶胶光学厚度在中国东海和南海海域与实测数据保持高度一致性, 而在欧洲亚得里亚海海域则出现明显的高估线性。

对比 COCTS 和 MODIS 的业务化产品, 本研究认为 HY-1C 卫星 COCTS 的 L2A 级产品在反演精度方面仍有较大的提升空间, 特别是遥感反射率产品。但是由于本文中使用的数据在采样时间和区域上的限制, 评估结果仍存在一定的时空局限性。随着数据量的增大, 采用本文的方法对同类产品进行真实性检验, 能够更准确的评估其误差的时空分布和变化规律。

本文的研究结果对于定量评估水色遥感产品的质量具有一定的借鉴意义, 对于进一步提升中国自主海洋卫星遥感定量化水平一定的指导作用。

**志 谢** 感谢国家卫星海洋应用中心对海上试验和中国东海洞头近岸海域 SeaPRISM 观测系统的资助; 感谢“润江1”船全体船员对海上试验的支持和帮助; 对付出辛苦劳动的数据采集和处理分析人员表示衷心的感谢! 感谢中国海洋卫星数据服务系统提供 HY-1C 卫星 COCTS 二级产品 (osdds.nsoas.org.cn), 感谢 Giuseppe Zibordi 提供 Venice 的 SeaPRISM 观测数据 ([https://aeronet.](https://aeronet.gsfc.nasa.gov)

[gsfc.nasa.gov](https://aeronet.gsfc.nasa.gov)), 感谢 NASA 提供 AQUA 卫星 MODIS 二级产品 (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>)。感谢匿名评审专家给出的有益的意见和建议。

## 参考文献 (References)

- Bailey S W and Werdell P J. 2006. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products. *Remote Sensing of Environment*, 102(1/2): 12-23 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.01.015]
- Gilerson A, Herrera E, Klein Y, Foster R, Gross B, Arnone R and Ahmed S. 2017. Characterization of aerosol parameters over ocean from the Ocean Color satellite sensors and AERONET-OC data//Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, 10422. SPIE: 79-90 [DOI: 10.1117/12.2279150]
- Glover D M, Doney S C, Oestreich W K and Tullo A W. 2018. Geostatistical analysis of mesoscale spatial variability and error in SeaWiFS and MODIS/Aqua global ocean color data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(1): 22-39 [DOI: 10.1002/2017JC013023]
- Gordon H R and Morel A Y. 1983. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review. New York: Springer-Verlag [DOI: 10.1007/978-1-4684-6280-7]
- 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]
- Groom S, Sathyendranath S, Ban Y, Bernard S, Brewin R, Brotas V, Brockmann C, Chauhan P, Choi J K, Chuprin A, Ciavatta S, Cipollini P, Donlon C, Franz B, He X Q, Hirata T, Jackson T, Kampel M, Krasemann H, Lavender S, Pardo-Martinez S, Mélin F, Platt T, Santoleri R, Skakala J, Schaeffer B, Smith M, Steinmetz F, Valente A and Wang M H. 2019. Satellite ocean colour: current status and future perspective. *Frontiers in Marine Science*, 6: 485 [DOI: 10.3389/fmars.2019.00485]
- Han B, Zhu J H, Li T J, Li J, Jia D, Guo K, Zhifeng L and Yang A A. 2019. Preliminary validation of sentinel 3A OLCI bio-optical products in South China Sea//IGARSS 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IEEE: 7877-7880 [DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898741]
- He M J, He S Y, Zhang X D, Zhou F and Li P L. 2021. Assessment of normalized water-leaving radiance derived from GOCI using AERONET-OC data. *Remote Sensing*, 13(9): 1640 [DOI: 10.3390/rs13091640]
- Hlaing S, Gilerson A, Foster R, Wang M H, Arnone R and Ahmed S. 2014. Radiometric calibration of ocean color satellite sensors using AERONET-OC data. *Optics Express*, 22(19): 23385-23401 [DOI: 10.1364/OE.22.023385]
- IOCCG. 2000. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other

- optically-complex, waters//Sathyendranath S ed. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3. Dartmouth: IOCCG [DOI: 10.25607/OBP-95]
- Jamet C, Loisel H, Kuchinke C P, Ruddick K, Zibordi G and Feng H. 2011. Comparison of three SeaWiFS atmospheric correction algorithms for turbid waters using AERONET-OC measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115(8): 1955-1965 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.018]
- Jia D, Gao F, Han B, Li T J, Hong B, Zhu J H and Li J. 2020. Quality control technology and practice for automatic observation of atmospheric optical parameters on the sea// Second Target Recognition and Artificial Intelligence Summit Forum, 11427. SPIE: 1033-1048 [DOI: 10.1117/12.2553188]
- Joo H T, Son S H, Park J W, Kang J, Jeong J Y, Lee C, Kang C K and Lee S. 2015. Long-term pattern of primary productivity in the East/Japan Sea based on ocean color data derived from MODIS-aqua. *Remote Sensing*, 8(1): 25 [DOI: 10.3390/rs8010025]
- Lawson A, Bowers J, Ladner S, Crout R, Wood C, Arnone R, Martinolich P and Lewis D. 2021. Analyzing satellite ocean color match-up protocols using the Satellite Validation Navy Tool (SAVANT) at MOBY and two AERONET-OC sites. *Remote Sensing*, 13: 2673 [DOI: 10.3390/rs13142673]
- Liu J Q, Zeng T, Liang C, Zou Y R, Ye X M, Ding J, Zou B, Shi L J and Guo M H. 2020. Application of Haiyang-1C satellite data in the monitoring of natural hazard and disaster. *Satellite Application*, (6): 26-34 (刘建强, 曾韬, 梁超, 邹亚荣, 叶小敏, 丁静, 邹斌, 石立坚, 郭茂华. 2020. 海洋一号 C 卫星在自然灾害监测中的应用. *卫星应用*, (6): 26-34) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-9030.2020.06.008]
- Liu J Q, Zeng T, Ye X M, Liu J P and Ma X F. 2021. Monitoring of the ice cracks and fracture process of the Brent ice shelf in Antarctica using HY-1C/D satellites. *Haiyang Xuebao*, 43(7): 205-206 (刘建强, 曾韬, 叶小敏, 刘金普, 马小峰. 2021. HY-1C/D 卫星对南极布伦特冰架冰裂缝变化与断裂过程的监测. *海洋学报*, 43(7): 205-206) [DOI: 10.12284/hyxb2021155]
- Liu R J, Xiao Y F, Ma Y, Cui T H and An J B. 2022. Red tide detection based on high spatial resolution broad band optical satellite data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 184: 131-147 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.12.009]
- McClain C R. 2009. A decade of satellite ocean color observations. *Annual Review of Marine Science*, 1(1): 19-42 [DOI: 10.1146/annurev.marine.010908.163650]
- Mélin F and Franz B A. 2014. Assessment of satellite ocean colour radiometry and derived geophysical products// Zibordi G, Donlon C and Parr A eds. *Optical Radiometry for Oceans Climate Measurements*, chap. 6.1, Academic, Experimental Methods in the Physical Sciences 47: 609-638 [DOI: 10.1016/B978-0-12-417011-7.00020-9]
- Miao S S. 2018. A LM-2C successfully sends the HY-1C satellite into orbit. *Aerospace China*, (9): 26 (苗珊珊. 2018. “长征”二号 C 运载火箭成功发射“海洋”一号 C 卫星. *中国航天*, (9): 26) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-7742.2018.09.008]
- Morel A and Prieur L. 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22(4): 709-722 [DOI: 10.4319/lo.1977.22.4.0709]
- Mueller J L, Morel A, Frouin R, Davis C, Arnone R, Carder K, Lee Z P, Steward R G, Hooker S, Mobley C D, McLean S, Holben B, Miller M, Pietras C, Knobelspiesse K D, Fargion G S, Porter J and Voss K. 2003. *Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume III: Radiometric Measurements and Data Analysis Protocols*. Greenbelt M D: Goddard Space Flight Space Centre: 1-84. (NASA/TM-2003-21621/Rev-Vol III) [DOI: 10.25607/OBP-62]
- Qin P, Simis S G H and Tilstone G H. 2017. Radiometric validation of atmospheric correction for MERIS in the Baltic Sea based on continuous observations from ships and AERONET-OC. *Remote Sensing of Environment*, 200: 263-280 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.024]
- Ruddick K G, De Cauwer V, Park Y J and Moore G. 2006. Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: the similarity spectrum for turbid waters. *Limnology and Oceanography*, 51(2): 1167-1179 [DOI: 10.4319/lo.2006.51.2.1167]
- Shen Y F, Liu J Q, Ding J, Jiao J N, Sun S J and Lu Y C. 2020. HY-1C COCTS and CZI observation of marine oil spills in the South China Sea. *Journal of Remote Sensing*, 24(8): 933-944 (沈亚峰, 刘建强, 丁静, 焦俊男, 孙绍杰, 陆应诚. 2020. 海洋一号 C 星光学载荷对海面溢油的识别能力分析. *遥感学报*, 24(8): 933-944) [DOI: 10.11834/jrs.20209475]
- 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]
- Teng Y, Zou B and Ye X M. 2022. Study on the chlorophyll a concentration retrieved from HY-1C satellite coastal zone imager data. *Haiyang Xuebao*, 44(5): 25-34 (滕越, 邹斌, 叶小敏. 2022. HY-1C 卫星海岸带成像仪叶绿素 a 反演研究. *海洋学报*, 44(5): 1-10) [DOI: 10.12284/hyxb2022052]
- Wang L M, Liu J, Gao J M, Yao B M, Yang F G and Zou J Q. 2019. Winter wheat early identification based on HY-1C/CZI data. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 35(33): 151-157 (王利民, 刘佳, 高建孟, 姚保民, 杨福刚, 邹金秋. 2019. 基于 HY-1C/CZI 数据的冬小麦早期识别研究. *中国农学通报*, 35(33): 151-157) [DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb20190600232]
- 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.whugis.20200101]
- Zibordi G, Mélin F, Hooker S B, D'Alimonte D and Holben B. 2004. An autonomous above-water system for the validation of ocean color radiance data. *IEEE Transactions on Geoscience and Re-*

mote Sensing, 42(2): 401-415 [DOI: 10.1109/TGRS.2003.821064]

Zibordi G, Mélin F, Berthon J F, Holben B, Slutsker I, Giles D, D'Alimonte D, Vandemark D, Feng H, Schuster G, Fabbri B E, Kaitala S and Seppälä J. 2009a. AERONET-OC: a network for the validation of ocean color primary products. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(8): 1634-1651 [DOI: 10.1175/2009JTECHO654.1]

Zibordi G, Berthon J F, Mélin F, D'Alimonte D and Kaitala S. 2009b. Validation of satellite ocean color primary products at optically

complex coastal sites: northern Adriatic Sea, Northern Baltic Proper and Gulf of Finland. *Remote Sensing of Environment*, 113(12): 2574-2591 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.013]

Zou Y R, Liu J Q, Liang C and Zhu H T. 2020. Monitoring of mangrove growth using HY-1C Satellite CZI data based on remote sensing. *Journal of Marine Sciences*, 38(1): 68-76 (邹亚荣, 刘强, 梁超, 朱海天. 2020. 基于 HY-1C 卫星 CZI 数据的红树林长势遥感监测. *海洋学研究*, 38(1): 68-76) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2020.01.008]

## Validation of L2A operational products of COCTS onboard HY-1C satellite across coastal waters in China and Europe

HAN Bing<sup>1</sup>, JIA Di<sup>1</sup>, GAO Fei<sup>1</sup>, GUO Kai<sup>1</sup>, ZHU Jianhua<sup>1</sup>, LI Tongji<sup>1</sup>, MA Chao<sup>2</sup>,  
LIU Jiangqiang<sup>2</sup>, GIUSEPPE Zibordi<sup>3</sup>

1. National Ocean Technology Center, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300112, China;

2. National Satellite Ocean Application Service, Ministry of Natural Resources, Beijing 100086, China;

3. Institute of Environment and Sustainability, Joint Research Center, Ispra 21027, Italy

**Abstract:** Since the successful launch of HY-1C in September, 2018, China has entered a new era of operational global ocean color remote sensing. As one of its three major payloads, the Chinese Ocean Color and Temperature Scanner (COCTS) measures the radiances scattered from the atmosphere, ocean and sea surface in eight visible and near-infrared bands and two thermal infrared bands across a swath of over 2500 km. As many businesses such as marine environment observation, marine ecological monitoring and marine disaster prevention and mitigation are putting higher demands on quantitative ocean color products, we here validate operational L2A products retrieved from COCTS data across coastal waters across China and Europe, and also compare them with widely accepted L2 products of MODIS onboard AQUA satellite. Validation practice uses in-situ data obtained in field campaigns in the East and South China Sea in 2018 and 2020, and those derived by automated sun-photometers (SeaPRISM, CIMEL Inc.) deployed in the East China Sea and in the Adriatic Sea in Europe. Confined by that SeaPRISM can only produces remote-sensing reflectance and aerosol optical thickness directly, we only validate operational L2A products provided by COCTS, which include Remote Sensing Reflectance and Aerosol Optical Thickness. Match-up practice follows those protocols widely accepted in the ocean color community. It is found that SeaPRISM can provide *in-situ* data in a more efficient way and the data covers a larger temporal range, which facilitates characterizing temporal and spatial uncertainty of ocean color products. Validation results show that both remote-sensing reflectance and aerosol optical products of COCTS L2A products agree well with in-situ measurements, but their comparison shows larger deviation. The average relative percentage difference (RPD) between COCTS L2A product and field measurement across various coastal waters are -5.6%, 11.8% and 101.4% in blue, green and red bands respectively, while the average Absolute Percentage Difference (APD) are 46.8%, 53.0% and 173.9% respectively. Meanwhile, for aerosol optical thickness, the average RPD and APD between COCTS L2A product and field measurement across these waters are -14.2% and 79.5%, respectively. Remote sensing reflectance of COCTS shows similar spectral shape to that of in-situ data, but their similarity varies across different waters. Specially, remote sensing reflectance in the South China Sea demonstrates similar spectral shape but shows large overestimation; high spectral shape similarity exists in the East China Sea but COCTS gives underestimation; there appears large deviation in spectral shape in the Adriatic Sea, namely, overestimation in blue but underestimation in the blue and red. As compared with the validation results of MODIS L2 products following same criteria, it is found that MODIS performs better than COCTS in quantitative retrieval of remote-sensing reflectance, but shows no obvious advantage in quantitative retrieval of aerosol optical thickness. Although HY-1C COCTS operational products have contributed to wide range of applications, this practice suggests there is still great space in improving quantitative retrieval of ocean color products, at least L2A products.

**Key words:** HY-1C Satellite, COCTS, L2A product, validation, coastal waters around China, coastal waters around Europe, remote-sensing reflectance, aerosol optical thickness

**Supported by** Dragon 5 Cooperation 2020—2024 (No. 59053); National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC1400906); Observation System Construction and Deployment for the Validation Site of Marine Optical Remote Sensing under the Twelfth-five-year Ocean Observing Satellite Ground Segment Program (No. HYYW01-HT-FZH-010); Field Experiment on the Sea and Product Validation for the first On-orbit Test of HY-1D Satellite (No. HYYW01-HT-SHY-001/K420CY022); Synchronous Field Data Collection on the Sea for the first On-orbit Test of HY-1C Satellite (No. K4180C008)