

滕越, 邹斌, 叶小敏. HY-1C 卫星海岸带成像仪叶绿素 *a* 浓度反演研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(5): 25–34, doi:10.12284/hyxb2022052

Teng Yue, Zou Bin, Ye Xiaomin. Study on the chlorophyll *a* concentration retrieved from HY-1C satellite coastal zone imager data[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(5): 25–34, doi:10.12284/hyxb2022052

HY-1C 卫星海岸带成像仪叶绿素 *a* 浓度反演研究

滕越^{1,2,3}, 邹斌^{2,3*}, 叶小敏^{2,3}

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 3. 自然资源部空间海洋遥感与应用研究重点实验室, 北京 100081)

摘要: 叶绿素 *a* 作为最重要的水质参数之一, 是评价水体富营养化和初级生产力状况的主要因素。我国海洋一号 C (HY-1C) 卫星海岸带成像仪 (CZI) 具有高时空分辨率的观测优势。本文基于东海和南海现场实测数据建立了 HY-1C 卫星 CZI 叶绿素 *a* 浓度反演模型并在实测水域进行反演, 与 MODIS 叶绿素 *a* 浓度反演产品进行了对比验证, 应用 CZI 叶绿素 *a* 浓度模型在珠江口、长江口、渤海湾水域进行了叶绿素 *a* 浓度反演示例试验。结果表明, 叶绿素 *a* 浓度模型估算浓度与实测浓度相关系数为 0.774 3, 平均相对误差为 24.58%, 利用实测叶绿素 *a* 浓度对模型进行精度验证, 相关系数达到 0.993 9, 平均相对误差为 18.49%。模型在实测水域反演得到的叶绿素 *a* 浓度分布与 MODIS 叶绿素 *a* 浓度产品分布大体一致。在珠江口水域反演得到叶绿素 *a* 浓度空间分布为由西北向东南逐级递减, 峰值出现在珠江口西沿岸。在长江口、渤海湾反演叶绿素 *a* 浓度空间分布均符合地理实情。研究表明 HY-1C 卫星 CZI 数据可应用于中国近海水色定量化研究。

关键词: HY-1C 卫星; 海岸带成像仪; 叶绿素 *a* 浓度; 珠江口

中图分类号: X834; P714

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)05-0025-10

1 引言

水体中的叶绿素浓度是影响水色变化的重要因素, 其测量值是水体中浮游生物丰度和生物量的一个重要指标, 它从根本上反映了水体初级生产力的变化。叶绿素 *a* 是藻类植物中最丰富的色素, 是水质遥感监测中最重要的参数之一^[1]。因此, 测量并分析水中的叶绿素 *a* 浓度变化, 尤其是人口密集的近岸、河口区域, 对于维持水体生态平衡, 评价水体的污染状况起着重要作用^[2]。传统的叶绿素 *a* 浓度测定包括分光光度法、荧光光度法、高效液相色谱 (HPLC) 法等^[3], 但是其分析速度慢, 消耗大量人力、物力。卫星遥感以其大尺度、高分辨率、实时监测等优点越来越多地用

于海洋监测中。应用卫星遥感监测水体的叶绿素 *a* 浓度有利于快速、大面积了解水质状况^[4]。

2018 年 9 月 7 日, 中国海洋一号 C (HY-1C) 卫星发射成功, 现在轨运行, 其上搭载了海岸带成像仪 (Coastal Zone Imager, CZI)、海洋水色水温扫描仪 (China Ocean Color & Temperature Scanner, COCTS) 等载荷, 可用于全球叶绿素浓度、海水光学特性、海表温度、海洋初级生产力等要素观测。CZI 星下点分辨率为 50 m, 幅宽 ≥ 950 km (表 1), 不仅可以用于陆地观测, 还可以高效观测海洋, 尤其在近海、岛屿和沿岸区域, 对海岸带监测及了解河口港湾叶绿素分布具有重要意义, 对于赤潮、污染物等海洋环境灾害起着监测和预警作用^[5-7]。Cui 等^[8] 研究波段外响应对 HY-

收稿日期: 2021-07-21; 修订日期: 2021-11-12。

基金项目: 民用航天技术预先研究项目 (D040107)。

作者简介: 滕越 (1997—), 女, 山东省德州市人, 主要从事海洋遥感水色要素的研究。E-mail: a122902@qq.com

* 通信作者: 邹斌 (1969—), 男, 河南省信阳市人, 研究员, 主要从事海洋遥感应用研究。E-mail: zoubin@mail.nsoas.org.cn

1C 卫星 CZI 水色反演的影响,发现在蓝、绿、红 3 个可见光通道中绿波段对清洁水体效应最为显著,并提出基于 CZI 蓝绿波段比值模型进行效应修正。Cai 等^[9]基于舟山海域实测水样数据建立了适用于 HY-1C 卫星 CZI 悬浮泥沙浓度反演模型,其反演结果与现场测量有良好的-致性,并分析了岛屿对舟山近海悬浮泥沙浓度的影响。梁超等^[10]采用 4 个光谱指数重构 CZI 数据,针对广西山口红树林自然保护区,通过最小噪声变换建立决策树,实现了区域红树林覆盖面积的自动提取。周屈等^[11]利用 HY-1C 卫星 CZI 数据,结合实际监测数据建立了适用武汉水体浊度反演模型,分析结果表明施工建设不是影响水体浊度变化的因素。Ji 等^[12]将 HY-1C 卫星 CZI 与 COCTS 两个多光谱传感器进行图像融合,建立深度信念网络模型,以渤海海域叶绿素 *a* 浓度为指标与通过传统图像融合技术反演得到的叶绿素 *a* 浓度的分辨率和精度进行比较,表明 CZI 与 COCTS 融合图像能更精确地进行水质遥感监测。刘建强等^[13]利用 HY-1C 卫星 CZI 载荷对 2019 年 4 月三亚近海海域船舶溢油事件进行监测,实现了溢油事件快速响应与修复。上述研究结果均表明 HY-1C 卫星 CZI 载荷可较好地应用于水色遥感定量研究。

表 1 HY-1C 卫星海岸带成像仪的基本参数
Table 1 Basic parameters of coastal zone imager onboard HY-1C satellite

太阳同步回归轨道波段/ μm	不同波段应用对象
0.42~0.50	叶绿素、污染、冰、浅海地形
0.52~0.60	叶绿素、低浓度泥沙、污染、滩涂
0.61~0.69	中等浓度泥沙、植被、土壤
0.76~0.89	植被、高浓度泥沙、大气校正

注:星下点分辨率为 50 m;幅宽 ≥ 950 km;太阳同步回归轨道高度:782 km;太阳同步回归轨道地方时:10:30AM ± 30 min。

利用多光谱卫星遥感数据的叶绿素 *a* 浓度反演,具有很强的局地特性。许大志等^[14]分析了适用于全球海洋叶绿素 *a* 浓度反演的 OC2 和 OC4 算法在南海北部海区的适用性,结果发现叶绿素 *a* 浓度高估范围在 80%~200% 之间,即不适用于南海海域,接着,根据现场实测数据,建立了本地化叶绿素 *a* 浓度经验算法,相关系数达 0.75。马超飞等^[15]在对黄海和东海现场实测数据的基础上,建立 HY-1C 卫星 CCD 成像仪水体叶绿素 *a* 浓度及其他水色要素反演算法,结果表明,实测值与反演值之间有很好的相关度,其中低

浊度水体有非常好的适用性。唐军武等^[16]根据在黄海和东海二类水体海域调查获得的观测数据,提出了基于蓝绿波段比值法反演海表叶绿素 *a* 浓度的经验模型。丛丕福等^[17]基于 HY-1 卫星 COCTS 蓝绿波段辐亮度数据结合现场实测数据构建了适用于辽东湾叶绿素 *a* 浓度反演模型,结果表明模型误差在可控范围内,可应用于获取辽东湾叶绿素 *a* 浓度。解学通等^[18]基于 Landsat8 数据建立叶绿素 *a* 浓度反演模型,反演珠江口近岸水域叶绿素 *a* 浓度,反演得出叶绿素 *a* 浓度分布趋势与实测数据相吻合。马金峰等^[19]在珠江河口水域实测数据基础上,构建了 MERIS 三波段模型,优于一阶微分法和标准 OC4V4 方法在珠江河口的适用性,显示了模型良好的应用潜力。由此可见,叶绿素 *a* 反演模型具有很强的区域性,在特定的水域使用局地性叶绿素 *a* 反演模型可提高其反演精度。

本文利用东海和南海现场实测光谱数据和叶绿素 *a* 浓度数据建立 HY-1C 卫星 CZI 叶绿素 *a* 浓度反演模型。将叶绿素 *a* 浓度模型估算值与实测值进行验证,应用模型反演实测水域叶绿素 *a* 浓度分布与 MODIS 2 级叶绿素 *a* 浓度产品对比,以此评价 CZI 在水体叶绿素 *a* 浓度监测的适用性。选取珠江口水域进行叶绿素 *a* 浓度反演分析其空间分布,应用模型在长江口、渤海湾进行叶绿素 *a* 浓度反演与前人研究结果对比评价模型的准确性。本研究可为近海水质遥感监测,水体富营养化监测提供参考。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

本文选用珠江口水域作为叶绿素 *a* 浓度反演分析区域。珠江口位于南海北部,珠江干流中的西江、北江和东江以及增江、流溪河和潭江汇入珠江口,珠江口年径流量超过 $3.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ^[20]。珠江河口区河汉众多,水网密布,北部狭窄,南部开阔,形似倒置漏斗,通过 8 条放射状排列的分流水道流入南海。珠江口水系复杂,常受潮汐、径流、季风、波浪等因素影响,其动力过程也非常复杂,形成珠江径流、珠江口冲淡水(由外海水与上游淡水在河口地区相互掺混后形成)和外海水团等不同性质的水团^[20-21]。河口区多陆岛和岛屿,珠江口东部水域多分布航道和港口,以香港港和广州港为首,吞吐量位列世界前列^[22]。珠江口所处气候为亚热带海洋性季风气候,年均气温为 21.4~22.4 $^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 1 600~2 300 mm,降水集中于 4~9 月,流量约占全年的 80%^[23],夏季高温多雨,冬季温暖干燥。

2.2 实测数据及叶绿素反演模型

本文采用 HY-1C 卫星在轨测试实测数据, 现场获取时间从 2018 年 9 月 13 日至 2018 年 10 月 12 日。站点位置分布从东海黄大洋延伸到海南岛南部的南海海域, 经纬度范围分别为 $14^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 。采样点共有 76 个, 采用随机抽签的方法, 将采样点分为建模样本和检验样本, 分别为 50 个和 26 个采样点, 用于构建模型的区域化参数和验证模型。观测点位置信息见图 1。

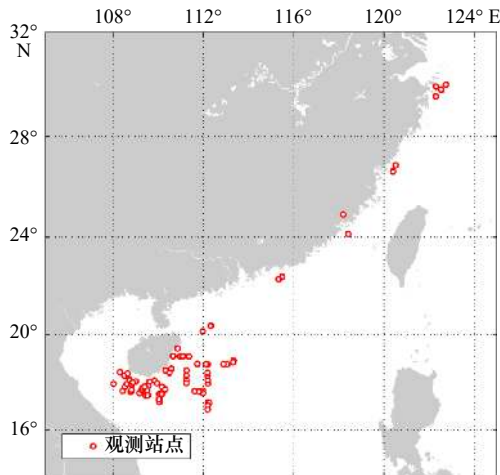


图 1 2018 年 9 月、10 月东海和南海叶绿素 *a* 浓度实测站点分布

Fig. 1 Cruise locations of *in situ* chlorophyll *a* concentration sites in the East China Sea and South China Sea in September and October 2018

叶绿素 *a* 浓度实测值范围为 $0.0954\sim 4.5418\text{ mg/m}^3$, 平均值为 0.5958 mg/m^3 。利用建模样本 50 个采样点的遥感反射率与叶绿素 *a* 浓度建立叶绿素 *a* 浓度的反演模型, 模型形式采用 HY-1C 卫星标准数据产品反演公式。利用实测数据对该模型系数进行最小二乘法拟合, 得到 HY-1C 卫星 CZI 叶绿素 *a* 浓度反演模型为

$$C = 10^{a_0 + a_1 X_1^2 + a_2 X_2^{0.5}}, \quad (1)$$

$$X_1 = \frac{R_{rs}(\lambda_3)}{R_{rs}(\lambda_2)}, \quad X_2 = \frac{R_{rs}(\lambda_2)}{R_{rs}(\lambda_1)}, \quad (2)$$

式中, C 为叶绿素 *a* 浓度; a_0 、 a_1 、 a_2 为模型参数, $a_0 = -1.653$, $a_1 = 0.131$, $a_2 = 1.668$; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为 CZI 第一、第二、第三波段的波长; R_{rs} 为遥感反射率。由该模型估算的叶绿素 *a* 浓度与建模样本 50 个点的实测叶绿素 *a* 浓度关系如图 2a 所示, 两者间的相关系数为 0.774 3, 平均相对误差 (Mean Relative Error, MRE) 为 24.58%。利用检验样本对模型进行精度验证, 模型估算叶绿素 *a* 浓度与检验样本 26 个点的实测叶绿素 *a* 浓度关系如图 2b 所示, 相关系数达到了 0.993 9,

MRE 为 18.49%, 模型估算值和实测值具有很强的相关性。通常来说, 建模组评价指标的评价结果要优于检验组评价指标的检验结果, 本文出现检验组评价指标结果优于建模组的情况, 可能是由于建模样本和检验样本为随机选取, 恰巧存在了检验样本评价指标结果高于建模样本。从图 2 可以发现, 当叶绿素 *a* 浓度偏低时, 模型估算精度稍高于叶绿素 *a* 浓度偏高时。由此, 建立的 CZI 模型应用于水体叶绿素 *a* 浓度反演中具有可行性。

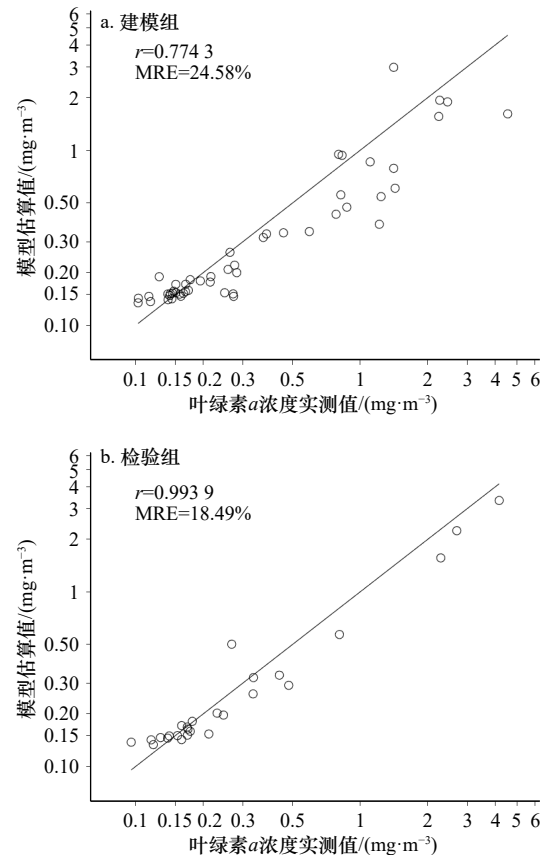


图 2 模型估算的叶绿素 *a* 浓度与实测叶绿素 *a* 浓度关系

Fig. 2 The relationship between the chlorophyll *a* concentration estimated by the model and the measured chlorophyll *a* concentration

2.3 遥感数据及处理

本文所用 HY-1C 卫星 CZI 数据获取于 2019 年 9 月 26 日至 2020 年 12 月 4 日, 选取覆盖海面云量稀少、成像清晰的数据, 易于进行叶绿素 *a* 浓度反演。使用的卫星数据包括 L1B 和 L2A 级数据, L1B 数据为各波段天顶辐亮度, L2A 为经过大气校正后的遥感反射率。所用卫星数据均从我国海洋卫星数据分发系统获得 (<https://osdds.nsoas.org.cn/>)。所用遥感数据信息见表 2。

表 2 所用遥感数据基本参数

Table 2 The basic parameters of remote sensing data used

覆盖区域	序号	载荷/卫星	成像时间
海南岛	1	CZI/HY-1C	2019年9月26日 03:28
	2	CZI/HY-1C	2019年9月26日 03:29
珠江口	3	CZI/HY-1C	2020年1月30日 03:28
	4	CZI/HY-1C	2020年2月26日 03:28
	5	CZI/HY-1C	2020年10月11日 03:25
	6	CZI/HY-1C	2020年11月22日 03:24
长江口	7	CZI/HY-1C	2020年12月4日 03:24
	8	CZI/HY-1C	2020年11月8日 02:48
渤海湾	9	CZI/HY-1C	2020年11月8日 02:49
	10	CZI/HY-1C	2020年10月26日 03:20

表 2 中序号 1~7 的 L1B 级 RGB 图像如图 3 和图 4 所示。由真彩色图像可以看出本文所用 CZI 研究区数据受云影响有少许缺失, 珠江口水域 2020 年 1 月 30 日的 1 景影像受云影响相对最小, 其他影像水体均有小块片状或条带状云分布, 由于 3~9 月珠江口水域 CZI 影像空白较多, 数据缺失严重, 因此 3~9 月的珠江口水域 CZI 数据本文暂不涉及。

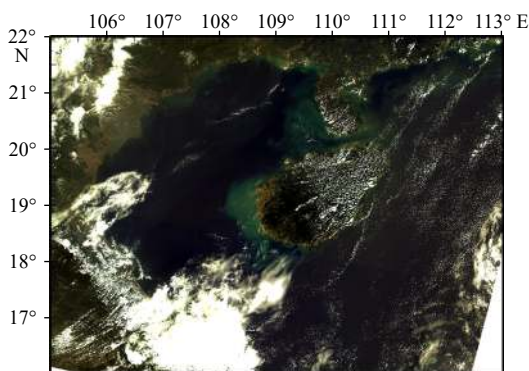


图 3 海南岛周围 HY-1C 卫星海岸带成像仪遥感影像
Fig. 3 Images acquired by coastal zone imager onboard the
HY-1C satellite near the Hainan Island

观测时间: 2019 年 9 月 26 日

Imaging time: September 26, 2019

3 结果与分析

3.1 叶绿素 a 浓度反演结果及其验证

海南岛环岛水域影像采集范围为 $16^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$ 。图 5a 为应用 CZI 反演模型对海南岛环岛水域进行叶绿素 a 浓度反演结果与空间分布, 同时将实测站点叶绿素 a 浓度在空间分布图上相应经纬度位置进行了呈现, 站点颜色代表实测点的叶绿素 a 浓

度。选取的海南岛 CZI 遥感影像成像时间处于现场实测数据相同季节内, 由于 2018 年实测数据观测时间范围内受天气条件限制, 无法获得该地区的晴空遥感数据, 因此选用两者观测时间相差 1 年, 但在相同季节内遥感影像与实测数据进行比较。由图 5a 可见, 实测站点叶绿素 a 浓度与 CZI 模型反演叶绿素 a 浓度值接近, 由此验证了模型的反演精度。利用 2019 年 9 月 26 日 Terra 卫星 MODIS 传感器的叶绿素 a 浓度产品进行对比。其叶绿素 a 浓度数据为美国航空航天局 NASA 制作的 2 级产品, 时间分辨率为 1 d, 空间分辨率为 1 km, 其下载地址为 <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>。MODIS 叶绿素 a 浓度产品分布见图 5b。比较两幅叶绿素 a 浓度空间分布图可以看出, CZI 反演结果在海南岛沿岸水域和北部湾沿岸及南海水域的叶绿素 a 浓度分布规律和 MODIS 反演的叶绿素 a 浓度分布基本一致, 其中海南岛西南沿岸叶绿素 a 浓度均为 2.3 mg/m^3 ; 三亚往南海域叶绿素 a 浓度均为 1 mg/m^3 ; 广西防城港、北海沿岸叶绿素 a 浓度均在 5 mg/m^3 以上, 逐渐向远离岸边方向扩散至低浓度; 琼州海峡叶绿素 a 浓度约为 1.7 mg/m^3 ; 南海叶绿素 a 浓度约为 1 mg/m^3 或以下。在越南河静省、越南广平省沿岸向东水域和雷州半岛两侧沿岸水域两个传感器反演的叶绿素 a 浓度分布差异偏大, 且呈现相反的趋势, 这可能是由于 MODIS 叶绿素 a 浓度产品所基于的算法^[24]主要针对叶绿素 a 浓度不大于 0.25 mg/m^3 的全球海表面叶绿素 a 浓度估算, 不完全适用于中国沿岸水体。同时由于 CZI 较高的空间分辨率, CZI 叶绿素 a 浓度反演结果是由表 2 中序号 1、2 两景数据镶嵌而成, 序号 2 的 CZI 数据云覆盖面积较广, 大气校正和太阳耀斑处理还需交叉验证。

3.2 典型河口叶绿素 a 浓度反演

珠江口地区经济发达, 人口密集, 强烈的人类活动引起了近岸水域生物种类减少, 水体富营养化加剧, 赤潮、缺氧等海洋生态灾害发生。加之粤港澳大湾区城市群的快速发展, 沿岸区域面临着海岸线退化、湿地面积缩减、生物多样性水平降低、渔业资源减少、海洋污染加剧等诸多问题^[25], 因此, 监测珠江口水域叶绿素 a 浓度及变化, 对促进珠江口水域生态恢复及可持续发展尤为重要和迫切。

应用 CZI 反演模型对表 2 中的珠江口水域 5 景数据进行叶绿素 a 浓度反演计算, 所得结果见图 6。珠江口水域影像采集范围为 $21^{\circ}39'\sim 22^{\circ}48'\text{N}$, $113^{\circ}17'\sim 114^{\circ}16'\text{E}$ 。图 6a 呈现的 2020 年 1 月 30 日珠江口水域叶绿素 a 浓度空间上整体从西到东由高到低扩散

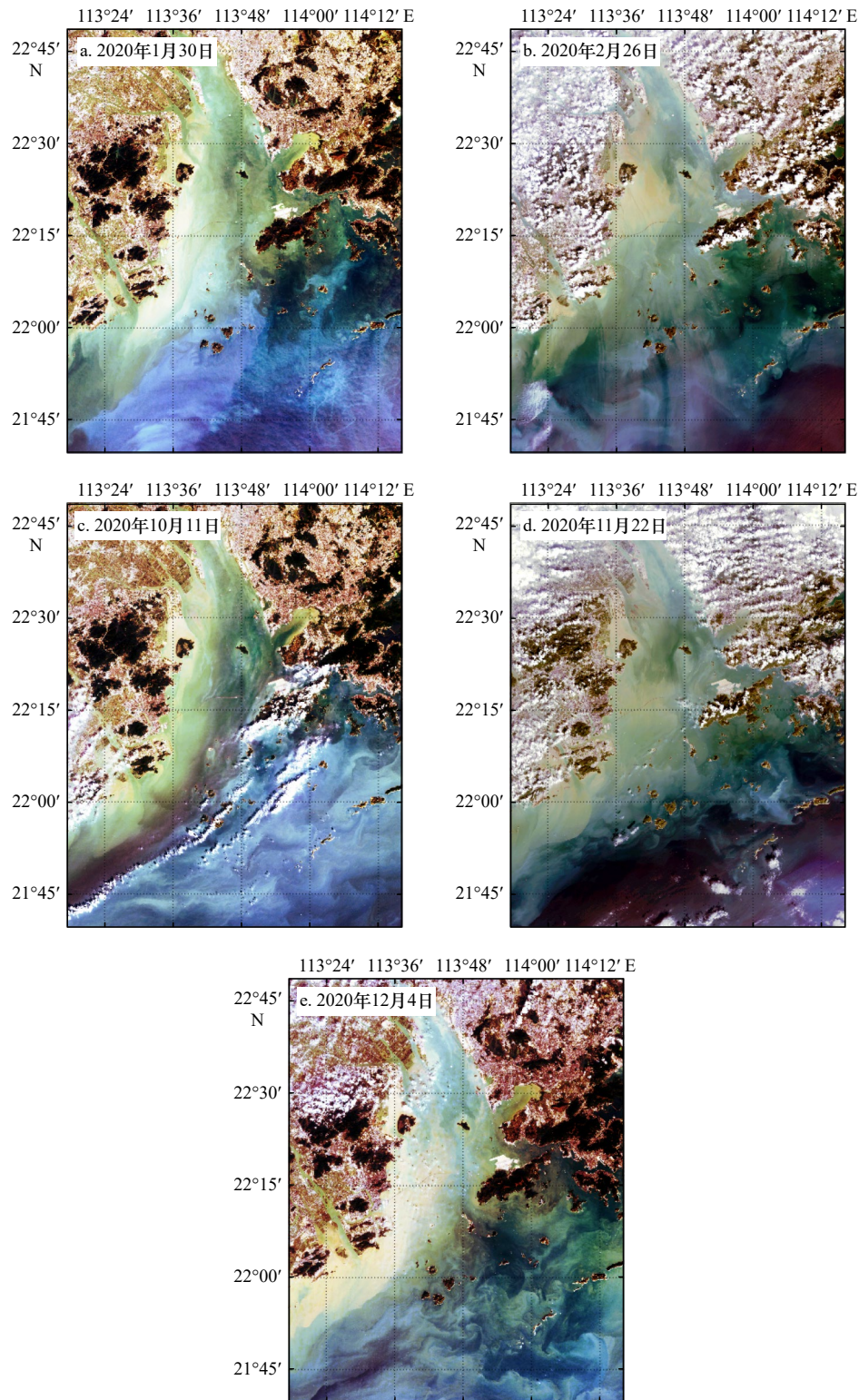


图4 珠江口水域 HY-1C 卫星海岸带成像仪遥感影像

Fig. 4 Images acquired by coastal zone imager onboard the HY-1C satellite of the Zhujiang River Estuary waters

式分布。高值区(大于 5 mg/m^3)分布在珠海和澳门沿岸、淇澳岛南侧,呈条带状分布,向东南扩散至南海,浓度逐渐降低至低值(小于 1 mg/m^3),扩散距离不等;向东南水域方向有过渡的片状中高值($3 \sim 5 \text{ mg/m}^3$)分布,再向东扩散至中值($2 \sim 3 \text{ mg/m}^3$)。中低值($1 \sim$

2 mg/m^3)分布于虎门、伶仃洋中部水域、深圳湾中部水域、香港离岛区环岛沿岸以及磨刀门水道。低值大面积分布在珠江口南侧,南海海域。

2020年2月26日珠江口水域叶绿素 *a* 浓度整体分布西侧沿岸高于东侧沿岸。高值区主要分布在珠

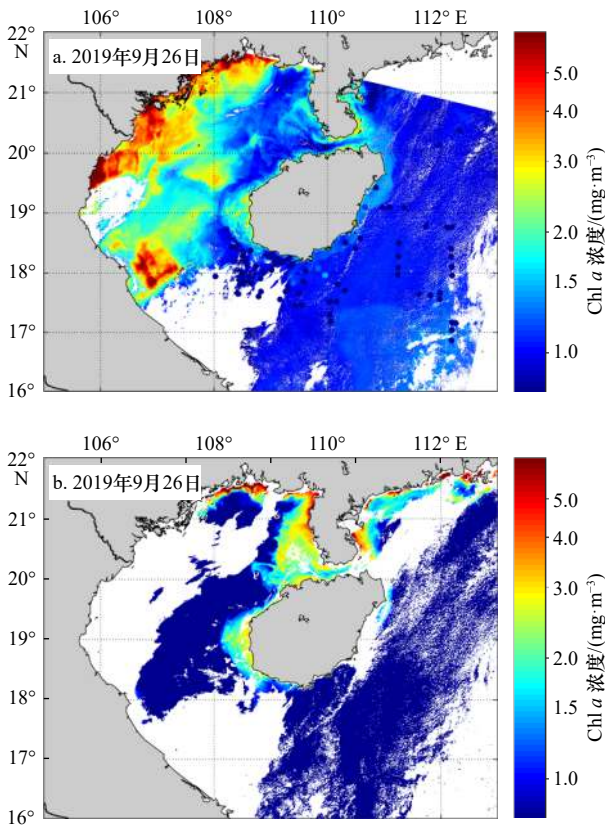


图 5 海南岛周围叶绿素 *a* 浓度海岸带成像仪反演结果
Fig. 5 Chlorophyll *a* concentration retrieved from coastal zone imager in the offshore water around Hainan Island

a. 海岸带成像仪叶绿素 *a* 浓度反演结果 ; b. MODIS 叶绿素 *a* 浓度反演结果

a. Chlorophyll *a* concentration retrieved from coastal zone imager;

b. chlorophyll *a* concentration retrieved from MODIS

海沿岸、淇澳岛东南水域,呈大范围片状分布。香港大浦区西沿岸赤门四周、虎门沿岸水域叶绿素 *a* 浓度为中高值,条带状分布呈西北-东南走向;伶仃洋西部水域及内伶仃洋岛东南沿岸水域叶绿素 *a* 浓度为中高值;九洲尾附近水域沿港珠澳大桥为中高值分布;对沙角向北、交杯岛向南海域叶绿素 *a* 浓度为中高值,向南海逐渐扩散至中值、中低值、低值。中值分布在磨刀门水道、伶仃洋中部水域、龙鼓水道。西仔洲西南水域、深圳屯门西沿岸、屯门南沿岸龙鼓水道和西/东博寮海峡叶绿素 *a* 浓度为中低值,呈不规则片状分布。香港岛东部、南部水域及南海呈低值分布。叶绿素 *a* 浓度由珠江口沿岸向南海扩散,扩散距离不等。

2020 年 10 月 11 日珠江口水域叶绿素 *a* 浓度整体由西侧高值向东侧低值过渡。高值出现在淇澳岛周围,珠海、澳门东沿岸,对沙角向南。中高值出现在淇澳岛向北、伶仃洋西侧、磨刀门水道,虎门和深

圳湾有零星分布。中值出现在西岸向外扩散区域,呈长条带状分布,此外虎门北部也有零星分布。中低值分布在伶仃洋中部及其向南延伸水域、赤门和沙头角海。低值分布在香港南沿岸海域、南海海域。

2020 年 11 月 22 日珠江口水域叶绿素 *a* 浓度整体相对中等。个别小范围高值分布在淇澳岛西北方向水域、香港大埔区东沿岸和对沙角北部水域,在南海海域中也有零星分布。山尾南部南海海域叶绿素 *a* 浓度呈现高-中高-中-中低-低聚散式分布。珠海市东沿岸,横琴岛南沿岸水域,对沙角南侧、交杯岛北侧水域呈中高值分布,这些区域向东或向南扩散至中值浓度。中值还分布在伶仃洋西部海域,深圳湾,澳门东沿岸、港珠澳大桥南侧水域,珠海金湾区南侧。虎门呈中低值条带状分布,龙鼓水道、香港离岛区沿岛水域呈中低值分布。低值分布在香港东侧蓝塘海峡及南海。

2020 年 12 月 22 日珠江口水域叶绿素 *a* 浓度整体偏低。中值分布在淇澳岛西北侧,向东向低值扩散,中值在珠江三角洲沿岸呈宽条带东北-西南走向。中低值出现在虎门、伶仃洋东部、深圳湾、横州东侧水域、磨刀门水道及西侧水域。其余水域叶绿素 *a* 浓度为低值分布。

由此可见,珠江口水域叶绿素 *a* 浓度在 2020 年 1 月、2 月、10 月、11 月、12 月有大体一致的分布趋势。叶绿素 *a* 浓度空间分布高值出现在珠江三角洲西沿岸。从空间分布来看,1 月、10 月、12 月叶绿素 *a* 浓度高值呈条带状分布在珠海和澳门沿岸;2 月、11 月叶绿素 *a* 浓度高值呈片状分布在珠海沿岸。以叶绿素 *a* 浓度高值为聚集点向东向南逐渐向低值过渡。由于珠江口独特的倒漏斗形状,接收北面珠江输入和西面众多的中、小河流输入,加之受径流、潮流、波浪、沿岸流和陆架环流等影响,珠江口水域水团运移规律非常复杂^[20]。再考虑科氏力的影响,使得珠江口水域叶绿素 *a* 浓度分布不仅南北向,而且东西向也呈现出明显的梯度。

为探究 CZI 叶绿素 *a* 浓度反演模型在中国近海的适用性,选取长江口及其邻近水域、渤海湾 CZI 数据进行叶绿素 *a* 浓度反演计算,结果如图 7 和图 8 所示。洪官林^[26]通过对长江口水域水质状况的调查,发现长江口叶绿素 *a* 浓度变化范围为 0.01~16.00 mg/m³,图 7 所示的长江口 CZI 反演叶绿素 *a* 浓度范围和洪官林^[26]的结果保持了较好的一致性。

图 8 中渤海湾 CZI 反演叶绿素 *a* 浓度空间分布为沿岸浓度高,离岸浓度降低,海区中部大部分地区

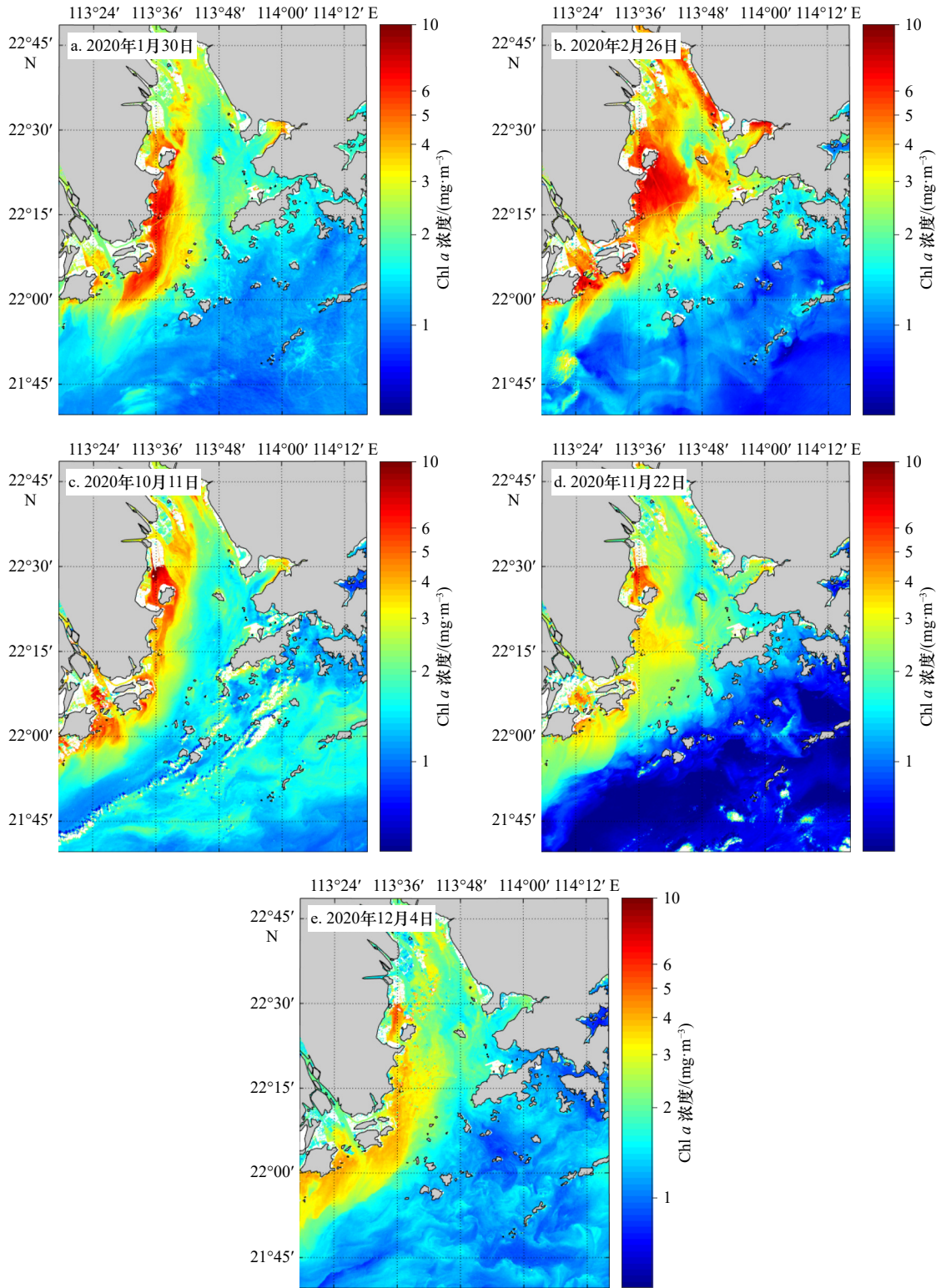


图6 珠江口叶绿素 *a* 浓度海岸带成像仪反演结果

Fig. 6 Chlorophyll *a* concentration retrieved from coastal zone imager in the Zhujiang River Estuary

叶绿素 *a* 浓度约为 $2 \text{ mg}/\text{m}^3$, 逐渐向渤海中部降低。其空间分布与姜德娟和张华^[27]利用 MODIS/Aqua 二级产品获得的渤海湾叶绿素 *a* 浓度有很好的统一性。

以上珠江口、长江口和渤海湾的 CZI 叶绿素 *a* 浓度反演示例均显示, CZI 在中国近岸海域可较好地实

现高空间分辨率的水色反演并呈现其空间分布。

3.3 讨论

本文反演获得叶绿素 *a* 浓度在珠江口水域呈现自西北向东南趋于降低的空间分布, 其中2月叶绿素 *a* 浓度整体较高, 10月整体浓度低于2月, 12月整体叶

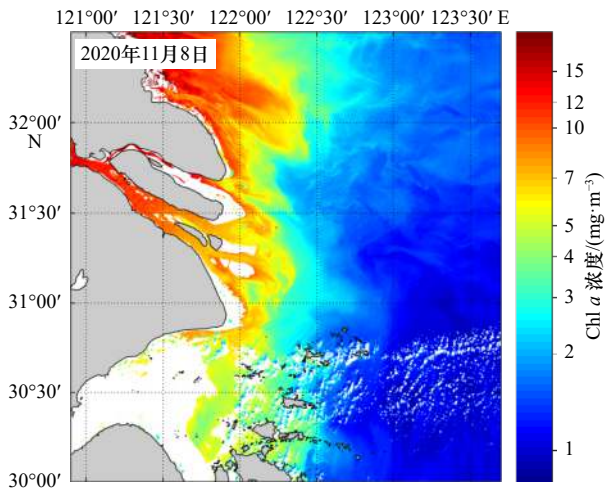


图7 长江口及其邻近水域叶绿素 *a* 浓度海岸带成像仪反演结果

Fig. 7 Chlorophyll *a* concentration retrieved from coastal zone imager in the Changjiang River Estuary and its adjacent waters

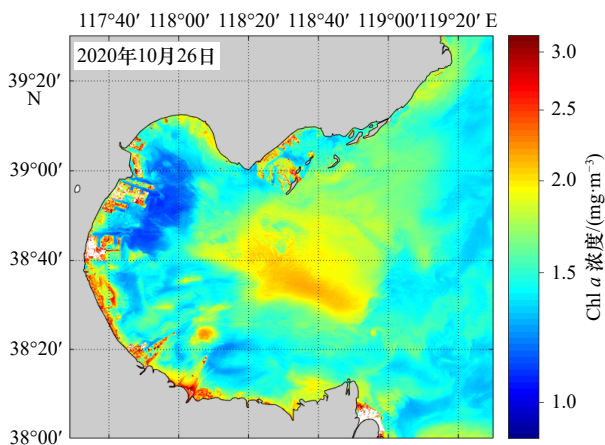


图8 渤海湾叶绿素 *a* 浓度海岸带成像仪反演结果

Fig. 8 Chlorophyll *a* concentration retrieved from coastal zone imager in the Bohai Bay

叶绿素 *a* 浓度较低。对比以往有关珠江口叶绿素 *a* 浓度的研究^[18, 28] 可以发现, 不同研究中均有相同的分布特征, 符合当地水文、地理相关理论。遗憾的是, 本文建立的 CZI 叶绿素 *a* 浓度反演模型在珠江口水域、

长江口和渤海湾的反演结果未有当地现场实测叶绿素 *a* 浓度数据进行对比验证, 接下来需要结合现场实测叶绿素 *a* 浓度进行综合分析。

由于 CZI 载荷只有 4 波段, 缺少典型水色遥感载荷的两个近红波段或短波红外波段用于大气校正, 因此其大气校正精度也会为其叶绿素 *a* 浓度反演带来误差。因此, 建立更精确适用的大气修正算法(如结合 HY-1C 卫星 COCTS 载荷进行大气校正), 应用模型在中国近海其他水域的反演效果为下一步的研究重点。

4 总结

HY-1C 卫星 CZI 具有高时空分辨率的特点, 可以实现对水色要素叶绿素 *a* 浓度的反演。本文利用东海和南海现场实测光谱数据和叶绿素 *a* 浓度数据以及 HY-1C 卫星 CZI 数据得到了以下结论:

(1) 通过实测数据建立了 HY-1C 卫星 CZI 叶绿素 *a* 浓度反演模型, 与建模样本实测叶绿素 *a* 浓度相关系数为 0.774 3, 平均相对误差为 24.58%。

(2) CZI 叶绿素 *a* 浓度模型在实测水域海南岛沿岸反演结果与实测站点叶绿素 *a* 浓度量级一致, 其空间分布与 MODIS 2 级产品叶绿素 *a* 浓度对比大体具有一致性, 小范围浓度偏差考虑模型的适用性和数据的准确性。

(3) 应用 CZI 叶绿素 *a* 浓度模型在珠江口水域的反演结果表明, 叶绿素 *a* 浓度在空间上呈现自西北向东南趋于降低的分布。模型在长江口、渤海湾的叶绿素 *a* 浓度分布也与前人研究结果相一致。本研究表明 HY-1C 卫星 CZI 具有良好的水色遥感应用价值。

致谢: 本文 CZI 叶绿素 *a* 浓度反演模型是在自然资源部第一海洋研究所崔廷伟博士和刘荣杰博士提供的反演模型的基础上进行的系数订正, 同时感谢他们在叶绿素 *a* 浓度遥感反演建模方面的帮助。

参考文献:

- [1] Martin S. 海洋遥感导论[M]. 蒋兴伟等译. 北京: 海洋出版社, 2017: 159–217.
Martin S. An Introduction to Ocean Remote Sensing[M]. Jiang Xingwei, et al, trans. Beijing: China Ocean Press, 2017: 159–217.
- [2] 张棋斐, 吴志峰, 解学通. 河口及近岸海域水体叶绿素浓度反演方法综述[J]. 生态科学, 2017, 36(5): 215–222.
Zhang Qifei, Wu Zhifeng, Xie Xuotong. Research progress of the inversion algorithm of chlorophyll-*a* concentration in estuaries and coastal waters[J]. Ecological Science, 2017, 36(5): 215–222.
- [3] 王玉芳, 杨士斌, 刘得银, 等. 浮游植物叶绿素 *a* 含量不同方法测定比较——以白洋淀区域水体为例[J]. 水文, 2014, 34(5): 57–60.
Wang Yufang, Yang Shibin, Liu Deyin, et al. Comparison of different methods for phytoplankton chlorophyll *a* concentration measurement: a study case of water in Baiyangdian Area[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(5): 57–60.
- [4] 刘良明. 卫星海洋遥感导论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005: 120–138.
Liu Liangming. An Introduction to Satellite Oceanic Remote Sensing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005: 120–138.

- [5] 叶小敏. 封面“HY-1C卫星”故事[J]. 海洋学报, 2019, 41(11): 163.
Ye Xiaomin. Cover story: HY-1C satellite[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(11): 163.
- [6] 蒋兴伟, 何贤强, 林明森, 等. 中国海洋卫星遥感应用进展[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 113–124.
Jiang Xingwei, He Xianqiang, Lin Mingsen, et al. Progresses on ocean satellite remote sensing application in China[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 113–124.
- [7] 蒋兴伟, 叶小敏, 宋清涛, 等. 中国“海洋一号”卫星图像上的冯·卡门大气涡街现象与动力分析[J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 96–103.
Jiang Xingwei, Ye Xiaomin, Song Qingtao, et al. Phenomenon and dynamical analysis of the atmospheric von Kármán vortex streets on Chinese Haiyang-1 satellite image[J]. Haiyang Xuebao, 2013, 35(3): 96–103.
- [8] Cui Tingwei, Ding Jing, Jia Fujuan, et al. Out-of-band response for the Coastal Zone Imager (CZI) onboard China’s ocean color satellite HY-1C: effect on the observation just above the sea surface[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 3067.
- [9] Cai Li’na, Zhou Minrui, Liu Jianqiang, et al. HY-1C observations of the impacts of islands on suspended sediment distribution in Zhoushan coastal waters, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1766.
- [10] 梁超, 刘利, 刘建强, 等. 基于HY-1C CZI影像光谱指数重构数据MNF变换的红树林提取[J]. 海洋学报, 2020, 42(4): 104–112.
Liang Chao, Liu Li, Liu Jianqiang, et al. Extracting mangrove information using MNF transformation based on HY-1C CZI spectral indices reconstruction data[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(4): 104–112.
- [11] 周屈, 刘建强, 王剑茹, 等. 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[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(5): 676–681.
Zhou Qu, Liu Jianqiang, Wang Jianru, et al. Water turbidity monitoring of Zhiyin and Huangjia Lakes in Wuhan for COVID-19 epidemic using HY-1C CZI data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(5): 676–681.
- [12] Ji Hongren, Tian Liqiao, Li Jian, et al. Spatial-spectral fusion of HY-1C COCTS/CZI data for coastal water remote sensing using deep belief network[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 14: 1693–1704.
- [13] 刘建强, 曾韬, 梁超, 等. 海洋一号C卫星在自然灾害监测中的应用[J]. *卫星应用*, 2020(6): 26–34.
Liu Jianqiang, Zeng Tao, Liang Chao, et al. Application of HY-1C satellite in natural disaster monitoring[J]. *Satellite Application*, 2020(6): 26–34.
- [14] 许大志, 曹文熙, 王桂芬. 南海北部水体叶绿素 *a* 浓度反演的生物光学模型[J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(2): 15–21.
Xu Dazhi, Cao Wenxi, Wang Guifen. A bio-optical model for retrieval of chlorophyll *a* concentration in northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(2): 15–21.
- [15] 马超飞, 蒋兴伟, 唐军武, 等. HY-1 CCD宽波段水色要素反演算法[J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 38–44.
Ma Chaofei, Jiang Xingwei, Tang Junwu, et al. Inverse algorithms of ocean constituents for HY-1/CCD broadband data[J]. Haiyang Xuebao, 2005, 27(4): 38–44.
- [16] 唐军武, 王晓梅, 宋庆君, 等. 黄、东海二类水体水色要素的统计反演模式[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(S1): 1–7.
Tang Junwu, Wang Xiaomei, Song Qingjun, et al. Statistical inversion models for case II water color elements in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(S1): 1–7.
- [17] 丛丕福, 牛铮, 曲丽梅, 等. 利用海洋卫星HY-1数据反演叶绿素 *a* 的浓度[J]. *高技术通讯*, 2005, 15(11): 106–110.
Cong Pifu, Niu Zheng, Qu Limei, et al. Retrieval of chlorophyll *a* concentration from ocean satellite HY-1[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2005, 15(11): 106–110.
- [18] 解学通, 吴志峰, 王婧, 等. 结合实测光谱数据的珠江口水质遥感监测[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2016, 15(4): 73–78.
Xie Xuetong, Wu Zhifeng, Wang Jing, et al. Remote sensing monitoring on water quality of coastal waters in the Pearl River Estuary based on measured spectral data[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2016, 15(4): 73–78.
- [19] 马金峰, 詹海刚, 陈楚群, 等. 珠江河口混浊高产水域叶绿素 *a* 浓度的遥感估算模型[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(1): 15–20.
Ma Jinfeng, Zhan Haigang, Chen Chuqun, et al. Remote sensing retrieval of chlorophyll *a* in turbid, productive estuaries: a case study of Zhujing River Estuary[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(1): 15–20.
- [20] 刘大召, 李卓, 陈仔豪, 等. 基于高分1号遥感数据港澳大桥对珠江口水域悬浮泥沙分布的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(6): 89–95.
Liu Dazhao, Li Zhuo, Chen Zihao, et al. Influence of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge on the distribution of suspended sediment in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, 40(6): 89–95.
- [21] 方立刚, 陈水森, 李宏丽. 基于叶绿素 *a* 浓度的珠江口感潮河段咸潮监测研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(30): 17213–17215, 17224.
Fang Ligang, Chen Shuisen, Li Hongli. Study on salinity based on chlorophyll *a* in saltwater intrusion reach, Pearl River Estuary[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(30): 17213–17215, 17224.
- [22] 李文凯. 河口海域悬浮泥沙时空动态遥感研究——以珠江口为例[D]. 武汉: 华中师范大学, 2017.
Li Wenkai. Remote sensing of suspended sediments concentration spatial-temporary dynamics in Estuary Water—a case in the Pearl River Estuary[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2017.
- [23] 刘华健, 黄良民, 谭焯辉, 等. 珠江口浮游植物叶绿素 *a* 和初级生产力的季节变化及其影响因素[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(1): 81–91.
Liu Huajian, Huang Liangmin, Tan Yehui, et al. Seasonal variations of chlorophyll *a* and primary production and their influencing factors

- in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(1): 81–91.
- [24] Hu Chuanmin, Lee Zhongping, Franz B. Chlorophyll *a* algorithms for oligotrophic oceans: a novel approach based on three-band reflectance difference[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C1): C01011.
- [25] 赵蒙蒙, 寇杰锋, 杨静, 等. 粤港澳大湾区海岸带生态安全问题与保护建议[J]. *环境保护*, 2019, 47(23): 29–34.
Zhao Mengmeng, Kou Jiefeng, Yang Jing, et al. Study on the ecological security and protection measures of the coastal zone in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. *Environmental Protection*, 2019, 47(23): 29–34.
- [26] 洪官林. 长江口及邻近海域叶绿素的光学特性及其遥感应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
Hong Guanlin. Optical properties of chlorophyll and remote sensing application in Yangtze Estuary and Adjacent Sea[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [27] 姜德娟, 张华. 渤海叶绿素浓度时空特征分析及其对赤潮的监测[J]. *海洋科学*, 2018, 42(5): 23–31.
Jiang Dejuan, Zhang Hua. Analysis of spatial and temporal characteristics of chlorophyll *a* concentration and red tide monitoring in Bohai Sea[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(5): 23–31.
- [28] 马翱慧, 刘湘南, 李婷, 等. 南海北部海域叶绿素 a 浓度时空特征遥感分析[J]. *海洋学报*, 2013, 35(3): 98–105.
Ma Aohui, Liu Xiangnan, Li Ting, et al. The satellite remotely-sensed analysis of the temporal and spatial variability of chlorophyll *a* concentration in the northern South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2013, 35(3): 98–105.

Study on the chlorophyll *a* concentration retrieved from HY-1C satellite coastal zone imager data

Teng Yue^{1,2,3}, Zou Bin^{2,3}, Ye Xiaomin^{2,3}

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, State Oceanic Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: As one of the most important water quality parameters, chlorophyll *a* is an important indicator to evaluate the degree of eutrophication of water bodies and also the main factors of primary productivity state of the oceans. The coastal zone imager (CZI) onboard the Chinese Haiyang-1C (HY-1C) satellite has an advantage observation in high temporal and spatial resolution. In this study, a chlorophyll *a* concentration retrieval model for CZI onboard the HY-1C satellite is developed from the *in-situ* measurements in the East China Sea and the South China Sea. The chlorophyll *a* concentration is retrieved by the model in the measured waters and compared with MODIS chlorophyll *a* concentration. The chlorophyll *a* concentration also retrieved in the Zhujiang River Estuary, Changjiang River Estuary and Bohai Bay. The correlation coefficient between the predicted value of the model and the *in-situ* chlorophyll *a* concentration is 0.774 3, the average relative error is 24.58%. The accuracy of the model is verified with the *in-situ* measurements with the correlation coefficient of 0.993 9 and the average relative error of 18.49%. The distribution of chlorophyll *a* concentration retrieved from CZI is nearly the same as that of MODIS. The chlorophyll *a* concentration decreases gradually from northwest to southeast and the peak value locates on the west bank of the Zhujiang River Estuary. The inversion of chlorophyll *a* concentration in Changjiang River Estuary and Bohai Bay accords with the actual situation. The work in this study indicates that HY-1C satellite coastal zone imager data are useful for the monitoring of coastal ocean color in China.

Key words: HY-1C satellite; coastal zone imager; chlorophyll *a* concentration; Zhujiang River Estuary