



引文格式:周巨源,汪明秀,焦俊男,等.HY-1 C/D 卫星 CZI 数据海面太阳耀光反射校正[J].武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(9):1904-1913.DOI:10.13203/j.whugis20220628

Citation: ZHOU Juyuan, WANG Mingxiu, JIAO Junnan, et al. Correction of Sunlight Reflection from Ocean Surface in HY-1C/D CZI Images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(9): 1904-1913. DOI: 10.13203/j.whugis20220628

## HY-1 C/D 卫星 CZI 数据海面太阳耀光反射校正

周巨源<sup>1</sup> 汪明秀<sup>1</sup> 焦俊男<sup>1</sup> 刘建强<sup>2</sup> 丁静<sup>2</sup> 陆应诚<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京, 210023

<sup>2</sup> 自然资源部国家卫星海洋应用中心, 北京, 100081

**摘要:**水面耀光反射在海洋光学遥感中难以忽略,其差异有助于海洋目标监测,但会降低水色信息反演精度,因此耀光反射信号的精确计算或评估成为海洋遥感研究热点之一。受遥感尺度效应影响,适用于粗空间分辨率数据的耀光统计模型难以直接应用于高空间分辨率光学遥感数据。利用近红外-短波红外水体吸收特征的谱间关系法是实现高空间分辨率海洋光学数据太阳耀光校正的有效途径。以 50 m 空间分辨率的海洋一号 C/D (HY-1 C/D) 卫星海岸带成像仪 (coastal zone imager, CZI) 数据为对象,基于水面耀光反射的光学过程与海洋目标图像特征,分析了高空间分辨率海洋光学数据中耀光反射的图像特征及遥感尺度效应,并发展了相应的 CZI 耀光校正方法。结果表明,校正后 CZI 数据中涡旋、水团等水色信息得以凸显;受耀光反射影响的瑞利校正反射率(460 nm、560 nm 和 650 nm 波段)的不确定性分别降低了 65%、80% 和 89%。所提方法不依赖大气参数,有助于 HY-1 C/D 卫星 CZI 数据快速开展近海水色的动态监测与反演。

**关键词:**耀光反射;海洋一号 C/D 卫星;海岸带成像仪;耀光校正;高空间分辨率

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2024-09-27

DOI: 10.13203/j.whugis20220628

文章编号:1671-8860(2025)09-1904-10

### Correction of Sunlight Reflection from Ocean Surface in HY-1 C/D CZI Images

ZHOU Juyuan<sup>1</sup> WANG Mingxiu<sup>1</sup> JIAO Junnan<sup>1</sup> LIU Jianqiang<sup>2</sup> DING Jing<sup>2</sup> LU Yingcheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

<sup>2</sup> National Satellite Ocean Application Service, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

**Abstract: Objectives:** Sunlight is a significant phenomenon in marine optical remote sensing, and presents a dual character: its variability aids in marine target monitoring, yet it degrades the retrieval accuracy of water color information. Therefore, the precise calculation or assessment of sunlight signals has become a key research focus in ocean remote sensing. Affected by the remote sensing scale effect, statistical sunlight models suitable for coarse spatial resolution data are difficult to apply directly to high spatial resolution remote sensing data. The inter-band relationship approach, leveraging the absorption characteristics of water in the near-infrared (NIR) to shortwave infrared (SWIR) spectrum, provides an effective pathway for sunlight correction in high spatial resolution marine optical remote sensing data. **Methods:** This paper utilizes data from the 50 m spatial resolution coastal zone imager (CZI) aboard the Haiyang-1 C/D (HY-1 C/D) satellites. Based on the optical processes of sunlight and the image characteristics of marine targets, we conducted a detailed analysis of the image features of sunlight and the remote sensing scale effects within high spatial resolution marine optical data. Furthermore, a dedicated sunlight correction method for CZI data was developed. The results demonstrate that post-correction CZI data effectively highlight water color information such as eddies and water masses. **Results:** The uncertainty of Rayleigh correction affected by sunlight reflection at 460 nm, 560 nm, and 650 nm is reduced by 65%, 80%, and 89%, respectively. **Conclusions:** The

基金项目:国家自然科学基金(42371380);南京大学 AI & AI for Science 专项资助(0904-14380035)。

第一作者:周巨源,硕士,主要从事海洋遥感研究。mg20270121@smail.nju.edu.cn

通信作者:陆应诚,博士,教授。Luyc@nju.edu.cn

proposed method does not rely on atmospheric parameters, facilitating the rapid dynamic monitoring and retrieval of coastal water color using CZI data.

**Key words:** sunglint reflection; HY-1 C/D satellite; coastal zone imager (CZI); sunglint correction; high spatial resolution

耀光反射是指入射光在海气界面上发生的镜面反射现象,其强度受到太阳辐射、观测几何角度、海面粗糙度的影响<sup>[1]</sup>,海洋光学图像中耀光反射差异可用于海洋目标(如溢油、漂浮藻类、内波等)的检测<sup>[2-4]</sup>。由于耀光反射信号中并不包含水体信息,强烈的耀光反射会导致部分遥感观测数据失效,因此图像耀光的存在会影响水体叶绿素和悬浮物浓度等水色信息的遥感反演精度<sup>[5-6]</sup>。尽管调整卫星光学传感器的成像角度可以避免强烈的耀光反射的影响,但由于遥感观测尺度效应的存在,高空间分辨率海洋光学遥感图像中,改变观测角度并不能完全消除耀光反射差异<sup>[1]</sup>。为了保证遥感数据的可用性,耀光反射校正一直是水色遥感研究中关注的重点问题。

在粗空间分辨率光学遥感数据中,海洋表面可以看作一个粗糙的镜面,在这种镜面上形成的耀光反射具有空间统计特征<sup>[7]</sup>。如在中等分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 250 m 分辨率海洋光学数据中存在明显的耀光反射区,使用 Cox-Munk 统计模型,通过风速、风向可以估算出耀光反射率及其空间分布<sup>[8-9]</sup>,开展耀光反射校正或进行耀光干扰区域剔除。而在高空间分辨率数据中,粗糙的海表则视为众多微小镜面(即微面元)的集合,海表不同区域的微面元在特定角度下均可能形成耀光反射<sup>[10-14]</sup>,较小范围内太阳天顶角、传感器天顶角、相对方位角等观测角度变化不大时,海表的耀光反射差异主要来源于海面粗糙度差异<sup>[13]</sup>。如在 Landsat 8 陆地成像仪(operational land imager, OLI) 30 m 空间分辨率以及哨兵二号卫星(Sentinel-2)多光谱成像仪(multispectral imager, MSI) 10 m 空间分辨率的海洋光学遥感数据中,部分微面元上的镜面反射被传感器探测到,在影像数据中出现离散性的耀光反射图像特征,此时统计模型则不再适用<sup>[14]</sup>。

为了实现高空间分辨率海洋光学数据的耀光校正,学者们采用了基于谱间关系的耀光校正策略<sup>[15-19]</sup>。这种策略的使用有 3 个基本条件:(1)水体在近红外(near-infrared, NIR)和短波红外波段(short-wave infrared, SWIR)对入射光具有强吸收特征,因此当该波段离水反射率为 0 时,

图像上的反射信号可认为均来源于耀光反射和大气散射<sup>[18]</sup>;(2)清洁水体像元的水面耀光反射信号在可见光波段与 NIR/SWIR 的贡献具有一定的统计相关性;(3)在高空间分辨率数据中,小区域内的耀光反射也具有空间分异特点。在上述 3 个基本条件成立的情况下,基于含有耀光反射特征的区域建立像元样本,构建线性校正函数,可计算获得不同区域和不同波段的耀光反射贡献值,从而实现高空间分辨率数据中耀光反射信号的大致消除<sup>[20]</sup>。本文将这种像元样本称为统计窗口,统计窗口内包含由弱到强的耀光反射信号,用于计算校正函数中的相关参数。

HY-1 C/D 卫星是中国首个自主海洋水色业务卫星星座,其搭载的海岸带成像仪(coastal zone imager, CZI)刈幅达 950 km,星下点空间分辨率为 50 m。由于 CZI 具有大幅宽、高空间分辨率的特点,其图像中往往包含结构复杂的耀光反射现象。该类反射不仅与观测视角等几何参数密切相关,而且还受到海面状态(如风致粗糙度)变化的显著影响,从而在不同区域表现出多样化的空间分布特征。因此,为了提高 CZI 数据的利用率,提升 CZI 数据的水色信息反演精度,本文采用基于线性回归的谱间关系法,开展典型 CZI 数据的耀光反射校正研究,探究影响耀光校正结果的因素,为国产自主海洋光学卫星水色信息研究提供参考。

## 1 数据与数据预处理

HY-1 C/D 卫星分别于 2018 年 9 月和 2020 年 6 月发射,并于 2021 年实现双星组网,构建了覆盖上、下午轨道的对地观测体系。其搭载的 CZI 传感器具备蓝光(460 nm)、绿光(560 nm)、红光(650 nm)及近红外(825 nm) 4 个波段<sup>[21]</sup>,双星观测实现了对中国及周边海域的高时间分辨率(单星 3 天一次,双星组网可达 3 天两次)与高空间分辨率的海洋光学观测能力<sup>[22]</sup>,在国产高分率海洋光学数据方面填补了重要空白。

通过中国海洋卫星数据服务系统(<https://osdds.nsoas.org.cn/>)获取 2019—2022 年西北太平洋区域的 CZI 影像数据。数据筛选与预处理过

程如下:(1)云雾剔除。考虑到海洋光学数据易受云、雨、雾等大气条件影响<sup>[23]</sup>,为保障后续水体像元的定量分析质量,优先选取目视解译下无云或少云的观测数据;(2)水体清洁度筛选。谱间关系法更适用于清洁海水区域,因而避开如江苏近岸辐射沙脊群等高悬浮泥沙浓度的近岸水域;(3)数据预处理。针对CZI的L1B级辐亮度数据进行瑞利散射校正<sup>[24-25]</sup>,生成空间分辨率为50 m的瑞利校正(Rayleigh correction, RC)反射率数据,计算公式如下:

$$R_{RC} = \frac{\pi(L_{total} - L_{RC})}{F_0 \cos \theta_0} \quad (1)$$

式中, $R_{RC}$ 为RC反射率; $L_{total}$ 为卫星接收的总辐亮度; $L_{RC}$ 为瑞利散射辐亮度,通过瑞利查找表获取; $F_0$ 为地外太阳辐照度; $\theta_0$ 为太阳天顶角。随后对 $R_{RC}$ 数据进行几何校正与投影转换,使用Python提取地理控制点,采用多项式方法进行校正,将数据从原始图像坐标系映射至WGS-84地理坐标系,并进一步重投影至通用横轴墨卡托投影坐标系。

CZI RC反射率数据真彩色合成图像如图1所示,其中影像中的 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $d_1$ 区域为统计窗口,用于计算耀光校正参数, $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ 、 $d_2$ 与 $a_3$ 、 $b_3$ 、 $c_3$ 、 $d_3$ 区域为各图像耀光反射区的放大图,包含海面不同的耀光反射图像特征。

在CZI数据中,可以观测到两类典型的耀光反射特征。第一类是统计特征,这类特征主要与观测几何和海面粗糙度相关,空间变化很明显,如图1中表现为整景影像中自西向东方向的耀光强度变化;第二类是离散性特征,包括船只尾迹、海洋涡旋、锋面和低粗糙度反射区等局部扰动产生的耀光反射差异<sup>[26]</sup>,如图1中 $a_3$ 区域展示了高空间分辨率下观测到的典型船尾开尔文波,夹角约 $19.5^\circ$ <sup>[27]</sup>;  $b_3$ 区域为受到耀光干扰而边界不清的海面涡旋;  $c_3$ 区域包含多种扰动特征,如船尾波、锋面与低反射斑块;  $d_3$ 区域则同时呈现了多条船尾开尔文波以及耀光干扰引起的真彩色合成影像的色调偏差,这是由不同波段耀光反射差异所致。需要明确的是,这些耀光反射信号难以通过传统Cox-Munk海面耀光反射模型予以消除,必须结合CZI影像的特性开展专门的耀光校正方法研究,以提升水色遥感产品的质量与可靠性。

## 2 CZI数据耀光校正

针对高空间分辨率海洋光学数据中复杂的

耀光反射特征,传统适用于粗空间分辨率影像的经典耀光校正方法(如Cox-Munk模型)受限于遥感尺度效应,难以直接应用。因此,发展基于谱间关系的耀光校正方法,已成为目前高空间分辨率遥感数据中较为有效的处理策略。本文采用谱间关系法<sup>[16]</sup>进行CZI数据的耀光校正,其核心计算式为:

$$R_{RC\_deglim} = R_{RC} - \alpha(R_{RC\_NIR} - \beta) \quad (2)$$

式中, $R_{RC\_deglim}$ 、 $R_{RC\_NIR}$ 分别为耀光和近红外的RC反射率;参数 $\alpha$ 表示统计窗口内可见光波段与近红外波段反射率之间的线性关系斜率,反映了耀光在两个波段间的强度比例;参数 $\beta$ 为统计窗口中近红外波段反射率的最小值,用以估算该区域内大气散射与天空光在近红外波段的贡献。

由于统计窗口的选取将直接影响 $\alpha$ 和 $\beta$ 的计算结果,因此应合理确定窗口位置及其包含的水体特征。在选取统计窗口时,应遵循以下准则:(1)窗口范围内应涵盖多个耀光强度水平,用于捕捉光谱响应的变化;(2)窗口范围内应包含低粗糙度水体区域,认为其中存在受耀光干扰相对较小的像元,其在近红外波段的反射率可代表大气散射和天空辐射的背景信号;(3)基于水体在NIR/SWIR波段对入射光的强吸收特性,需尽量避开高悬浮物浓度区域(如近岸浑浊水域),以免影响回归分析的准确性。

基于上述条件,在图1的 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $d_1$ 区域中分别选取了4个具有代表性的统计窗口构建样本集,对可见光与近红外波段的RC反射率进行线性拟合分析,最终提取出4组耀光校正参数。利用上述公式对CZI影像进行逐像元校正。

## 3 结果与分析

### 3.1 耀光校正参数

在CZI数据的耀光反射校正中,选取合适的统计窗口并据此确定有效的校正参数是最关键的步骤。本文以图1中白色虚线框 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $d_1$ 区域为统计窗口,通过3个可见光波段与NIR波段的RC校正反射率之间的线性回归分别计算耀光校正参数,相关结果如图2所示。图2中, $R^2$ 表示相关系数, RMSE(root mean square error)为均方根误差,  $R_{RC460}$ 、 $R_{RC560}$ 、 $R_{RC650}$ 分别为在460 nm、560 nm、650 nm的RC反射率。根据图1中不同统计窗口下耀光反射的变化情况以及图2中相应波段间的统计关系,可以归纳出以下结论:(1)在开

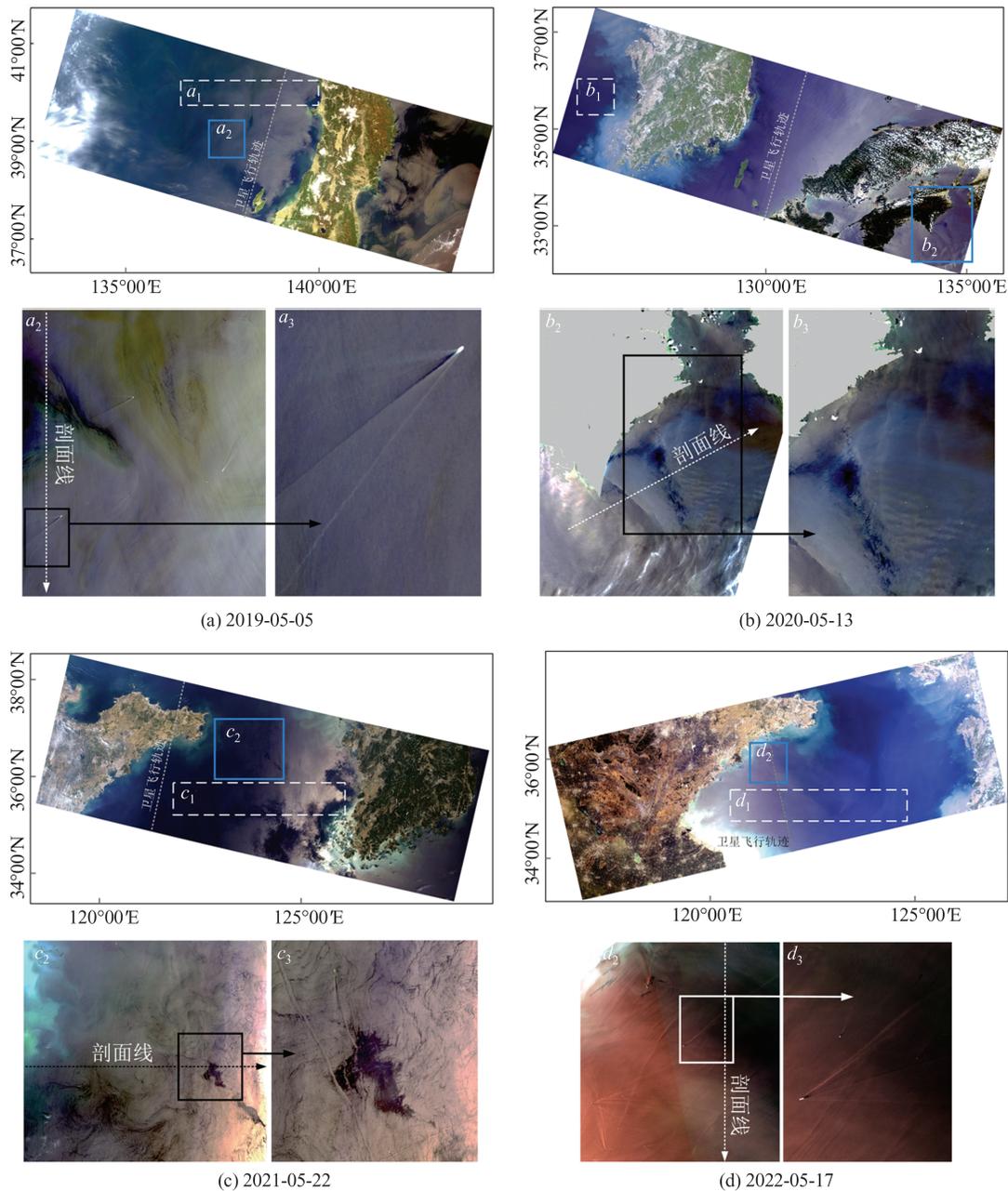


图1 CZI 瑞利校正反射率数据真彩色合成图像

Fig. 1 RGB Images of CZI RC Reflection Data

阔海域清洁水体背景下,尽管耀光反射存在一定复杂性,但可见光与近红外波段的  $R_{RC}$  反射率之间整体呈现良好的线性关系,数据离散性较小(图 2(a)、2(c)),因此能够提取出稳定且有效的耀光校正参数;(2)在近岸水体背景下(图 1 中  $b_1$ 、 $d_1$  区域),由于水色变化显著,散点的离散程度较大,如在图 2(b)、2(d)中,黑色虚线圈出的部分散点因水色差异影响在 NIR 波段反射率上表现异常,但是其可见光与 NIR 波段的 RC 反射率之间的整体相关性依然明显,说明在此情况下也可给出具有参考价值的校正参数。

### 3.2 耀光校正结果

基于上述耀光校正方法,对图 1 中具有不同耀光反射特征的 4 幅 CZI 影像进行处理,校正结果如图 3 所示。通过对比图 1 与图 3,可见耀光校正正在以下方面取得了效果:

1) 几何观测差异引起的耀光反射特征被有效抑制。在校正前的图像中,耀光反射强度存在由西向东逐渐增强或减弱的趋势;经过校正后,该趋势明显消除,图像背景的水色趋于一致。

2) 由海面局部粗糙度变化引起的小尺度耀光反射特征得到了有效校正。具体表现包括:(1)船尾开尔文波特征的消除。船只扰动导致局

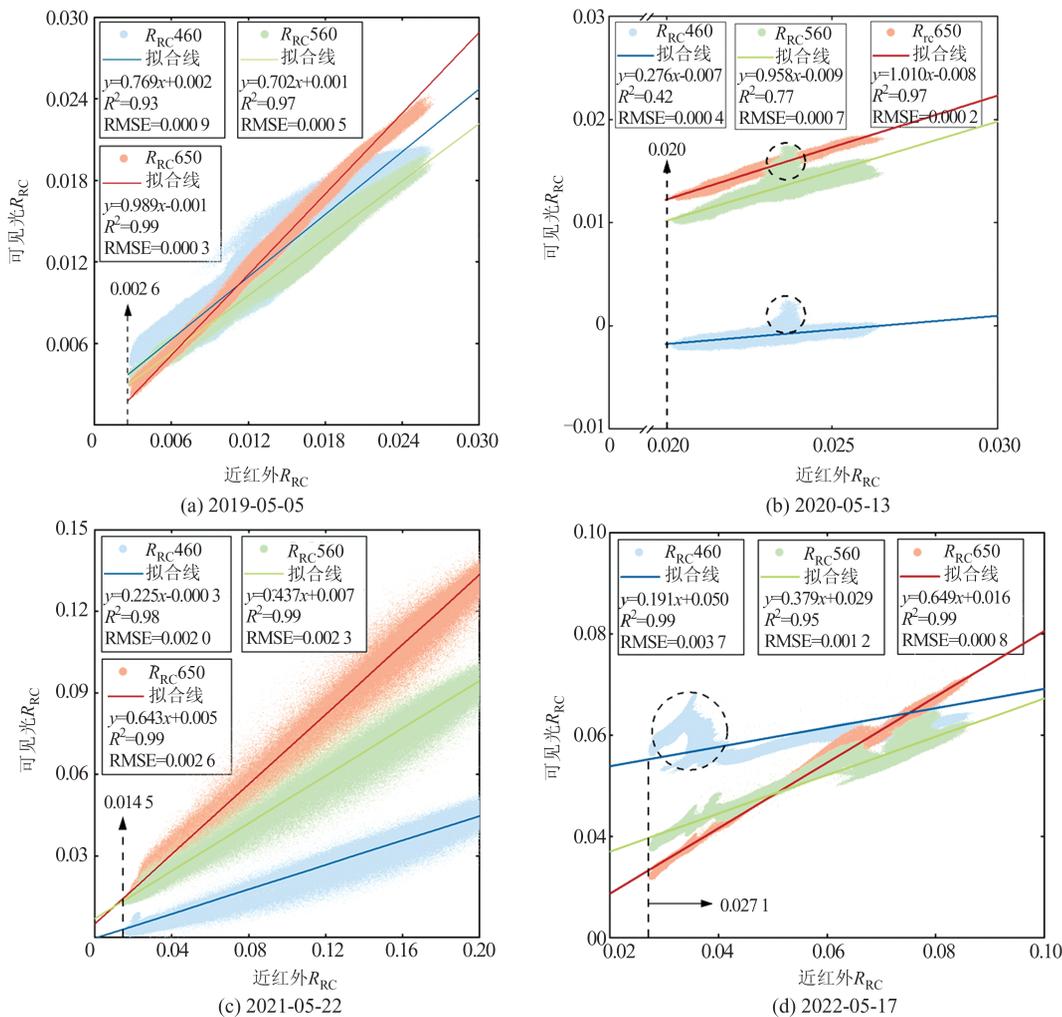


图2 CZI数据可见光与近红外波段的谱间关系及耀光校正参数

Fig. 2 Relationship Between Visible and Near-Infrared Bands and Sunlight Correction Parameters of CZI Images

部海面粗糙度变化,从而产生耀光反射差异,在图像中表现为明显的开尔文波痕迹(见图1的 $a_3$ 和 $d_3$ 区域),校正后该特征基本被消除(见图3的 $a_3$ 和 $d_3$ 区域)。(2)海洋中尺度结构信号增强。校正前受到耀光干扰,中尺度涡旋与水团的边界难以分辨(见图1的 $b_2$ 和 $d_2$ 区域),校正后结构显著增强,更易识别(见图3的 $b_2$ 和 $d_2$ 区域)。(3)低粗糙度区域的图像细节得以恢复。耀光校正前,海面因受到复杂海洋动力的影响,形成的锋面或低反射区在图像中表现为黑色丝状或斑块状特征(见图1的 $a_2$ 、 $c_2$ 和 $c_3$ 区域),其与周围水体形成明显的暗对比,经校正处理后,这些区域的反射信号被加强,水体特征更加清晰(见图3的 $a_2$ 、 $c_2$ 和 $c_3$ 区域)。

3)耀光校正后图像色调更符合遥感水色特征的常规认知。由于红光波段的耀光反射大气透射率高于绿光和蓝光波段,未校正的CZI真彩色图像往往呈现红色偏调(见图1的 $c_2$ 、 $d_2$ 区域)。

经耀光校正后,图像整体色调转为蓝色,符合遥感水色特征的一般认知(见图3的 $c_2$ 、 $d_2$ 区域)。

### 3.3 评估与分析

尽管上述耀光校正结果在图像层面已体现出一定效果,但由于缺乏原位实测数据,尚难以进行绝对精度验证。因此,本文对CZI数据耀光校正前后的 $R_{RC}$ 数值变化进行对比分析,作为评估校正有效性的替代手段。沿着图1和图3中的白色虚线剖面,按照箭头所示采样方向提取耀光校正前后的RC反射率数据。这些剖面覆盖了包括船尾开尔文波、中尺度涡旋和水团、低粗糙度水体、锋面等多种典型耀光反射差异区域(见图1的 $a_2$ ~ $d_2$ 区域)。对比分析结果如图4所示,主要发现以下变化:首先,耀光校正后各波段 $R_{RC}$ 数值整体低于校正前,表明非水面耀光反射的信号贡献得到有效抑制;其次,观测几何差异引起的耀光空间变化被成功消除,图1的 $b_2$ 和 $c_2$ 区域中沿剖面方向耀光强度分别逐渐减弱和增强,反映在

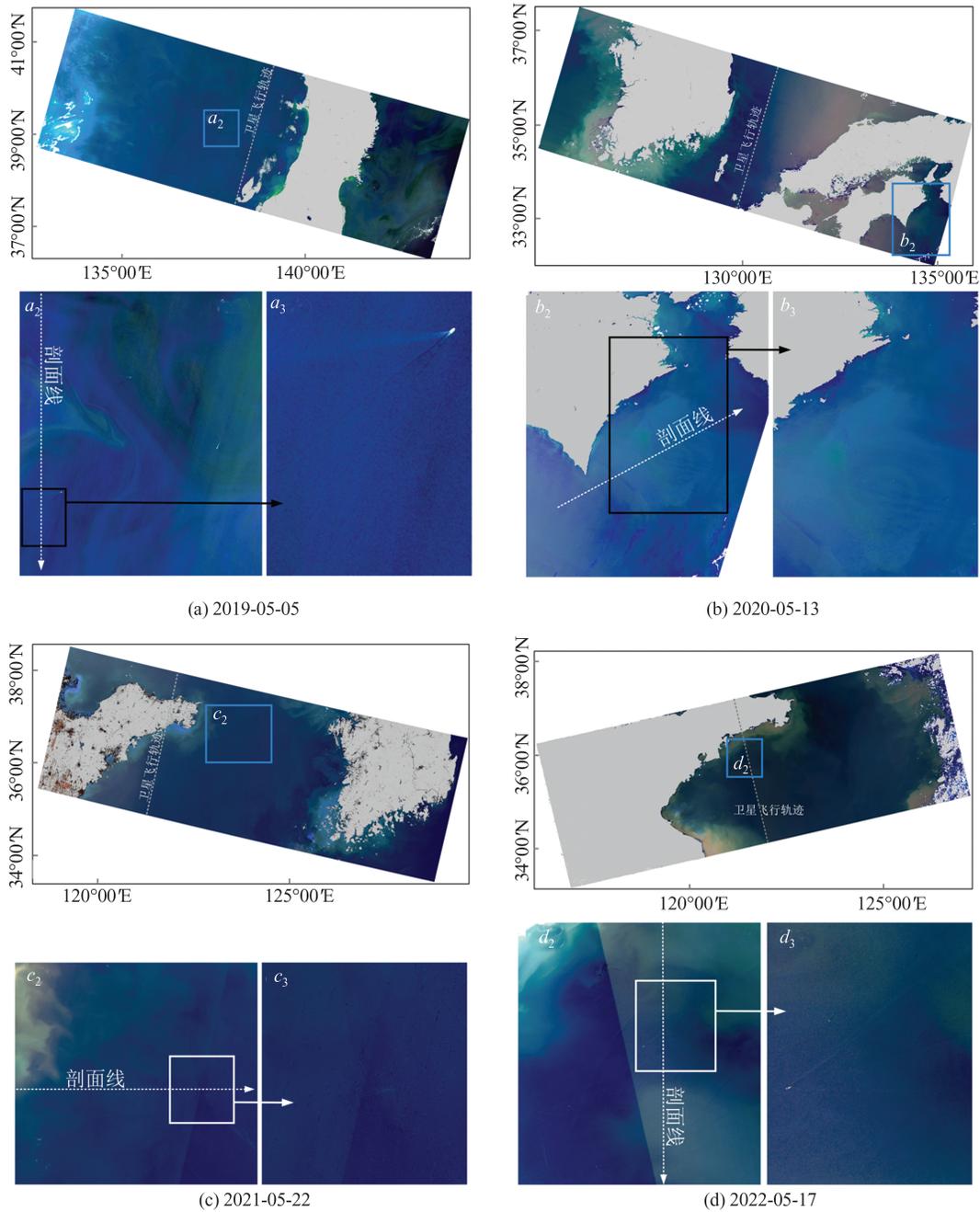


图 3 CZI<sub>RC</sub> 数据耀光校正后真彩色合成图像

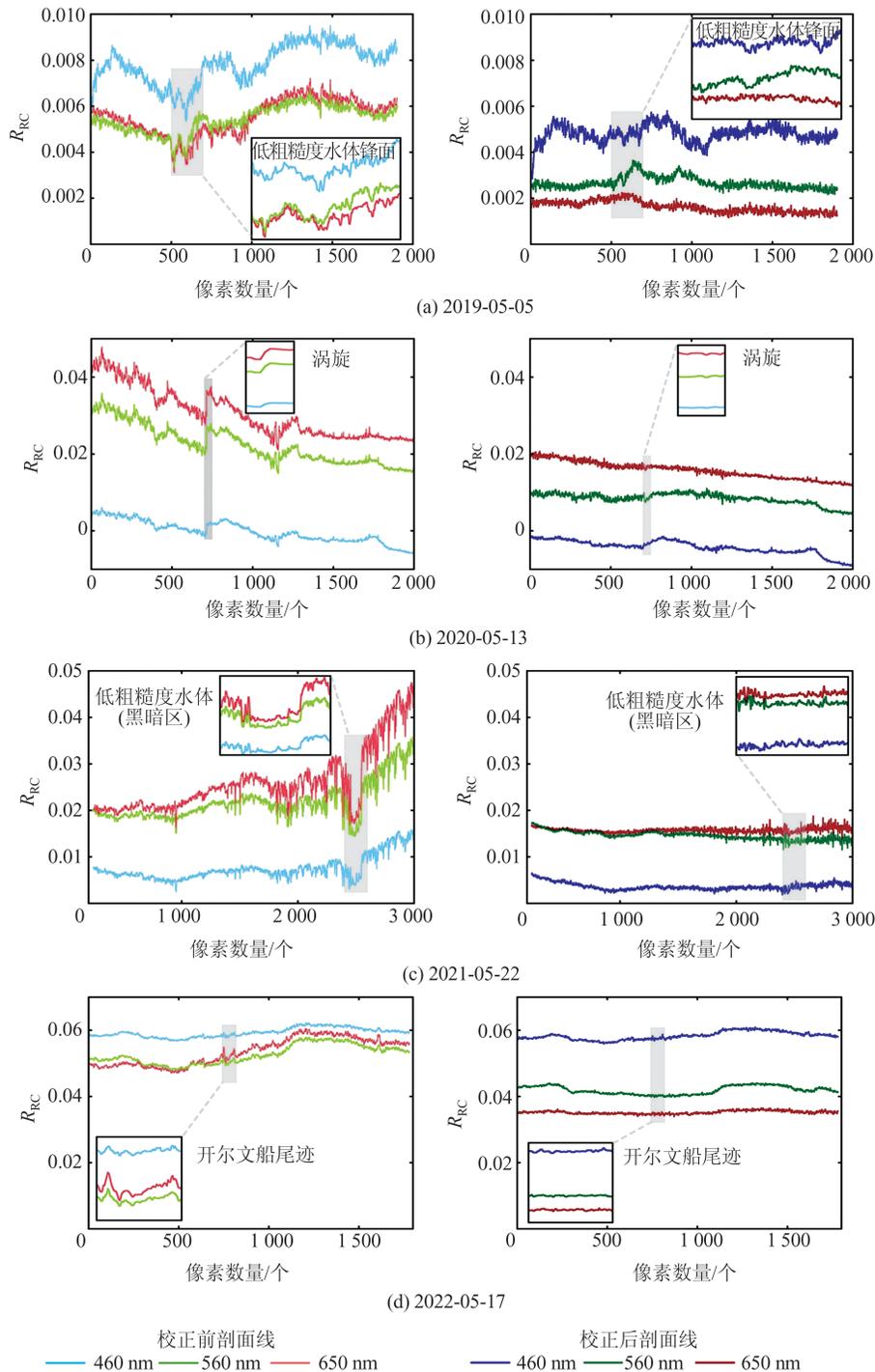
Fig. 3 RGB Images of CZI  $R_{rc}$  Data After Sunglint Correction

图 4(b)和图 4(c)中为  $R_{RC}$  曲线分别呈下降或上升趋势,在耀光校正后,这些像元剖面线趋于平稳,且反射率波动明显减小,说明几何相关耀光影响被显著削弱;最后,海面粗糙度变化导致的局部耀光异常得到有效校正,如图 4 中局部放大图所示,船尾开尔文波、涡旋边界、锋面等对应的  $R_{RC}$  波动在校正后基本消除,进一步验证了本文方法对高空间分辨率图像上耀光反射的抑制能力。

进一步对耀光校正前后的图像和  $R_{RC}$  分布直方图进行对比分析,结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,耀光校正后 CZI 真彩色合成图像的水色光

谱特征更贴近遥感观测认知。耀光校正前,可见光波段  $R_{RC}$  的直方图分布呈现异常,不仅数值范围较广,峰值位置也不稳定,表明耀光干扰显著;耀光校正后,  $R_{RC}$  分布整体向低值区间偏移,并趋于高斯正态分布。需要说明的是,耀光校正后直方图出现轻微波动(图 5(d)),该特征源于 CZI 中左右 2 个电荷耦合原件阵列拼接成像所致。

为了进一步验证耀光校正的实际效果,并评估 CZI 数据在校正后反演水色信息的能力,本文引入准同步 MODIS 数据进行对比分析。以图 1(a)所示 2019-05-05 的 CZI 影像为例,选取同一日期、

图4 CZI数据耀光校正前后剖面线上的 $R_{RC}$ 对比Fig. 4 Comparison of  $R_{RC}$  Values Before and After Sunglint Correction

同一海域、成像时间相差仅 12 min 的 MODIS 数据作为参考,考虑到该时间间隔内海况变化较小,可认为二者具备较强的时空对应性。将 CZI 数据重采样至 250 m 空间分辨率,并与 MODIS 数据进行对比。尽管 CZI 与 MODIS 在中心波长、带宽及信噪比等参数设置上存在差异,但是本文不对这些差异进行深入讨论,仅聚焦于两者在可见光波段  $R_{RC}$  表现上的一致性。对 CZI 数据

进行耀光校正前后的  $R_{RC}$  与 MODIS 数据对比分析,结果如图 6 所示。图 6 中 Mean 表示均值,STD (standard deviation) 表示标准差。

从图 6 可以看出,耀光校正显著改善了 CZI 水色空间信息的表达能力。校正前,CZI 图像中存在明显耀光干扰,影响海洋中尺度结构(如涡旋)特征的识别;校正后,水色信号更为清晰,涡旋等结构得以凸显,并在空间形态上与 MODIS

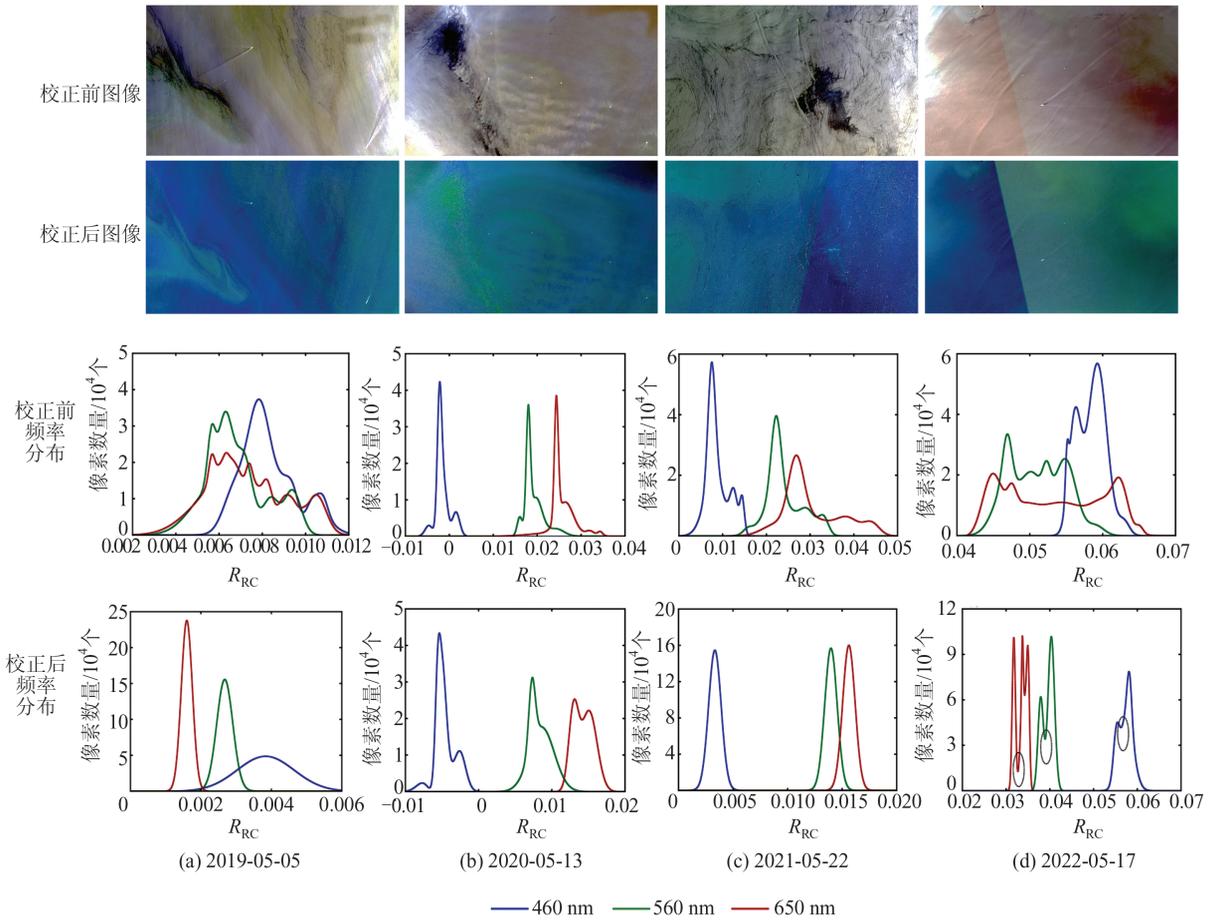


图 5 CZI 数据耀光校正前后典型区域  $R_{RC}$  的频率分布直方图对比

Fig. 5 Comparison of Frequency Histograms of  $R_{RC}$  in Typical Regions Before and After Sunglint Correction

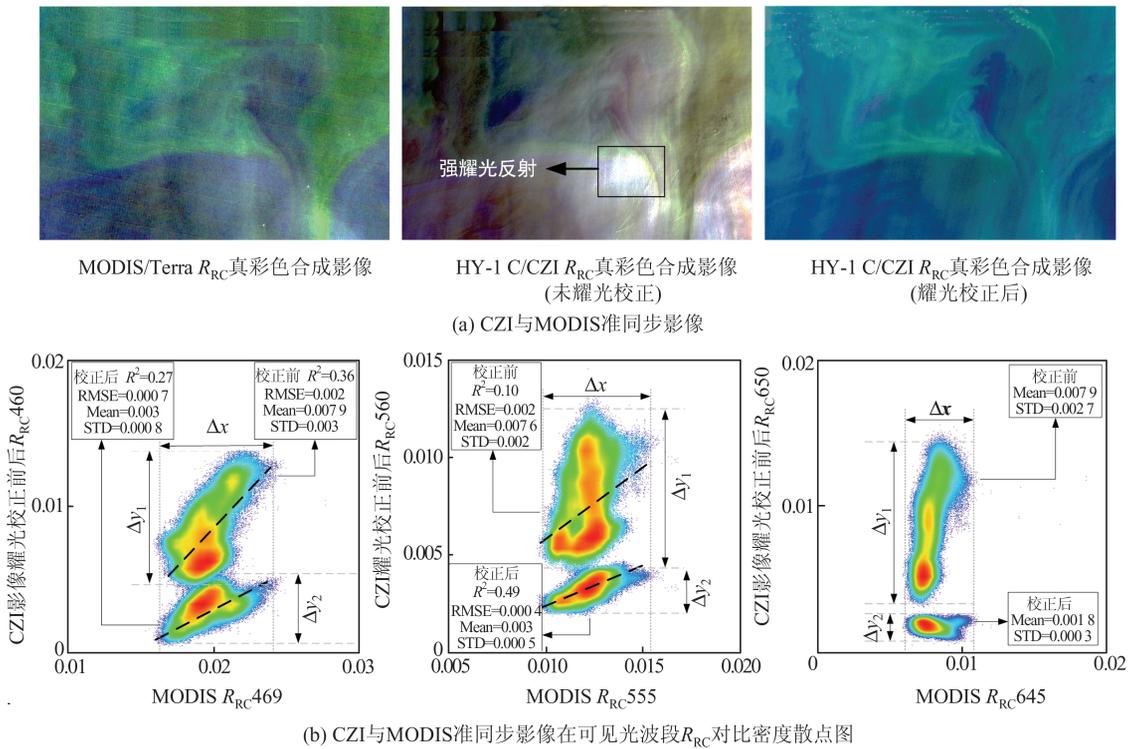


图 6 CZI 与 MODIS 准同步数据的对比验证

Fig. 6 Comparison of CZI and MODIS Synchronous Images

图像特征保持良好一致性(见图6(a))。在典型I类水体中,水色主要受叶绿素浓度主导,绿光波段是关键反映指标。对比CZI校正前后的绿光波段 $R_{RC}$ 与MODIS同波段数据发现,校正显著提升了相关性,相关系数 $R^2$ 由0.10提升至0.49, RMSE从0.002下降至0.0004,耀光反射产生的不确定性降低约80%,反射率精度显著增强(见图6(b))。对于蓝光波段,尽管校正后 $R^2$ 略有下降,但RMSE从0.002降至0.0007,误差减少近一个数量级,耀光反射产生的不确定性降低约65%。红光及长波段信号在I类水体中信号较弱,MODIS数据中红光波段 $R_{RC}$ 变化不大,而CZI原始数据中红光反射率受耀光干扰明显;校正后,该差异大幅减少,CZI与MODIS在红光波段的图像特征趋于一致,且 $R_{RC}$  Mean与STD分别下降78%和89%,表明耀光反射对红光波段反射率的影响已被有效抑制。

上述研究结果表明,谱间关系法在CZI数据的耀光反射校正中表现出良好效果,具备实际应用价值,然而这并不意味着所有CZI数据均可通过该方法实现理想的耀光校正。在实际操作中,仍存在一定的局限性,如在部分区域校正后可能出现负值现象(图4(b)),主要归因于不能完全忽略NIR波段的离水反射率贡献<sup>[28]</sup>,从而导致校正偏差。由此可见,该方法更适用于清洁海水环境,并在具备短波红外波段的光学传感器条件下应用效果更优。此外,当前HY-1 C/D卫星CZI载荷所获取的海洋遥感数据在辐射定标和大气校正精度方面仍存在一定的不足,未来仍需加强国产海洋光学遥感卫星数据在定标与大气校正方面的研究,持续提升产品的精度与稳定性,为海洋水色遥感应用提供更加可靠的数据支持。

## 4 结 语

耀光反射是海洋光学遥感领域长期关注的关键词。在高空间分辨率光学遥感图像中,传感器接收到的海面耀光信号更加复杂。本文以HY-1 C/D卫星CZI获取的覆盖中国近海及其邻近海域的数据为基础,开展了耀光反射校正研究。研究系统分析了CZI影像中由不同因素引发的耀光图像特征,提出了基于线性回归的耀光校正方法,无需依赖大气先验知识、便于快速部署等优势,实现了对不同耀光反射差异的有效校正;但也存在一定局限性,尤其是在参数估算过程中对统计窗口的选取较为敏感,不同传感器数

据或同一传感器在不同区域的影像可能需使用不同校正参数,从而影响其自动化处理能力。随着卫星辐射定标和大气校正精度的不断提升,未来该方法有望进一步向自动化方向发展,拓展其在CZI数据处理中的应用潜力。

## 参 考 文 献

- [1] KAY S, HEDLEY J D, LAVENDER S. Sun Glint Correction of High and Low Spatial Resolution Images of Aquatic Scenes: A Review of Methods for Visible and Near-Infrared Wavelengths[J]. *Remote Sensing*, 2009, 1(4): 697-730.
- [2] LU Y C, SUN S J, ZHANG M W, et al. Refinement of the Critical Angle Calculation for the Contrast Reversal of Oil Slicks Under Sunlight[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(1): 148-161.
- [3] HU C M, LI X F, PICHEL W G, et al. Detection of Natural Oil Slicks in the NW Gulf of Mexico Using MODIS Imagery[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(1): L01604.
- [4] JACKSON C. Internal Wave Detection Using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C11): C11012.
- [5] KAY S, HEDLEY J, LAVENDER S. Sun Glint Estimation in Marine Satellite Images: A Comparison of Results from Calculation and Radiative Transfer Modeling[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(23): 5631-5639.
- [6] STEINMETZ F, DESCHAMPS P Y, RAMON D. Atmospheric Correction in Presence of Sun Glint: Application to MERIS[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9783-9800.
- [7] JACKSON C R, ALPERS W. The Role of the Critical Angle in Brightness Reversals on Sunlight Images of the Sea Surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C9): C09019.
- [8] ZHANG H, WANG M H. Evaluation of Sun Glint Models Using MODIS Measurements[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(3): 492-506.
- [9] COX C, MUNK W. Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter[J]. *Journal of the Optical Society of America* (1917-1983), 1954, 44(11): 838.
- [10] ZHANG H G, YANG K, LOU X L, et al. Observation of Sea Surface Roughness at a Pixel Scale Using Multi-Angle Sun Glitter Images Acquired by

- the ASTER Sensor[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 208: 97-108.
- [11] KUDRYAVTSEV V, YUROVSKAYA M, CHAPRON B, et al. Sun Glitter Imagery of Ocean Surface Waves. Part 1: Directional Spectrum Retrieval and Validation [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(2): 1369-1383.
- [12] KUDRYAVTSEV V, YUROVSKAYA M, CHAPRON B, et al. Sun Glitter Imagery of Surface Waves. Part 2: Waves Transformation on Ocean Currents [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(2): 1384-1399.
- [13] HARMEL T, CHAMI M. Estimation of the Sunlight Radiance Field from Optical Satellite Imagery over Open Ocean: Multidirectional Approach and Polarization Aspects [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(1): 76-90.
- [14] WU X Y, LU Y C, JIAO J N, et al. Using Sea Wave Simulations to Interpret the Sunlight Reflection Variation with Different Spatial Resolutions [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 19: 1501304.
- [15] HOCHBERG E J, ANDREFOUET S, TYLER M R. Sea Surface Correction of High Spatial Resolution IKONOS Images to Improve Bottom Mapping in Near-Shore Environments [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(7): 1724-1729.
- [16] HEDLEY J D, HARBORNE A R, MUMBY P J. Technical Note: Simple and Robust Removal of Sun Glint for Mapping Shallow-Water Benthos [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(10): 2107-2112.
- [17] LYZENGA D R, MALINAS N P, TANIS F J. Multispectral Bathymetry Using a Simple Physically Based Algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(8): 2251-2259.
- [18] JOYCE K. A Method for Mapping Live Coral Cover Using Remote Sensing [D]. Brisbane: The University of Queensland, 2011.
- [19] ZORRILLA N A, VANTREPOTTE V, NGOC D D, et al. Automated SWIR Based Empirical Sun Glint Correction of Landsat 8-OLI Data over Coastal Turbid Water [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): A294-A318.
- [20] HARMEL T, CHAMI M, TORMOS T, et al. Sunlight Correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-Sentinel-2 Imagery over Inland and Sea Waters from SWIR Bands [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 308-321.
- [21] JI H R, TIAN L Q, LI J, 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.
- [22] 刘锦超, 刘建强, 丁静, 等. HY-1C 卫星 CZI 载荷的黄海绿潮提取研究 [J]. *海洋学报*, 2022, 44(5): 1-11.
- LIU Jinchao, LIU Jianqiang, DING Jing, et al. A Refined Imagery Algorithm to Extract Green Tide in the Yellow Sea from HY-1C Satellite CZI Measurements [J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(5): 1-11.
- [23] FENG L, HU C M. Comparison of Valid Ocean Observations Between MODIS Terra and Aqua over the Global Oceans [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(3): 1575-1585.
- [24] VANHELLMONT Q, RUDDICK K. Acolite for Sentinel-2: Aquatic Applications of MSI Imagery [C]//The 2016 ESA Living Planet Symposium, Prague, Czech Republic, 2016.
- [25] 赵碧, 丁静, 刘建强, 等. 海洋白帽的高空间分辨率光学遥感估算分析 [J]. *遥感学报*, 2023, 27(1): 92-103.
- ZHAO Bi, DING Jing, LIU Jianqiang, et al. Estimation of Oceanic Whitecaps Using High Spatial-Resolution Optical Remote Sensing [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(1): 92-103.
- [26] GAGLIARDINI D A, COLÓN P C. Ocean Feature Detection Using Microwave Backscatter and Sun Glint Observations [J]. *Gayana (Concepción)*, 2004, 68(2): 180-185.
- [27] ZILMAN G, ZAPOLSKI A, MAROM M. On Detectability of a Ship's Kelvin Wake in Simulated SAR Images of Rough Sea Surface [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(2): 609-619.
- [28] KUTSER T, VAHTMÄE E, PRAKS J. A Sun Glint Correction Method for Hyperspectral Imagery Containing Areas with Non-Negligible Water Leaving NIR Signal [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2267-2274.