



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: HY-1 C/D 卫星 CZI 数据海面太阳耀光反射校正
作者: 周巨源, 汪明秀, 焦俊男, 刘建强, 丁静, 陆应诚
DOI: 10.13203/j.whugis20220628
收稿日期: 2023-06-04
网络首发日期: 2023-06-28
引用格式: 周巨源, 汪明秀, 焦俊男, 刘建强, 丁静, 陆应诚. HY-1 C/D 卫星 CZI 数据海面太阳耀光反射校正[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220628>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220628

引用格式：

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), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220628 (ZHOU Juyuan, WANG Mingxiu, JIAO Junnan, et al. Correction of seawater surface sunglint reflection from HY-1C/D CZI images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 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¹ 汪明秀¹ 焦俊男¹ 刘建强² 丁静² 陆应诚^{1,*}

¹ 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京, 210023

² 自然资源部国家卫星海洋应用中心, 北京, 100081

摘要: 耀光反射是海洋光学遥感数据中难以忽略的现象, 其差异有助于海洋环境问题的监测, 同时也给水色信息的反演带来影响, 准确计算或评估耀光反射信号是海洋遥感的一个研究热点。适用于粗空间分辨率数据的耀光统计模型, 因尺度效应等影响, 难以适用于高空间分辨率数据。发展基于近红外-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反射校正的有效途径。本文以空间分辨率为 50 米的海洋一号 C/D 卫星 (Haiyang-1C/D, HY-1C/D) 海岸带成像仪 (Coastal Zone Imager, CZI) 数据为研究对象, 基于耀光反射的光学过程和海洋目标的图像特征, 详细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与遥感尺度效应, 发展了 CZI 数据可见光波段耀光反射校正的方法。研究结果表明耀光校正后, CZI 数据中涡旋、水团等水色信息得以凸显; CZI 数据 R_{rc} 反射率在 460 nm, 560 nm 以及 650 nm 不确定性分别降低了 65%, 80%, 89%。该方法不依赖于大气参数, 有助于利用 CZI 数据快速开展近海水色的动态监测和反演。

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

Correction of seawater surface sunglint reflection from HY-1C/D CZI images

ZHOU Juyuan¹ WANG Mingxiu¹ JIAO Junnan¹ LIU Jianqiang² DING Jing²LU Yingcheng^{1,*}

¹ International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

² National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China

收稿日期: 2023-06-04

项目资助: 国家自然科学基金 (42071387)

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

通讯作者: 陆应诚, 博士, 教授。Luyc@nju.edu.cn

Abstract: Sun glint reflection is a phenomenon that is hard to ignore in marine optical remote sensing. Its difference helps the monitoring of marine environmental problems but brings influence to the inversion of ocean color information. Accurate calculation or evaluation of sun glint reflection signal is a research hotspot in marine remote sensing. The sun glint statistical model suitable for coarse spatial resolution data is difficult to be applied to high spatial resolution data due to the influence of the remote sensing scale effect. In this case, an effective remedy lies in developing a method with the spectral relationship based on the water absorption characteristics of near-infrared or short-wave infrared band. In this study, taking the Coastal Zone Imager (CZI) data of Haiyang-1 C/D (HY-1C/D) satellite with a spatial resolution of 50 m as the research object, based on the optical process of sun glint reflection and the image features of ocean targets, the image features and remote sensing scale effect of sun glint reflection in high spatial resolution images were analyzed in detail. As a result, the sun glint reflection correction method of CZI images in visible band was developed. It is suggested that ocean color information such as eddy and water mass are prominent in CZI images after sun glint correction; and the uncertainty of the R_{rc} reflectance at 460 nm, 560 nm, and 650 nm is reduced by 65%, 80%, and 89%, respectively. Furthermore, the method does not depend on the atmospheric parameters, which is helpful to realize the dynamic monitoring and inversion of offshore ocean color quickly.

Key words: sun glint reflection; HY-1C/D; CZI; sun glint correction; high spatial resolution

耀光反射是发生在海气界面上的镜面反射过程，其强度不仅取决于太阳辐照度、观测几何以及海面粗糙度^[1]，还受海面漂浮目标的影响^[2]。海洋监测目标(如溢油、漂浮藻类，内波等)可以在海面形成耀光反射差异，利用这种差异有助于目标的监测^[3-4]。但是，海面耀光反射信号本身并不包含水体信息，会影响水色信息(如叶绿素浓度、水体悬浮物浓度)的反演精度^[5-6]，强烈的耀光反射还会导致部分观测数据失效，因此耀光反射校正一直是水色遥感研究关注的重点问题。

卫星光学传感器可以通过改变成像角度的方式避免强烈耀光反射的影响，但是由于遥感观测尺度效应的存在，高空间分辨率海洋光学数据中，耀光反射差异难以通过改变观测角度的方式实现完全的消除，耀光反射仍是难以忽略的现象^[1]。在粗空间分辨率数据中，海表可以被视为一个完整的镜面，在该镜面上形成的耀光反射具有空间统计特征^[7]，如在中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 250 m 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^[8, 9]，从而实现耀光反射的校正。在高空间分辨率数据中，粗糙的海表被视为众多微小镜面(称为“微面元”)的集合，位于海表不同区域的微面元都有可能在特定的

角度下形成耀光反射^[10-14]。某一较小范围海域内太阳天顶角、传感器天顶角、相对方位角等观测角度差异不大时,该海域表面的耀光反射差异主要来源于海面粗糙度的不同^[13]。如在 Landsat-8 陆地成像仪 (Operational Land Imager, OLI) 30 m 空间分辨率及哨兵二号卫星 (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”对入射光的镜面反射恰好被传感器探测到,在影像数据中形成离散性的耀光反射图像特征,适用于粗空间分辨率的统计模型,此时则难以适用于高空间分辨率数据的耀光反射校正^[14]。

发展基于谱间关系的耀光校正方法,是目前高空间分辨率海洋光学数据耀光校正的有效策略^[15-19]。其关键在于: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,假设在该波段离水反射率为零,认为该波段的反射信号来源于耀光反射和大气散射^[18];2) 清洁水体像元可见光波段的耀光反射率与近红外或短波红外的反射率呈线性相关;3) 高空间分辨率数据中,耀光反射具有区域分异的特点;4) 基于包含耀光反射特征的区域建立像元样本(本文统称为统计窗口,在一定范围的空间内包含由弱到强的耀光信号,用以计算耀光校正参数),构建线性校正函数,计算出各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消除^[20]。

HY-1C/D 卫星是中国首个国产海洋水色业务卫星,其上搭载的海岸带成像仪 (CZI),刈幅达 950 km,星下点空间分辨率为 50 m。由于具有大幅宽、高空间分辨率的特点,CZI 数据中包含复杂的耀光反射图像特征,既存在由观测几何主导的耀光反射差异,又存在由海面粗糙度主导的耀光反射差异。为了提高 CZI 数据的利用率,揭示 CZI 数据表征的遥感水色信息,本研究基于可见光与近红外波段线性回归建立谱间关系的方法,开展典型 CZI 数据耀光反射校正研究,厘清影响耀光校正结果的相关因素,从而为国产自主海洋光学卫星水色信息的应用提供参考。

1 数据与数据预处理

HY-1 C/D 卫星先后于 2018 年 9 月/2020 年 6 月发射,2021 年双星正式组网成为上下午对地观测卫星,其上搭载的 CZI 传感器包含蓝 (460 nm)、绿 (560 nm)、红 (650 nm)、近红外 (825 nm) 四个波段^[21]。双星组网可以实现对中国及其周边海域高时相(单星为三天一次,双星组网为三天两次)、高空间分辨率的光学观测^[22],补充了中国近海高空间分辨率海洋光学数据中的国产卫星数据空白。通过中国海洋卫星数据服务系统 (<https://osdds.nsoas.org.cn/>),从西北太平洋海域 2019-2022 年 CZI 数据集中筛选并进行数据预处理,数据遴选基于如下考

虑：1) 通过目视解译选取无云或少云数据，由于海洋光学数据受云、雨、雾等因素影响^[23]，而本研究需要对传感器获取的水体像元信息进行定量运算，因此在选取研究数据时首先排除云、雨、雾等因素的干扰；2) 基于水体清洁度筛选数据，可见光与近红外波段线性回归的方法适用于清洁海水，因此选择研究区时避免近岸悬浮泥沙浓度过高的区域，如江苏近岸辐射沙脊群；3) 数据预处理，对 CZI L1B 级辐亮度数据进行瑞利校正^[24-25]，得到 50 m 分辨率的瑞利校正反射率数据 (R_{rc})。瑞利校正公式为：

$$R_{rc} = \frac{\pi(L_t - L_r)}{F_0 \cos \theta_0} \quad (1)$$

式中， L_t 为卫星接收的总辐亮度， L_r 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， θ_0 为太阳天顶角。对上述 R_{rc} 反射率数据进行几何校正和重投影，利用 Python 提取地理控制点进行多项式校正，将 R_{rc} 数据映射到 WGS-84 地理坐标系，并投影至 UTM 投影坐标系，具体的数据区域与时间如图 1 所示。

在大幅宽、高空间分辨率的 CZI R_{rc} 反射率数据中，存在海面大范围内耀光反射的统计性图像特征，表现为整景数据自西向东，海面耀光反射随观测几何的变化而由弱变强或由强变弱(图 1(a)-(d))；也存在小范围内耀光反射差异产生的离散性图像特征，如船尾迹、涡旋或锋面、低粗糙度反射区^[26]等(图 1(a3)-(d3))。其中，图 1(a3)为高空间分辨率下，传感器观测到的典型耀光反射图像特征——船尾开尔文波(夹角为 19.5° 的 V 形波^[27])；(b3)为海面涡旋，由于耀光反射的影响，涡旋水色差异不明显；(c3)包括船尾开尔文波、锋面以及低反射区；(d3)包括多条船尾开尔文波及受耀光反射影响的水色图像特征(不同波段耀光反射差异导致真彩色合成图像的色调偏红)。上述 R_{rc} 反射率数据中的耀光反射信号，不能通过 Cox-Munk 统计模型消除，因此需要开展特定的 CZI 数据耀光校正研究。

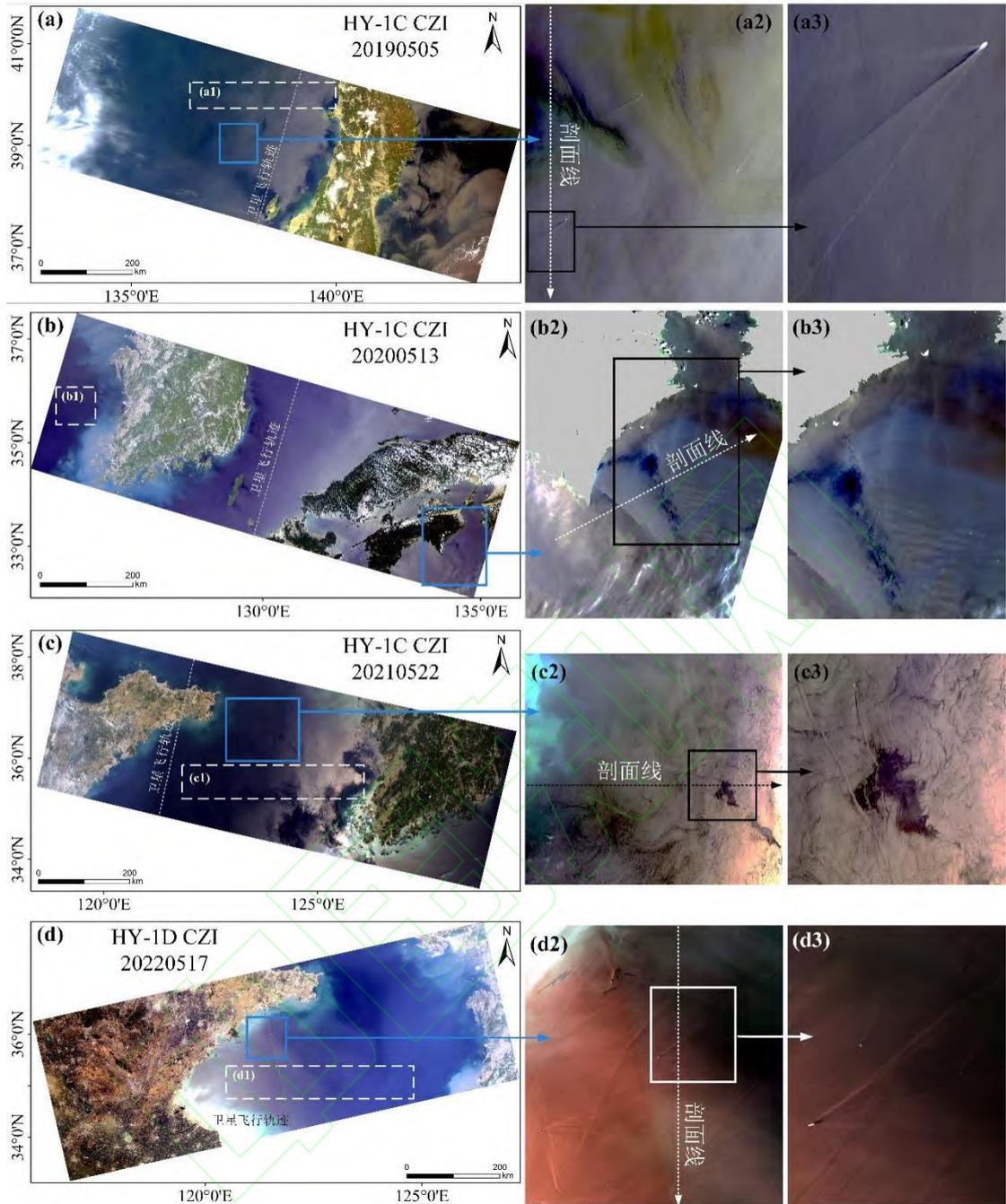


图 1 CZI R_{re} 数据真彩色合成图像 (R:650 nm, G: 560 nm, B: 460 nm)。(a) 2019 年 5 月 5 日, (b) 2020 年 5 月 13 日, (c) 2021 年 5 月 22 日, (d) 2022 年 5 月 17 日。(a1)-(d1)分别为对应数据的统计窗口,用于计算耀光校正参数, (a2)-(d2)与(a3)-(d3)为各图像的耀光反射区放大图,包含海面不同的耀光反射图像特征 Fig.1 CZI R_{re} RGB images (R:650 nm, G: 560 nm, B: 460 nm) on (a) May 5, 2019, (b) May 13, 2020, (c) May 22, 2021, and (d) May 17, 2022. (a1)-(d1) are the feature regions used to calculate sunglint correction parameters of corresponding images, (a2)-(d2) and (a3)-(d3) are enlarged images of typical sunglint reflection areas of corresponding images, including different image features of sunglint reflection on sea surface

2 CZI数据耀光校正

适用于粗空间分辨率数据的经典耀光校正方法(如 Cox-Munk 模型),由于海面耀光反射的遥感尺度效应,难以直接用于高空间分辨率海洋光学数据。发展基于谱间关系的耀光校正

方法，是目前高空间分辨率海洋光学数据耀光校正的有效策略，本研究基于该方法进行耀光校正的公式如下^[16]：

$$R_{rc_deglint} = R_{rc} - \alpha(R_{rcNIR} - \beta) \quad (2)$$

式中， α 是统计窗口内可见光波段与近红外波段反射率线性回归拟合线的斜率，表征耀光反射在上述波段间的比值关系； β 是统计窗口内近红外波段反射率的最小值，表征一定空间范围内大气散射信号在该波段的贡献。

由不同的统计窗口获取的 α 、 β 有所差异，因此需要重视统计窗口的选取及其内涵的耀光校正参数(α 、 β)的意义。本研究基于以下几点选取统计窗口：1) 统计窗口内包含不同程度的耀光反射；2) 统计窗口内存在低粗糙度水体区域，认为该区域中存在不受耀光反射干扰的水体像元，该像元在近红外波段的反射率值被用于评估大气散射和天空光的贡献；3) 该方法基于水体在近红外或短波红外对入射光的强吸收特征，选取统计窗口时需尽量避免高悬浮物水域(如近岸悬浮泥沙区域)。基于上述要求，分别选取适宜的统计窗口(图 1(a1)-(d1))，构建像元样本，对可见光与近红外波段的 R_{rc} 反射率数据进行回归分析，得到四组耀光校正参数，从而应用公式(2)实现对 CZI 数据耀光反射的校正，完整的流程如图 2 所示。

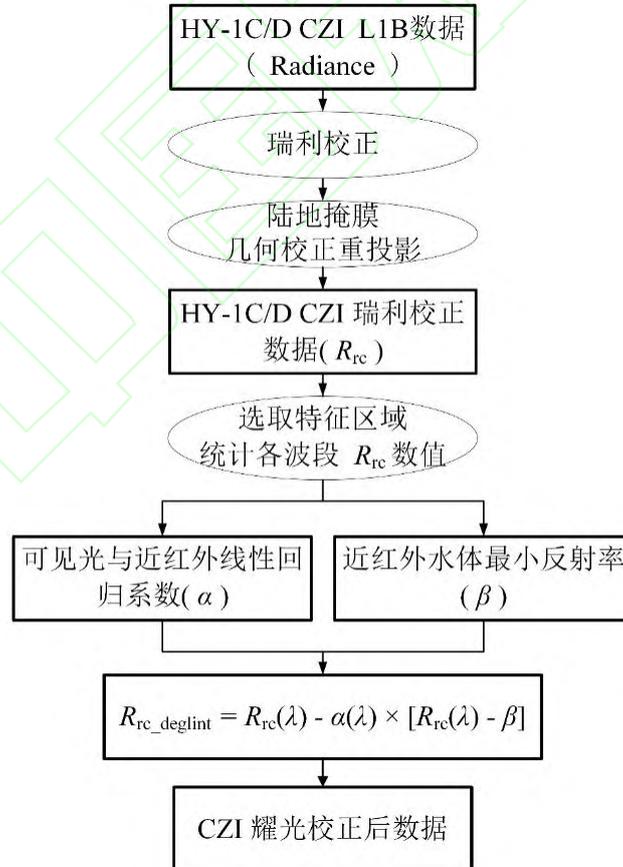


图 2 CZI 数据耀光校正技术流程图

Fig. 2 Flowchart of sunglint correction for CZI images

3 结果与分析

3.1 耀光校正参数

选取适宜的统计窗口并由此计算出有效的校正参数，是 CZI 数据耀光反射校正的关键所在。以图 1 中白色虚线框标记的区域为统计窗口(图 1(a1)-(d1))，通过可见光波段 R_{rc} 与近红外波段 R_{rc} 之间的线性回归，分别计算出耀光校正参数，结果如图 3 所示。对比不同统计窗口的耀光反射差异(图 1)及其对应的波段间统计关系(图 3)，不难看出：1) 开阔海水背景下，虽然存在复杂的耀光反射差异，但可见光与近红外波段的 R_{rc} 反射率具有良好的线性统计关系，且离散性较小(图 3(a)和 3(c))，可以确定有效的耀光校正参数；2) 近岸水体背景下(图 1(b1)和(d1))，背景水体的水色差异导致散点离散性较大，但是仍然存在呈线性相关趋势的散点，如在图 3(b)和 3(d)中，近红外波段 R_{rc} 反射率受近岸水体悬浮物影响表现异常(黑色虚线圈出的散点)，但可见光与近红外波段 R_{rc} 反射率依然具有显著的线性相关趋势，也可以获取有效的耀光校正参数。

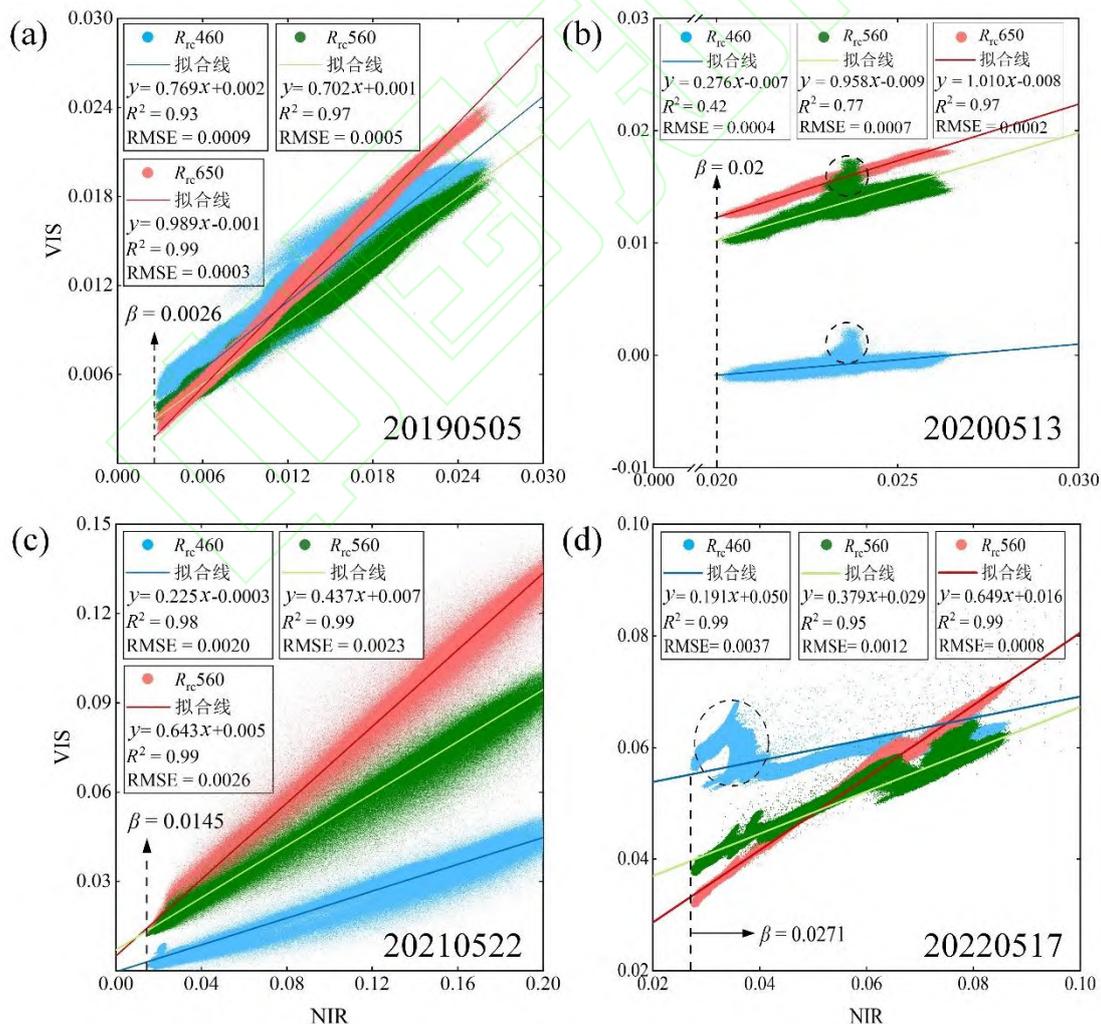


图 3 CZI 数据可见光与近红外波段的谱间关系及耀光校正参数。(a)-(d)分别对应图 1 中(a1)-(d1)统计窗口的

统计结果，横坐标为近红外波段(825nm) R_{rc} ，截距代表校正参数 β ，纵坐标为可见光波段(460nm、560nm、650nm) R_{rc} ，拟合线的斜率代表校正参数 α

Fig. 3 Relationship between visible and near-infrared bands and sunglint correction parameters of CZI images, and the (a)-(d) correspond to the statistical results of the characteristic regions (a1)-(d1) in Fig. 1, respectively, the abscissa is the R_{rc} of the near-infrared band (825 nm), intercept represents the correction parameter β , the ordinate is the R_{rc} of visible band (460 nm, 560 nm, 650 nm), the slope of fitted line represents the correction parameter α .

3.2 耀光校正结果

利用上述耀光校正方法，对图 1 四景含有不同耀光反射图像特征的 CZI 数据进行耀光校正，结果如图 4 所示。对比图 1 和图 4，耀光校正效果体现在以下方面：1) 由观测几何差异主导的耀光反射图像特征得到有效消除，即图像中耀光反射的强度自西向东由弱变强或由强变弱的现象消失，耀光校正后的图像背景水色均匀；2) 由小目标海面粗糙度差异主导的耀光反射图像特征得到有效消除，具体表现为：① 船尾开尔文波图像特征被消除。船只扰动海面使其粗糙度发生变化，进而在附近海面产生耀光反射差异，图像中的开尔文波特征(图 1(a3)和(d3))在耀光校正后被消除(图 4(a3)和(d3))；② 海洋涡旋和水团信号得以凸显。受耀光反射的影响，海洋中尺度涡旋和水团的图像特征无法清晰展现(图 1(b2)和(d2))，耀光校正后涡旋和水团得到增强显示(图 4(d2)和(d2))；③ 低粗糙度水体锋面及低反射区的图像特征被消除。复杂的海洋动力作用下，扰动的杂波在海表形成锋面，在数据中表现为黑色丝条状图像特征(图 1(a2)和(c2))，海表也会形成低粗糙度水体的低反射区，在数据中表现为黑色斑块状图像特征(图 1(c3))，耀光反射的差异使其覆盖的像元水体与背景水体呈暗对比，耀光校正后低粗糙度水面反射信号得到增强(图 4(a2), (c2)和(c3))；3) 耀光校正后的水色特征符合经验认知。由于耀光反射在红光波段的大气直射透过率大于绿光和蓝光波段^[28]，耀光校正前 CZI 真彩色合成图像的色调偏红(图 1(c2)和(d2))，耀光校正后 CZI 真彩色合成图像的整体呈蓝色，符合对遥感水色特征的经验认知(图 4(c2)和(d2))。

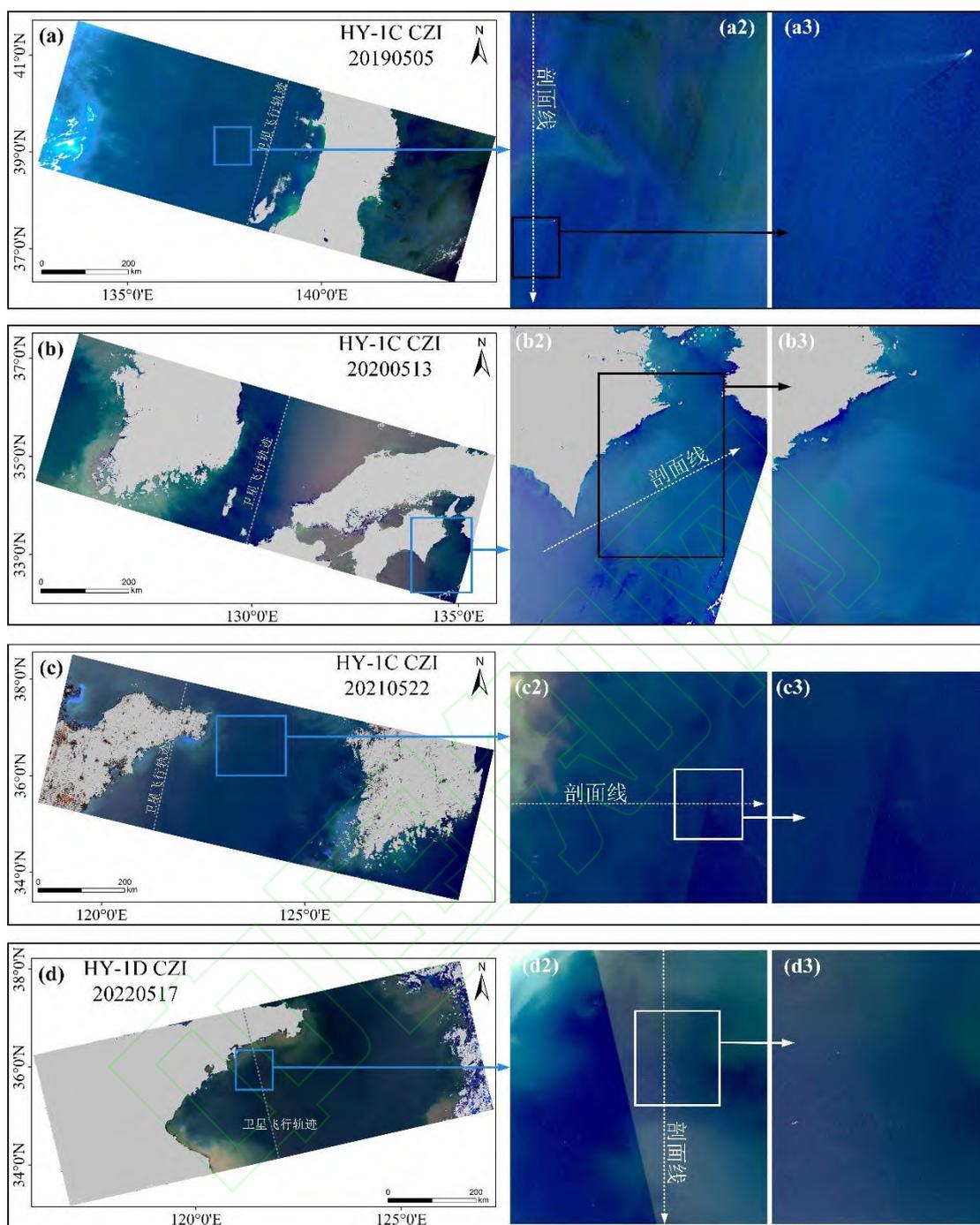


图 4 CZI R_{rc} 数据耀光校正后真彩色合成图像，与校正前图像的拉伸方式一致。(a) 2019 年 5 月 5 日，(b) 2020 年 5 月 13 日，(c) 2021 年 5 月 22 日，(d) 2022 年 5 月 17 日，(a2)-(d2) 与 (a3)-(d3) 分别为对应数据典型耀光反射区经耀光校正后的效果图，对比图 1 中 (a2)-(d2)、(a3)-(d3)，展现了耀光校正算法对海面不同耀光反射图像特征的消除效果 (R:650 nm, G: 560 nm, B: 460 nm)

Fig. 4 CZI R_{rc} RGB images after sun glint correction (R:650 nm, G: 560 nm, B: 460 nm) on (a) May 5, 2019 , (b) May 13, 2020 , (c) May 22, 2021, and (d) May 17, 2022, and the stretching pattern before and after correction is consistent , (a2)-(d2) and (a3)-(d3) are the images of typical sun glint reflection area after sun glint correction, which show the elimination effect of sun glint correction algorithm on different sun glint reflection image features compared with (a2) - (d2) and (a3)- (d3) in Fig. 1

3.3 评估与分析

上述耀光校正效果需要进一步评估与分析,但囿于缺乏原位实测数据,难以实现数据的绝对精度验证,因此本研究通过 CZI 数据耀光校正前后 R_{rc} 反射率数值变化的对比分析,评估校正效果。通过剖面线采样获取耀光校正前后的 R_{rc} 反射率数据(图 1 和图 4 中白色虚线表征采样剖面,箭头指示采样方向),这些剖面线覆盖船尾开尔文波、涡旋和水团、低粗糙度水体锋面和低反射区等多种不同的耀光反射差异(图 1(a2)-(d2)),对比分析结果如图 5 所示。可以看出:1) 耀光校正后剖面线各波段 R_{rc} 数值均小于原值;2) 由观测几何主导的耀光反射差异被消除,如耀光校正前,图 1(b2)/(c2)中沿采样方向耀光反射逐渐减弱/增强(在图 5(b)/(c)中表现为 R_{rc} 反射率逐渐减小/增大,剖面线呈下降/上升趋势);而图 5(b)/(c)中耀光校正后的剖面线呈水平趋势,且 R_{rc} 反射率的波动性显著降低;3) 由海面粗糙度主导的耀光反射差异被消除,如图 5 剖面线局部放大图中,船尾开尔文波、涡旋、低粗糙度水体和低反射区的图像特征及其对应剖面线波动所表征的耀光反射差异均得到有效消除。

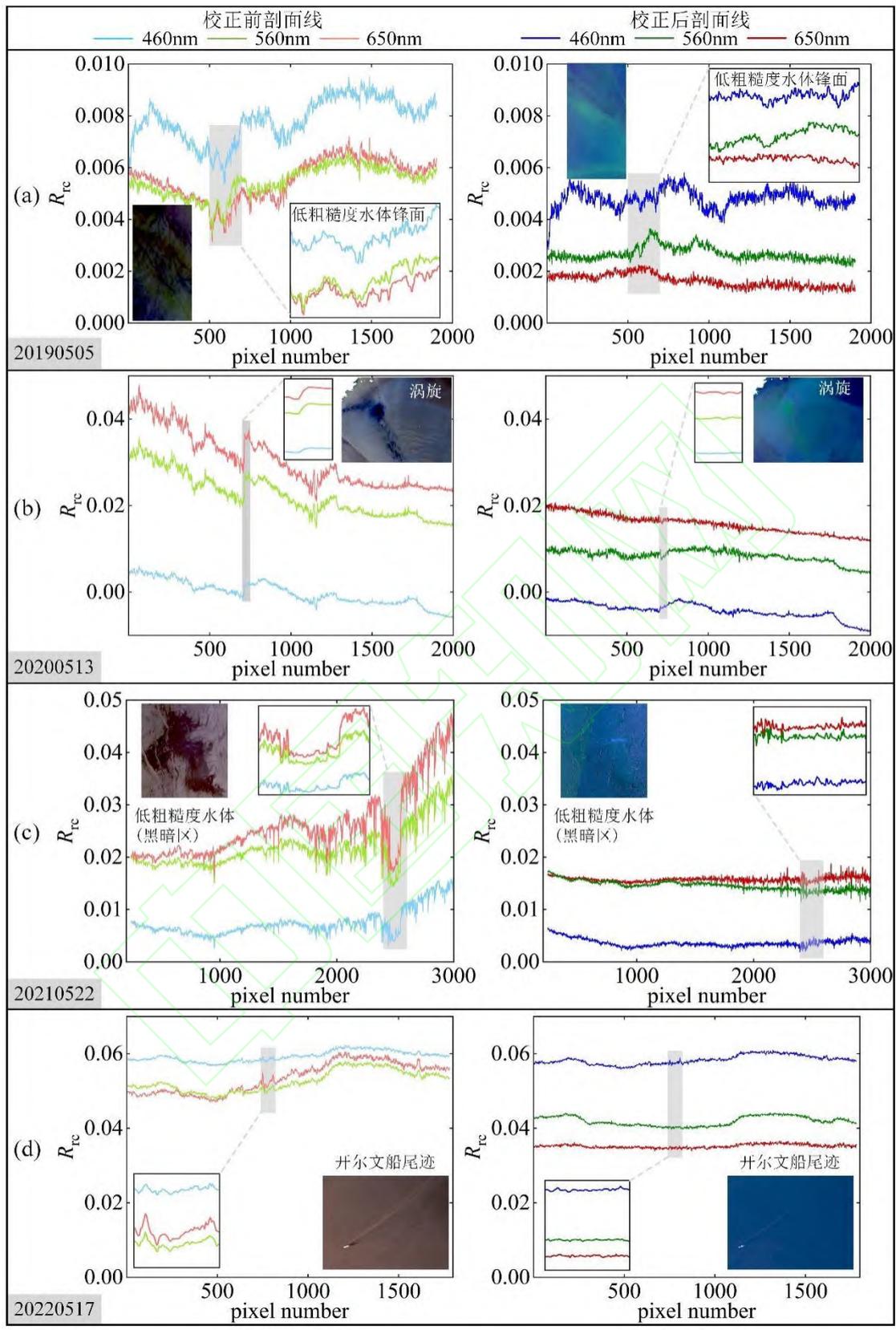


图 5 CZI 数据耀光校正前后剖面线上的 R_{rc} 对比(采样于图 1 和图 4 中的剖面线)。(a) 2019 年 5 月 5 日, (b) 2020 年 5 月 13 日, (c) 2021 年 5 月 22 日, (d) 2022 年 5 月 17 日

Fig. 5 Comparison of R_{rc} values before and after sunlight correction sampled on the profile lines in Fig.1 and 4 on (a) May 5, 2019 , (b) May 13, 2020 , (c) May 22, 2021, and (d) May 17, 2022

进一步开展校正前后 R_{rc} 反射率分布直方图对比分析, 结果如图 6 所示。可以得出: 1) 耀光校正后 CZI 真彩色合成图像水色特征符合经验认知; 2) 耀光校正前 CZI 可见光波段 R_{rc} 直方图分布异常, 其数值变化范围及峰值均存在较大的波动; 耀光校正后, R_{rc} 直方图整体向低值移动, 且呈高斯正态分布; 3) 图 6(d) 校正后的直方图中, 波谷由 CZI 左右 CCD 阵列拼接成像方式造成, 并非耀光校正过程导致, 波谷两侧 R_{rc} 仍为高斯正态分布; 4) 校正后 R_{rc} 反射率的波动性均下降。

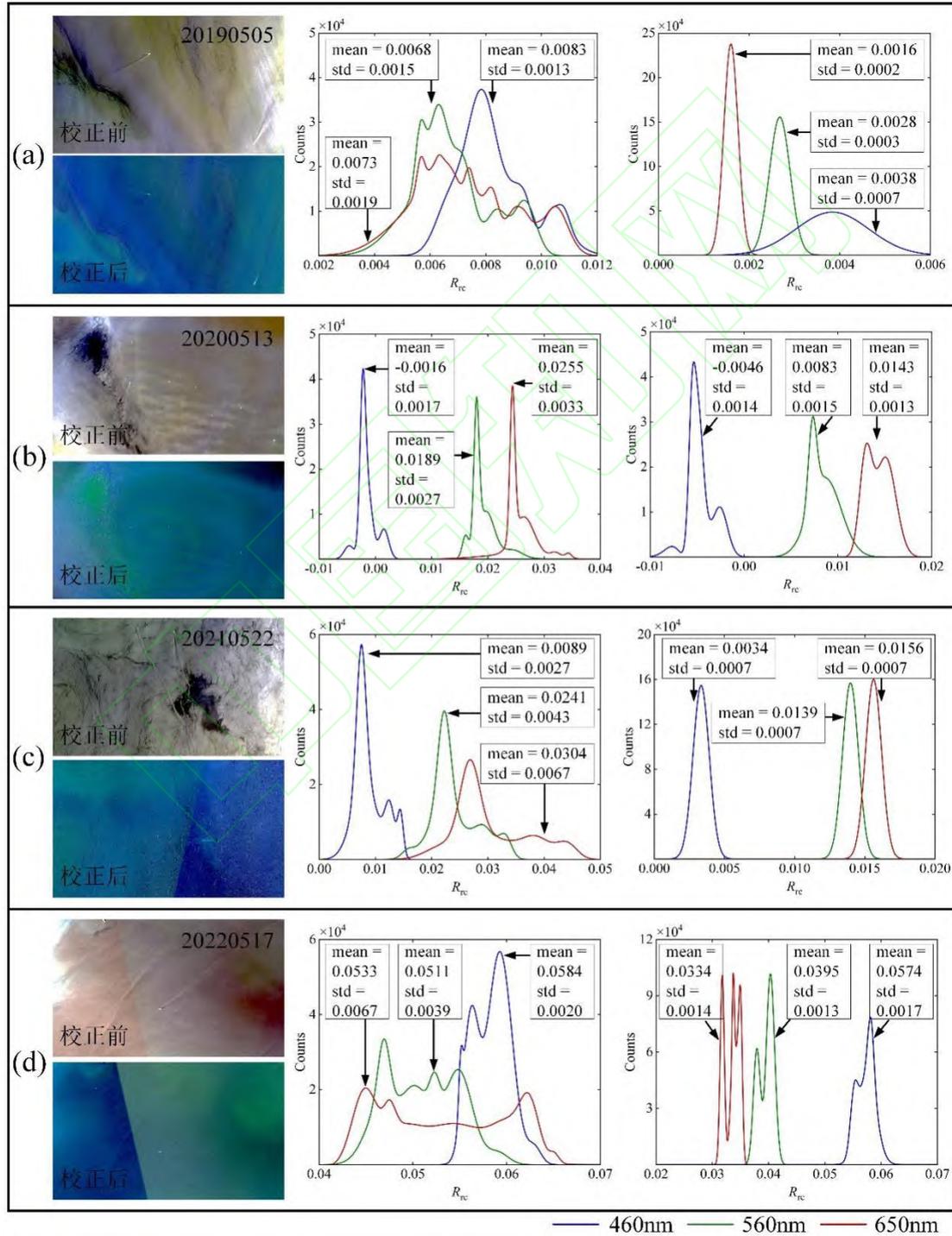
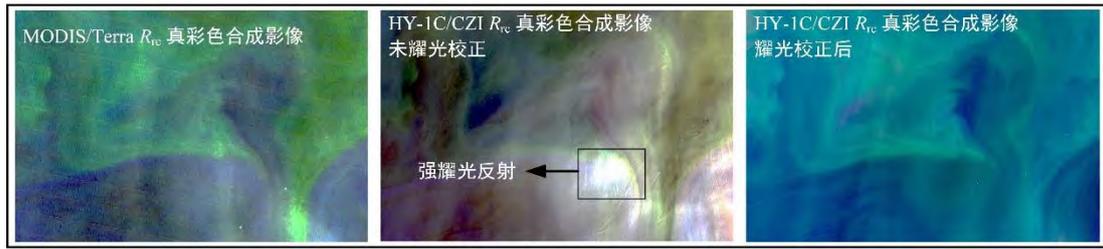


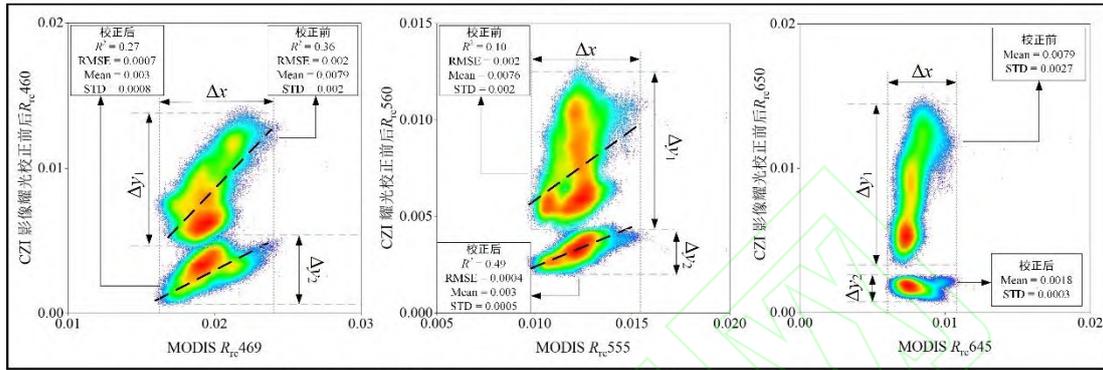
图 6. CZI 数据耀光校正前后典型区域 R_{rc} 的频率分布直方图对比。(a) 2019 年 5 月 5 日, (b)2020 年 5 月 13 日, (c) 2021 年 5 月 22 日, (d) 2022 年 5 月 17 日。第一至三列分别为耀光校正前后真彩色合成图像、校正前可见光波段 R_{rc} 直方图及统计参数、校正后可见光波段 R_{rc} 直方图及统计参数

Fig.6 Comparison of frequency histograms of R_{rc} in typical regions before and after sunglint correction on (a) May 5, 2019 , (b) May 13, 2020 , (c) May 22, 2021, and (d) May 17, 2022, and the first to third columns are the images before and after sunglint correction, the frequency histogram, and statistical parameter of R_{rc} in visible band before and after correction

基于准同步数据对比验证, 进一步分析耀光校正的效果, 揭示 CZI 数据在耀光校正后反演水色信息的能力。以图 1 (a) CZI 数据为例, 选取同一地区、同一日期的 MODIS 准同步数据 (成像时差为 12 分钟, 认为在此时间间隔内该海域的海水前后观测数据不会突变)。CZI 与 MODIS 数据在中心波长、带宽、信噪比等方面的设置差异在此不做讨论, 仅对 CZI 数据耀光校正前后可见光波段 R_{rc} 与 MODIS 可见光波段 R_{rc} 之间的差异作对比验证, 结果如图 7 所示。以 MODIS 数据为参考, 对比 CZI 耀光校正前后变化可知: 1) 耀光校正前, CZI 数据包含复杂的耀光反射图像特征; 校正后 CZI 数据海洋中尺度涡等水色空间信号得以凸显 (图 7(a)), 并与 MODIS 水色图像特征相对一致。2) 一类水体中, 水色特征主要受叶绿素浓度的影响, 分别对比耀光校正前后 CZI 绿光波段 R_{rc} 与 MODIS 绿光波段 R_{rc} , 两者的相关系数(R^2)由 0.1 升至 0.49, RMSE 由 0.002 降为 0.0004, 不确定性降低 80%, 显著提升了 CZI 绿光波段反射率的准确性 (图 7(b)); 由于叶绿素在蓝光波段的反射并不强, 耀光校正后 CZI 与 MODIS 蓝光波段 R_{rc} 的相关系数 R^2 略有降低, 但 RMSE 却得到一个数量级的降低 (由 0.002 减小为 0.0007), 不确定性降低约 65%。3) 一类水体在长波 (红光、近红外、短波红外等) 波段的信号近似可以忽略, MODIS 红光波段反射率在弱耀光反射背景下不会有明显的分异^[3, 8], 而 CZI 数据中红光波段易受耀光干扰, R_{rc} 反射率具有显著分异, 校正后 CZI 与 MODIS 水色图像特征保持了较好的一致性, 且红光波段处 R_{rc} 的均值和标准差分别下降 78% 和 89%, 显著降低了耀光反射差异产生的影响。



(a) CZI 与 MODIS 准同步影像
(a) CZI and MODIS quasi-synchronous image



(b) CZI 与 MODIS 准同步影像在可见光波段的 R_{rc} 对比密度散点图
(b) Density scatter plots of CZI and MODIS quasi-synchronous images in visible band

图 7 CZI 与 MODIS 准同步数据的对比验证

Fig.7 Comparison of CZI and MODIS synchronous images

上述研究表明谱间关系法能有效应用于 CZI 数据的耀光反射校正，但并不意味所有的 CZI 数据均能实现准确的耀光校正。如在校正过程中可能产生部分负值（图 5(b)），原因在于本研究中近红外波段的离水反射率不能完全忽略^[29]，导致过度校正，因此该方法只适用于清洁海水，且更适用于具有短波红外波段的光学载荷。除此之外，HY-1C/D 卫星 CZI 载荷获取的海洋观测数据在定标和大气校正方面的精度仍待进一步提高，未来仍需加强国产海洋光学卫星数据的定标和大气校正研究，不断提高产品的精度和稳定性。

4 结语

耀光反射是海洋光学遥感研究关注的重要问题。高空间分辨率下，传感器探测到的海面耀光反射信号更加复杂，本文收集覆盖中国近海及其周边海域的 HY-1C/D 星 CZI 代表性数据进行耀光反射校正研究。厘清了耀光反射的光学过程与 CZI 数据中不同因素主导的耀光反射图像特征，实现了不同尺度下的耀光反射差异校正，为首个国产水色业务卫星的应用提供了方法参考。基于线性回归的耀光校正方法不依赖大气先验知识，便于快速应用，但是该方法对于统计窗口（用于计算耀光校正参数）的选取较为敏感(不同传感器的数据或同一传感器不同区域的数据可能校正参数也不同)，限制了该方法的自动化应用。随着定标与大气校正的精度提升，本研究将进一步向 CZI 数据耀光反射校正自动化应用的方向深入，从而为中国近海水色动态监测与评估提供有效的方法参考。

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, Sun S, Zhang M, et al. Refinement of the Critical Angle Calculation for the Contrast Reversal of Oil Slicks Under Sun glint[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(1): 148-161.
- [3] Hu C, Li X, 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.
- [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 Sun glint Images of the Sea Surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C9) : C09019.
- [8] Zhang H, Wang M. 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*, 1954, 44(11): 838.
- [10] Zhang H, Yang K, Lou X, 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 Sun glint 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, Lu Y, Jiao J, et al. Using Sea Wave Simulations to Interpret the Sun glint Reflection Variation with Different Spatial Resolutions[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-4.
- [15] Hochberg E J, Andréfouët 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. 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 E. A Method for Mapping Live Coral Cover Using Remote Sensing[J]. 2005.
- [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.
- [20] Harmel T, Chami M, Tormos T, et al. Sun glint 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, Tian L, 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] 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. (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.)
- [23] Feng L, Hu C. Comparison of Valid Ocean Observations Between MODIS Terra and Aqua over the Global Oceans[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 54(3): 1575-1585.
- [24] Vanhellefont Q, Ruddick K. Acolite for Sentinel-2: Aquatic Applications of MSI Imagery[C]. Proceedings of the 2016 ESA Living Planet Symposium, Prague, Czech Republic. 2016: 9-13.
- [25] ZHAO Bi, DING Jing, LIU Jianqiang, et al. Estimation of Oceanic Whitecaps Using High Spatial-Resolution Optical Remote Sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, DOI: 10.11834/jrs.20222106. (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. *遥感学报*, DOI: 10.11834/jrs.20222106.)
- [26] Gagliardini D A, Colón P C. Ocean Feature Detection Using Microwave Backscatter and Sun Glint Observations[J]. *Gayana (Conceptión)*, 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] Remote Sensing Image Analysis: Including the Spatial Domain[M]. *Springer Science & Business Media*, 2007.
- [29] 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.

网络首发:

标题: HY-1 C/D卫星CZI数据海面太阳耀光反射校正

作者: 周巨源, 汪明秀, 焦俊男, 刘建强, 丁静, 陆应诚

DOI: 10.13203/j.whugis20220628

收稿日期: 2023-06-04

引用格式:

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)*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220628 (ZHOU Juyuan, WANG Mingxiu, JIAO Junnan, et al. Correction of seawater surface sunglint reflection from HY-1C/D CZI images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220628)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

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

周屈, 刘建强, 王剑茹, 邓实权, 田礼乔

武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(5): 676-681

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200101>