

HY-1C/D 卫星 CZI 数据的岛礁浅海水深遥感 无控反演能力评估

张华国^{1,2}, 马蕴涵¹, 厉冬玲¹, 曹雯婷¹, 王隽¹

1. 自然资源部第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310000;

2. 上海交通大学 海洋学院, 上海 200240

摘要: 岛礁浅海水深是海洋重要的基础资料。中国南海岛礁远离大陆, 水下现场调查效率低、难度大, 难以评估水下地形的长期变化, 迫切需要大面积、高频次成像的卫星遥感数据。海洋一号 C/D (HY-1C/D) 卫星双星组网大大提高了覆盖频次, 配置的海岸带成像仪 CZI (Coastal Zone Imager) 可为岛礁水下探测提供快速的业务化遥感数据服务。为充分发掘两颗卫星的岛礁水深反演能力, 本文以中国南海永乐环礁为研究区域, 以 HY-1C/D CZI 多光谱遥感影像为数据源, 结合半分析模型和对数比值模型开展了不依赖实测数据的水深反演研究, 并与 GeoEye-1 高分辨率卫星多光谱遥感数据反演结果进行对比。结果表明, HY-1C/D CZI 多光谱数据在甘泉岛的水深反演结果与实测数据相比, 在 0—20 m 水深范围内的平均绝对误差分别为 1.60 m 和 1.85 m, 平均相对误差分别为 22.48% 和 26.23%; HY-1C/D CZI 多光谱数据与基于 GeoEye-1 数据在甘泉岛的水深反演结果相比, 平均绝对偏差分别为 1.65 m 和 1.81 m, 平均相对偏差分别为 22.33% 和 23.83%。HY-1C/D CZI 与 GeoEye-1 多光谱数据在永乐环礁各剖面变化趋势的交叉对比结果基本一致。具有高频次、宽覆盖特征的 HY-1C/D CZI 数据在全球岛礁浅海水深反演方面具有广泛的应用潜力。

关键词: HY-1C/D, 海岸带成像仪 CZI, 岛礁浅海水深, 永乐环礁, L-S 模型

中图分类号: P2

引用格式: 张华国, 马蕴涵, 厉冬玲, 曹雯婷, 王隽. 2023. HY-1C/D 卫星 CZI 数据的岛礁浅海水深遥感无控反演能力评估. 遥感学报, 27(1): 116–127

Zhang H G, Ma Y H, Li D L, Cao W T and Wang J. 2023. Retrieval and assessment of island shallow water depth without ground data from the HY-1C/D CZI multispectral imagery. National Remote Sensing Bulletin, 27(1): 116–127 [DOI: 10.11834/jrs.20235006]

1 引言

水深是海底地形测绘和海洋环境调查的基本要素之一 (Zhang 等, 2019)。浅海水深探测在海洋军事、船舶航行安全、岛屿开发利用和水生环境科学研究等方面扮演着越来越重要的角色 (张振兴和郝燕玲, 2012)。船载单/多波束和机载雷达测深系统目前取得了显著成效, 均有较高的测量精度 (Irish 和 Lillycrop, 1999; Westfeld 等, 2017)。然而, 这些传统方法成本高、耗时耗力, 在远离大陆的南海岛礁, 由于受到潮汐和暗礁的影响, 测量船舶在浅水区通常受到限制 (Su 等, 2014)。

与实地测量相比, 卫星遥感则是一种空间覆盖广、时效性强、成本低的方法 (Eugenio 等, 2015)。近几十年来, 众多学者依靠丰富的多光谱卫星遥感数据, 发展了很多水深反演算法, 如理论模型 (Lyzenga, 1978; Lee 等, 2007; Dekker 等, 2011)、半分析模型 (Lee 等, 1998, 1999, 2001) 和统计模型 (李丽, 2016), 极大地弥补了传统方法的不足 (Chen 等, 2019)。从米级的高分辨率数据, 如 WorldView-2/3/4、GeoEye-1、QuickBird、GF-1/2、Planet; 到 10 m 级别的中分辨率数据, 如 Sentinel-2、Landsat-5/7/8 都有应用 (黄荣永 等, 2019; 卢刚 等, 2017; 王纪坤

收稿日期: 2021-09-06; 预印本: 2022-05-27

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2021YFE0117600); 国家自然科学基金 (编号: 41876208); 自然资源部第二海洋研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (编号: JG2105)

第一作者简介: 张华国, 研究方向为近海与海岸带遥感。E-mail: zhanghg@sio.org.cn

等, 2018; 刘嘉懿等, 2020)。这些研究充分利用各类模型发掘了不同传感器在水下地形反演的潜力: 探讨了各波段对水深反演的敏感度 (Liu 等, 2021)、研究了不同底质类型下的水深探测范围 (Liu 等, 2018)、建立了不同区域的神经网络水深反演模型 (王纪坤等, 2018; 张振兴和郝燕玲, 2012; 樊彦国和刘金霞, 2015)。但是目前针对 30 m 以下空间分辨率的半分析模型水深反演研究还鲜有涉及, 尤其是中国最新组网观测的 HY-1C/D 卫星, 填补了中国水色卫星无下午观测数据的空白, 观测能力有了极大提升, 但还未有开展其在浅海水深遥感反演及能力评估的报道。从当前的发展状况来看, 对中国南海岛礁及周边浅海地区的水下地形进行长时序、高频动态观测是相关海洋决策部门和军事发展的一项重大需求 (周旻曦等, 2015; 盛琳等, 2015; 王燕红等, 2018)。

考虑到 HY-1C/D CZI 数据宽覆盖、高重访的特点 (王利民等, 2019), 基于 CZI 数据能够以更

高频率获取岛礁浅海水下信息, 更适合业务化运行。因此, 为探讨 HY-1C/D CZI 遥感影像在南海岛礁浅海水深反演工作中的适用性, 本文以西沙群岛的永乐环礁为研究区域, 针对 HY-1C/D 卫星的 CZI 多光谱遥感数据, 利用 L-S 模型 (Xia 等, 2020) 开展岛礁浅海水深遥感反演与评估研究。

2 数据与方法

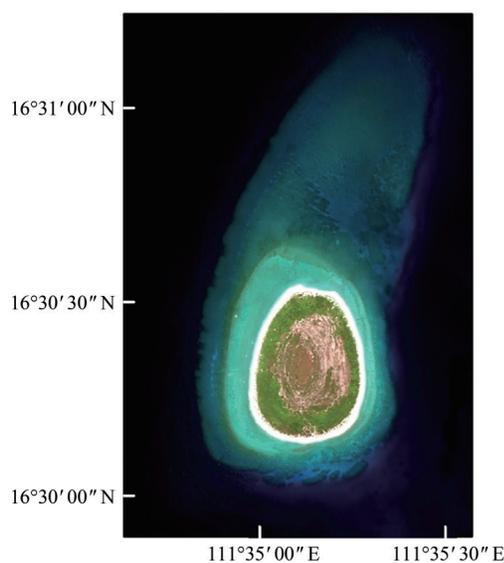
2.1 研究区概况

本文研究区域为中国南海永乐环礁及周边浅海海域, 位于中国西沙群岛西部, 行政上隶属于海南省三沙市, 是西沙群岛面积最大的珊瑚环礁, 地理坐标介于 $16^{\circ}25' - 16^{\circ}37'N$, $111^{\circ}33' - 111^{\circ}48'E$, 包括多个礁盘并发育有 13 个岛屿, 浅海海底多被沙、珊瑚礁、海草等覆盖, 受人类活动影响较小, 适合开展水深反演研究。研究区地理区位如图 1 (a)。



审图号: GS(2019)1822号

(a) 永乐环礁地理位置图
(a) Location of Yongle Islands



(b) 甘泉岛 GeoEye-1 原始遥感影像真彩色合成图
(b) GeoEye-1 true color imagery of Ganquan Island

图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of the study area

2.2 数据源

海洋一号 C、D 卫星分别于 2018 年 9 月 7 日和 2020 年 6 月 11 日在太原卫星发射中心成功发射, 双星均配置了海洋水色水温扫描仪 COCTS (China Ocean Color & Temperature Scanner)、海岸带成像

仪 CZI (Coastal Zone Imager)、紫外成像仪 UVI (Ultraviolet imager)、星上定标光谱仪 SCS (Satellite Calibration Spectrometer) 和船舶自动识别系统 AIS (Automatic Identification System) 等 5 大载荷。其中海岸带成像仪 CZI 为可见光传感器, 数据分为

0级 (L0)、1级 (L1)、2级 (L2)、3级 (L3) 和4级 (L4), 一轨 L1B 级数据幅宽约 950 km, 成像时间约 1 min, 空间分辨率 50 m, 量化等级 12 bit。但与中、高分辨率卫星遥感数据相比, 空间分辨率较低、视场角较大, 对不同区域的信噪比造成较大影响。L1B 级多光谱数据经过了几何粗校正与辐

射定标。图 2 所示为 L1B 级 HY-1C/D 卫星的 CZI 传感器数据, 图 2 (a) 和 2 (c) 分别为两颗卫星的整景遥感影像真彩色合成图, 图 2 (b) 和 2 (d) 分别对应研究区永乐环礁 HY-1C/D CZI 多光谱遥感影像图。

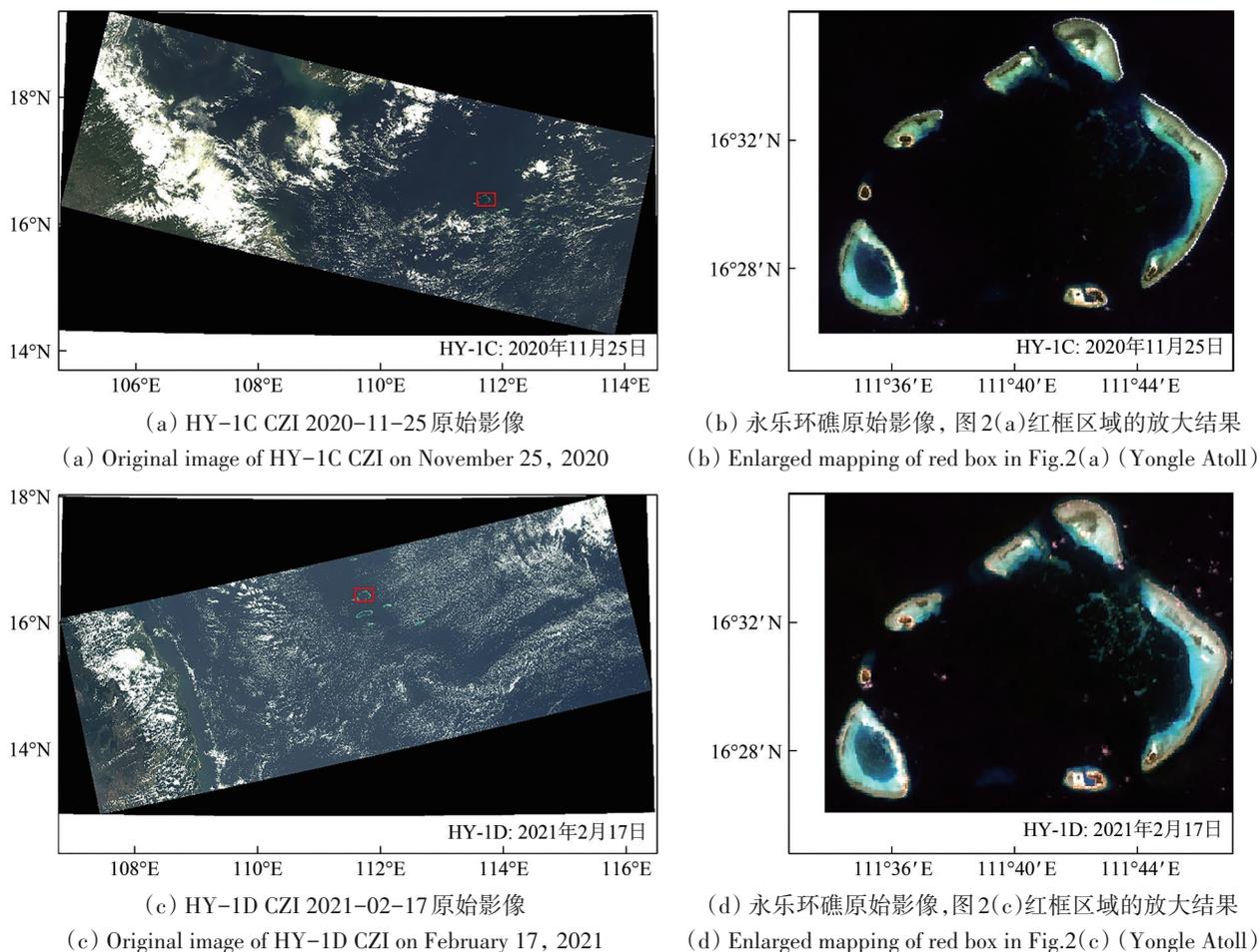


图 2 原始真彩色合成遥感影像

Fig. 2 Original true color remote sensing imagery

GeoEye-1 卫星于 2008 年 9 月 6 日从美国加州范登堡空军基地发射, 提供空间分辨率为 0.5 m 的全色影像和 2 m 的多光谱影像, 量化等级 11 bit, 幅宽 15 km, 重访周期 2—3 d。GeoEye-1 卫星的多光谱影像的质量和信噪比代表当前多光谱传感器的国际先进水平。本研究用 GeoEye-1 的 4 个波段多光谱影像 (蓝、绿、红、近红外) 的成像时间为 2015 年 7 月 2 日, 太阳天顶角 22.7° , 卫星观测角 24.9° , 覆盖范围为永乐环礁的甘泉岛地区, 图 1 (b) 所示为原始 GeoEye-1 遥感影像的真彩色合成图, 用于与 HY-1C/D CZI 数据的反演结果进行对比, 评估 HY-1C/D CZI 数据的水深探测

能力。

本文使用俄勒冈州立大学 OSU (Oregon State University) (张建良和杨晓坤, 2016) 开发的潮汐模型驱动程序分别计算了 3 景影像不同的成像时刻瞬时海平面相对于平均海平面的高度 (表 1), 并对水深反演结果进行了相应修正。OSU 潮汐预测模型在中国沿海的预报精度为 18—20 cm 左右 (范长新, 2019)。

南海甘泉岛实测水深点来自 2012 年的机载 LiDAR 数据, 具备亚米级空间分辨率, 本文选取甘泉岛范围内抽稀后 0—20 m 水下范围的点云数据进行水深反演结果的验证。

表 1 所用数据清单及对应时刻潮位高度

| 卫星/传感器 | 成像时刻(年-月-日 时:分:秒) | 潮高/m |
|-----------|-----------------------|-------|
| HY-1C/CZI | 2020-11-25 T 11:12:08 | -0.23 |
| HY-1D/CZI | 2021-02-17 T 13:49:23 | 0.15 |
| GeoEye-1 | 2015-07-02 T 11:05:05 | -0.63 |

2.3 反演方法

本文基于 Xia 等 (2020) 提出的无需实测水深数据支持的 L-S 模型, 应用国产 HY-1C/D 卫星的 CZI 多光谱遥感数据, 在西沙群岛的永乐环礁开展浅海水深无控反演实验, 图 3 所示为基于 L-S 模型的 HY-1C/D CZI 数据水深反演流程。

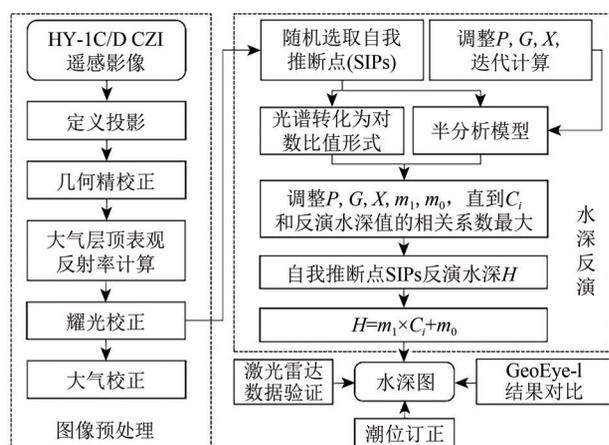


图 3 基于 L-S 模型的 HY-1C/D CZI 数据水深反演流程图
Fig. 3 Flowchart of bathymetry inversion based on L-S model using HY-1C/D CZI imagery

首先对收集到的 HY-1C/D CZI 多光谱数据的 L1B 级天顶辐亮度数据进行地理投影定义、几何精校正、大气层顶表观反射率计算、耀光校正、大气校正等一系列预处理。然后应用 L-S 模型反演得到岛礁浅海水深信息, 最后将甘泉岛区域经过潮位校正的结果与实测水深点进行对比, 同时与基于 GeoEye-1 卫星遥感数据的水深反演结果进行交叉对比, 进而评估 HY-1C/D CZI 多光谱遥感数据在岛礁浅海水深反演方面的应用潜力。

2.3.1 图像预处理

(1) 地理投影定义。对获取到的 HY-1C/D CZI 传感器的 L1B 级 HDF5 格式数据统一转换为 TIF, 并定义为 WGS_1984_UTM_Zone_49N 坐标系, 以确保与 GeoEye-1 卫星数据具有一致的地理空间参考。

(2) 几何精校正。采用 Image to Image 的几何校正方法, 选择 GeoEye-1 卫星遥感影像为基准影像, CZI 数据为待校正影像, 均匀选取一定数量的同名点之后, 利用 ENVI 的自动寻找控制点功能进行仿射变换, 实现影像的自动几何校正。

(3) 表观反射率计算。CZI 传感器 L1B 数据为大气层顶辐射亮度, 根据式 (1) 转换为大气层顶表观反射率 (Markham 和 Barker, 1987; 梁超等, 2020)。

$$\rho = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times D^2}{F_0 \times \cos \theta} \quad (1)$$

式中, ρ 为无量纲的大气层顶表观反射率, L_{λ} 为各波段传感器处入瞳辐射亮度, 单位 $\text{mW}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$, D 为日地距离, F_0 为大气层顶的平均太阳辐照度, 单位 $\text{mW}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$, θ 为太阳天顶角, 相关参数可于 HDF 数据集属性文件中查看得到。

(4) 耀光校正。本文假定多光谱图像深水区近红外波段海面的表面反射率极低且近红外波段海面的辐射值仅有环境常量以及太阳耀光的贡献, 然后利用太阳耀光在近红外波段与可见光波段存在良好的线性特性的性质来消除太阳耀光的影响 (Xia 等, 2020; Ma 等, 2021), 相应的数学关系如下:

$$\rho_{\text{TOC}}^{\text{deg}}(\lambda) = \rho_{\text{TOC}}(\lambda) - b_{\lambda}(\rho_{\text{NIR}} - \text{MIN}_{\rho_{\text{NIR}}}) \quad (2)$$

$$R_{\text{rs}}(\lambda) = \frac{\rho_{\text{TOC}}^{\text{deg}}(\lambda)}{\pi} \text{sr}^{-1} \quad (3)$$

式中, $\rho_{\text{TOC}}^{\text{deg}}(\lambda)$ 是去除耀光后的表面反射率; R_{rs} 是耀光校正后的遥感反射率; $\rho_{\text{TOC}}(\lambda)$ 为原始表面反射率; ρ_{NIR} 为近红外波段原始表面反射率; $\text{MIN}_{\rho_{\text{NIR}}}$ 为近红外波段原始表面反射率最小值; b_{λ} 为拟合系数。消除耀光之后剩余的噪声为环境常量, 即大气贡献。

(5) 大气校正。本研究以 MODIS 数据深海区域遥感反射率产品 R_{rs} 作为基准, 假定研究区域的大气状况均匀, 并将研究区深水区域的遥感反射率光谱 $R_{\text{rs}1}$ 校正到与 MODIS 一致, 再根据深水区的校正量完成整个研究区影像的大气校正 (Xia 等, 2020; Ma 等, 2021)。图 4 (a)、4 (b) 和 4 (c) 分别为 GeoEye-1、HY-1C/CZI 和 HY-1D/CZI 影像预处理后的遥感反射率结果。

为保证水深反演结果的可靠性, 在图 4 (a) 中选取了一条断面 AB, 将 HY-1C/D CZI 和 GeoEye-1 卫星影像大气校正之后的光谱进行了对

比；图5 (a) 为断面 AB 的光谱曲线在 3 景影像上的变化情况，图 5 (b) 为 3 景遥感影像的 A 点处大气校正前后不同波长的反射率变化情况。图 5 (a) 表明，由于传感器的信噪比差异，HY-1C/D 卫星 CZI 传感器对水深及底质变化的敏感程度稍差，导致深水区与浅水区的光谱对比度也稍微弱一些。整体来看，HY-1C/D 卫星 CZI 传感器在可见光波

段与 GeoEye-1 的光谱变化趋势基本一致，具备水深反演的潜力。图 5b 表明大气校正对不同卫星传感器均有效，深水区在校正之前，HY-1C/D 与 GeoEye-1 的光谱存在较大差异，校正之后基本趋于一致，另一方面说明了暗像元法大气校正的稳健性和通用性，适用于 HY-1C/D CZI 多光谱遥感数据的大气校正。

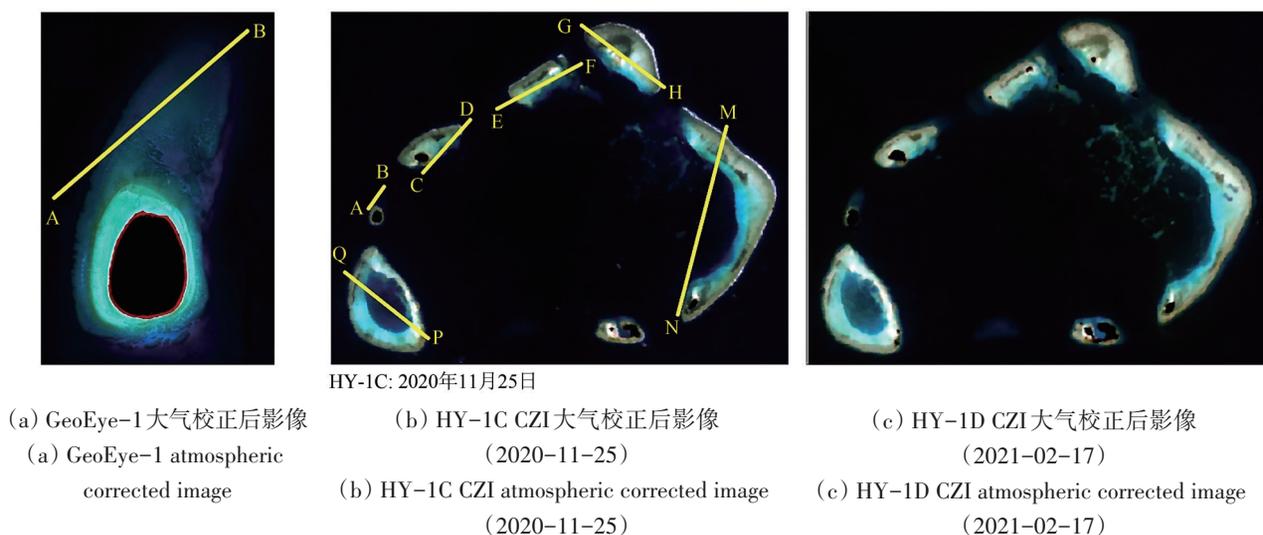


图 4 遥感影像预处理结果(黄色剖面用于 3.3 节反演结果的交叉对比)

Fig. 4 Preprocessing results of the remote sensing imagery (Yellow profiles are used for cross-comparison of inversion results in Section 3.3)

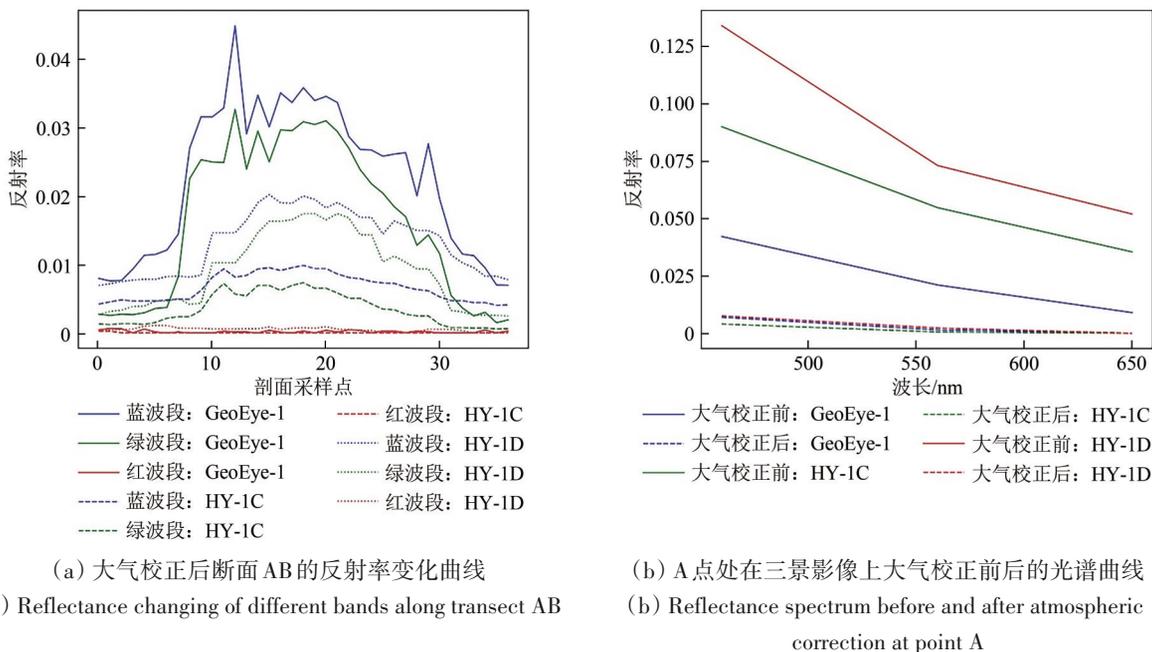


图 5 大气校正前后光谱对比结果

Fig. 5 Spectral results before and after atmospheric correction

2.3.2 L-S模型原理

L-S模型将对数比值模型(Log-ratio Model)和半分析模型(Semi-analytical Model)相结合,实现了无需实测水深数据的大洋岛礁浅海水深多光谱遥感反演,在GeoEye-1、WorldView-2、Sentinel-2、Gaofen-1和Landsat 8等卫星多光谱遥感数据中取得了较好应用结果(Xia等, 2020; Ma等, 2021)。接下来简要介绍L-S模型。

(1) 半分析模型。半分析模型中的水深 H 、底质 B 与水体光学参数等之间的数学关系(Lee等, 1998和1999)可唯一确定海面遥感反射率光谱曲线 R_s , 算法核心如式(4):

$$R_s(\lambda) = f(P, G, X, B, H, \lambda) \quad (4)$$

式中, f 表示非线性方程, P 、 G 、 X 、 B 、 H 的物理意义如表2所示。

表2 水体生物光学模型参数及物理意义(张靛等, 2011)

Table 2 Parameters and physical meanings of water bio-optical model

| 模型参数 | 公式 | 物理意义 |
|------|---|---------------------------|
| P | $P = a_{\varphi}(440)$ | 浮游植物在440 nm处的吸收系数 |
| G | $G = a_g(440)$ | 黄色物质和碎屑在440 nm处吸收系数 |
| X | $X = b_{sp}'(400) + b_{bu}(400) + b_{sp}(400) + \varepsilon(\lambda)$ | 综合传感器观测角和海况对悬浮颗粒后向散射的系数影响 |
| B | $B = \rho(550)$ | 底质550 nm处反射率 |
| H | | 水深 |

相对于水深、底质和光谱自身特性,不同像元间的水体特性变化可被视作是低频信号,因此半分析模型假设在同一幅遥感影像中,水体性质是恒定不变的,即 P 、 G 、 X 为常数。当给定 P 、 G 、 X 的初始值及迭代范围后,基于BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)非线性最优化算法,当式(4)的模拟光谱与传感器测量光谱最接近时,可得到不同 P 、 G 、 X 下的底质反射率 B 和水深 H 的反演结果。

(2) 对数比值模型。由于蓝绿光在水体中的穿透能力较强,因此对数比值模型常采用蓝绿波段数据,模型如式(5)(Stumpf等, 2003):

$$H = m_1 \frac{\ln(nL(\lambda_i))}{\ln(nL(\lambda_j))} - m_0 \quad (5)$$

式中, m_1 、 m_0 和 n 均为回归系数; $L(\lambda_i)$ 表示第

i 个波段对应的水体辐射能量。

(3) L-S模型。由于多光谱影像波段数量的限制,无法直接得到半分析模型式(4)的最优解,因此将半分析模型和对数比值模型结合,用式(5)对式(4)进行约束,对于选择的每个像元的水深都可表示为式(6):

$$H_{\text{半分析模型反演水深}} = m_1 \frac{\ln(nL(\lambda_i))}{\ln(nL(\lambda_j))} - m_0 \quad (6)$$

在不断迭代 P 、 G 、 X 的过程中,当半分析模型反演水深和 $\frac{\ln(nL(\lambda_i))}{\ln(nL(\lambda_j))}$ 之间的相关系数最大时,

B 、 H 可认为是最优结果, P 、 G 、 X 也可以正确代表当时的水体特性,最后利用拟合的对数比值模型计算得到整个研究区域的水深信息。

3 结果与分析

3.1 水深反演结果

利用L-S模型分别对HY-1C/D卫星CZI数据预处理之后的遥感图像进行水深反演,图6(a)和6(b)显示了最终永乐环礁0—20 m的计算结果,其中白色掩膜代表陆地、云或者浪花覆盖的异常区域,黑色掩膜代表超出20 m探测范围的海域。从图6(a)和6(b)在甘泉岛的放大结果图6(d)和6(e)来看,礁盘向外,水深逐渐增加,变化趋势一致;整体来看,图6(a)和6(b)中永乐环礁各岛礁的礁盘及水下地形特征都较为明显,两颗卫星的水深反演结果从礁盘向外都呈现“浅水—深水”的变化趋势,表明HY-1C和HY-1D两颗卫星的CZI传感器具备同样的浅海水深探测能力。

为了进一步证明HY-1C/D CZI多光谱遥感数据水深探测的可靠性,本文基于GeoEye-1数据在甘泉岛进行了同样的实验流程,结果如图6(c)所示。图6(d)、6(e)与图6(c)的反演结果相比,由于HY-1C/D卫星的空间分辨率远低于GeoEye-1卫星,信噪比也略差,所以图6(d)、6(e)基于HY-1C/D卫星CZI数据的反演结果未能像GeoEye-1数据一样精细地表现甘泉岛的水下地形特征。但是图6(c)、6(d)、6(e)的水深变化趋势基本一致,礁盘内部较浅,向外水深增加。表明HY-1C/D CZI多光谱遥感数据基本具备了岛礁浅海水深反演能力,反演结果稳定。

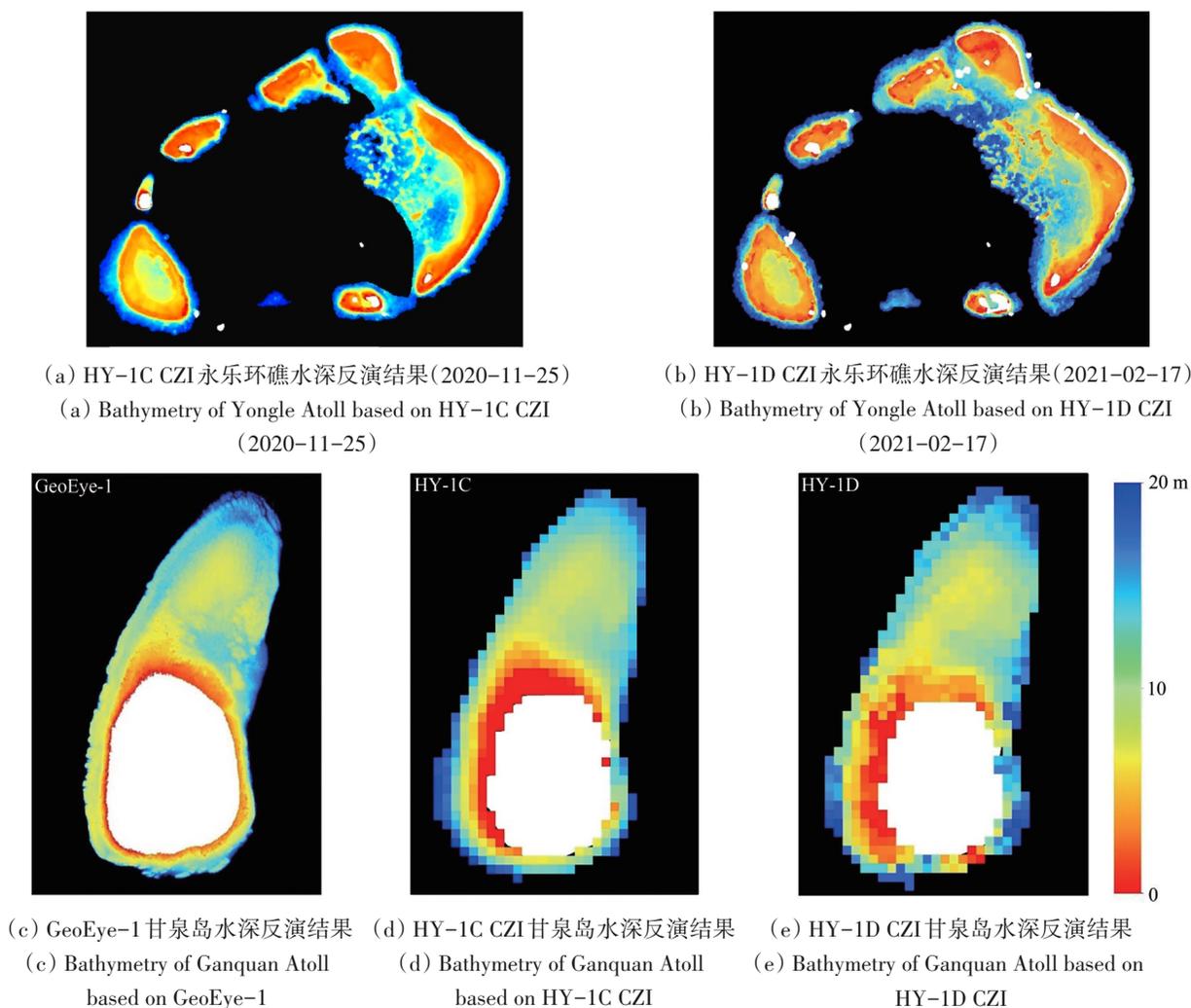


图6 不同卫星传感器的水深反演结果

Fig. 6 Inversion results of bathymetry based on different satellite sensors

3.2 水深反演结果定量验证

在有实测数据的甘泉岛区域,对HY-1C/D CZI和GeoEye-1数据的水深反演结果进行验证。将点云数据抽稀,重采样到50 m、2 m空间分辨率的水深点分别用于HY-1C/D CZI数据和GeoEye-1反演结果的验证。

图7(a)、7(b)和7(c)分别为GeoEye-1和HY-1C/D CZI反演结果的验证散点图,MAE(Mean Absolute Error)代表平均绝对误差,MRE(Mean Relative Error)代表平均相对误差。

结果表明:HY-1C/D CZI影像在甘泉岛地区开展水深反演的平均绝对误差分别为1.60 m和1.85 m,相对误差分别为22.48%和26.23%,反演效果较好。GeoEye-1的平均绝对误差在亚米级,为0.78 m,相对误差为10.86%,精度最高。说明遥感影像的空间分辨率、信噪比等因素都会在一

定程度上影响L-S模型在岛礁浅海的水深反演精度。此外,幅宽是由卫星高度和视场角共同决定的,如式(7)所示:

$$w = Z \times 2 \times \tan(\alpha/2) \quad (7)$$

式中, w 代表幅宽, Z 代表卫星高度, α 代表视场角。HY-1C/D卫星CZI传感器与GeoEye-1卫星的幅宽差异很大,分别为950 km和15 km,说明HY-1C/D卫星CZI传感器的视场角大,拍摄一轨影像的持续时间长,对成像时间的变化更为敏感,不同时间的太阳角等环境因素的改变对传感器接收的信号影响更显著。因此,HY-1C/D卫星CZI传感器的大视场角特性也是水深反演误差的主要来源。

3.3 水深反演结果交叉验证

将GeoEye-1反演得到的水深栅格图重采样到与

HY-1C/D CZI 空间分辨率一致 (50 m), 在永乐环礁不同岛礁选取了 AB、CD 等 6 条剖面 (图 4 (b)) 进行不同卫星数据的水深反演结果的交叉对比, 如图 8 所示。结果表明, 从剖面 AB 的 3 次反演结果的断面来看, HY-1C/D 与 GeoEye-1 的反演结果相比基本重合, HY-1C/D 两颗卫星 CZI 传感器水深反演结果的变化趋势也基本一致, 有些剖面由于几何校正误差存在微小偏移。说明两颗卫星虽

然经过了统一的几何校准与图像预处理, 但是上午星 HY-1C 和下午星 HY-1D 由于成像时间不一致, 太阳角和卫星观测角存在较大差异, 几何变形程度不一致, 在光谱特征和空间配准等方面还是不可避免地会存在较小偏差。另一方面, HY-1C/D CZI 空间分辨率只有 50 m, 幅宽 950 km, 永乐环礁在影像上所占比例极小, 1 个像元的偏移则会产生 50 m 的校正误差。

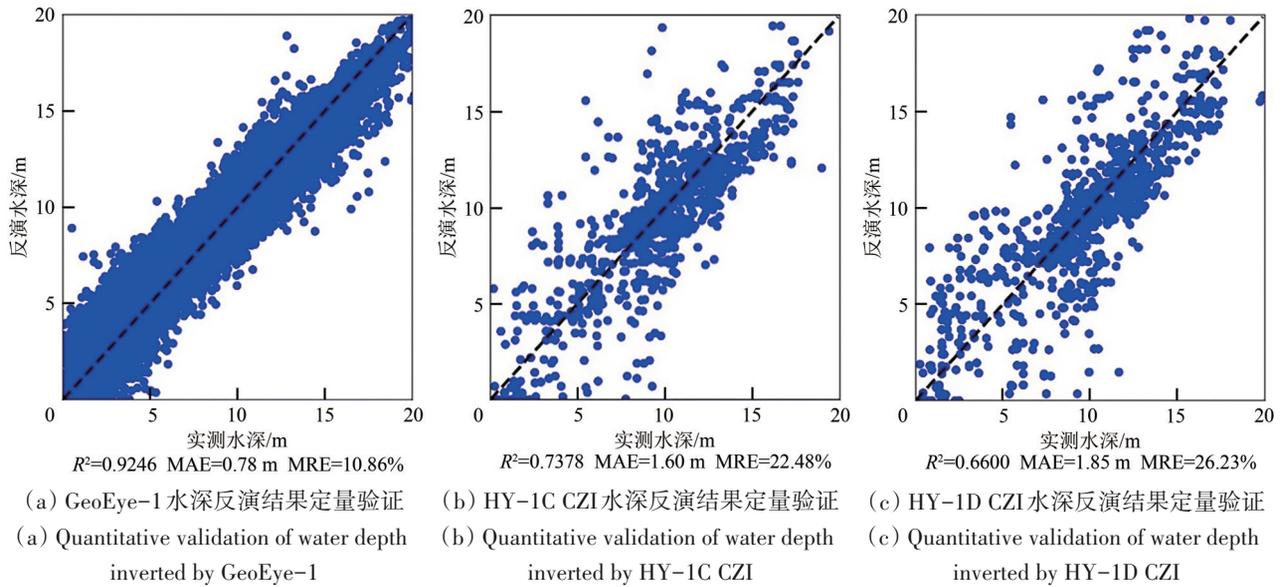
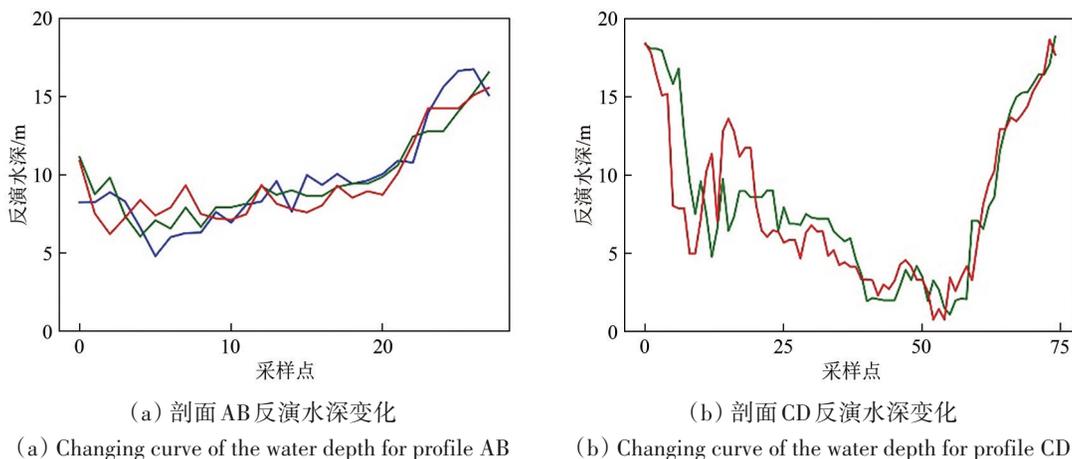


图 7 甘泉岛水深反演结果定量验证

Fig. 7 Quantitative validation of water depth inversion results in Ganquan Island

为进一步对比 HY-1C/D CZI 与 GeoEye-1 卫星的岛礁浅海水深探测能力, 逐像元提取了 HY-1C 和 HY-1D 卫星在甘泉岛区域的水深反演结果, 并与相应位置处的 GeoEye-1 水深 (重采样为空间分

辨率 50 m) 进行交叉对比, 图 9 (a)、(b) 所示分别为 GeoEye-1 与 HY-1C 和 GeoEye-1 与 HY-1D 之间定量对比的散点密度图。



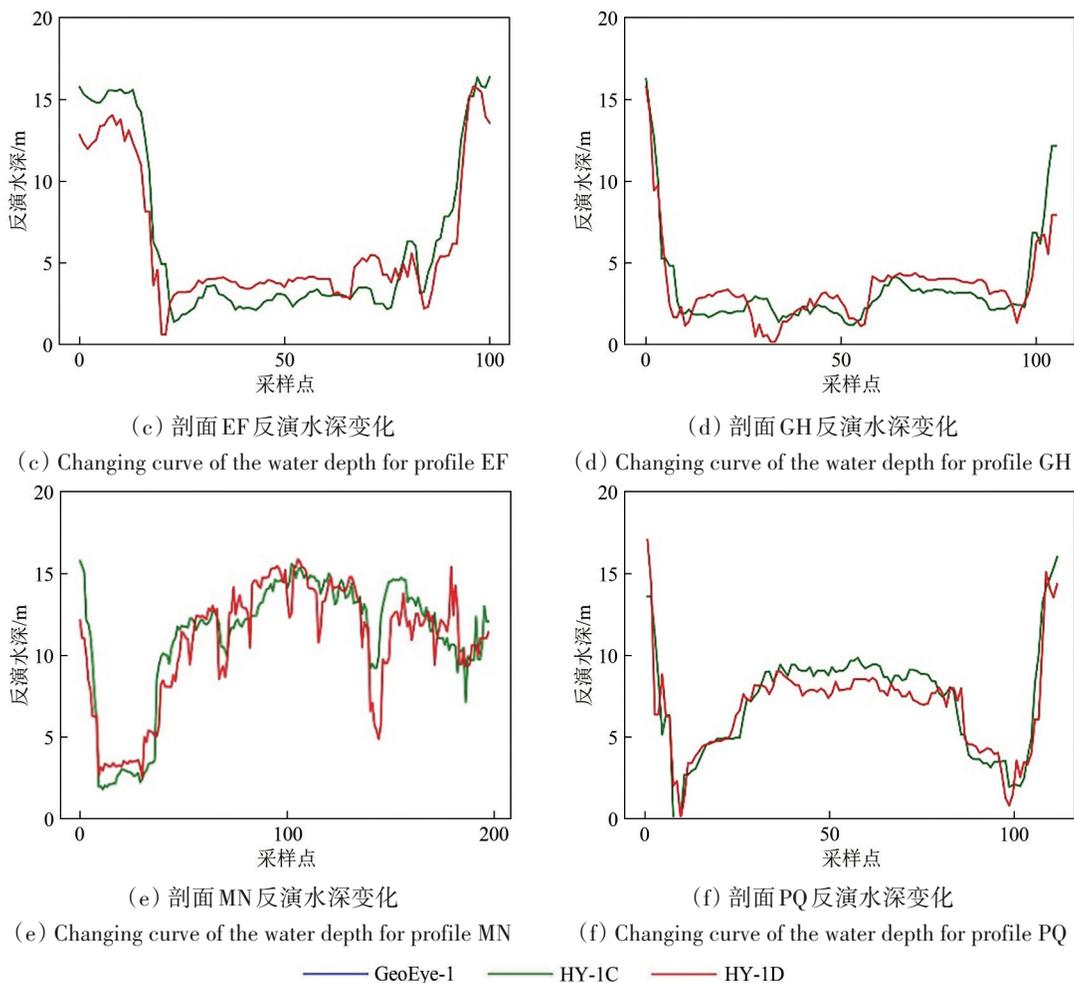


图8 图4(b)中6条剖面水深反演结果变化图

Fig. 8 Changing curves of the water depth for the six profiles shown in Fig.4(b)

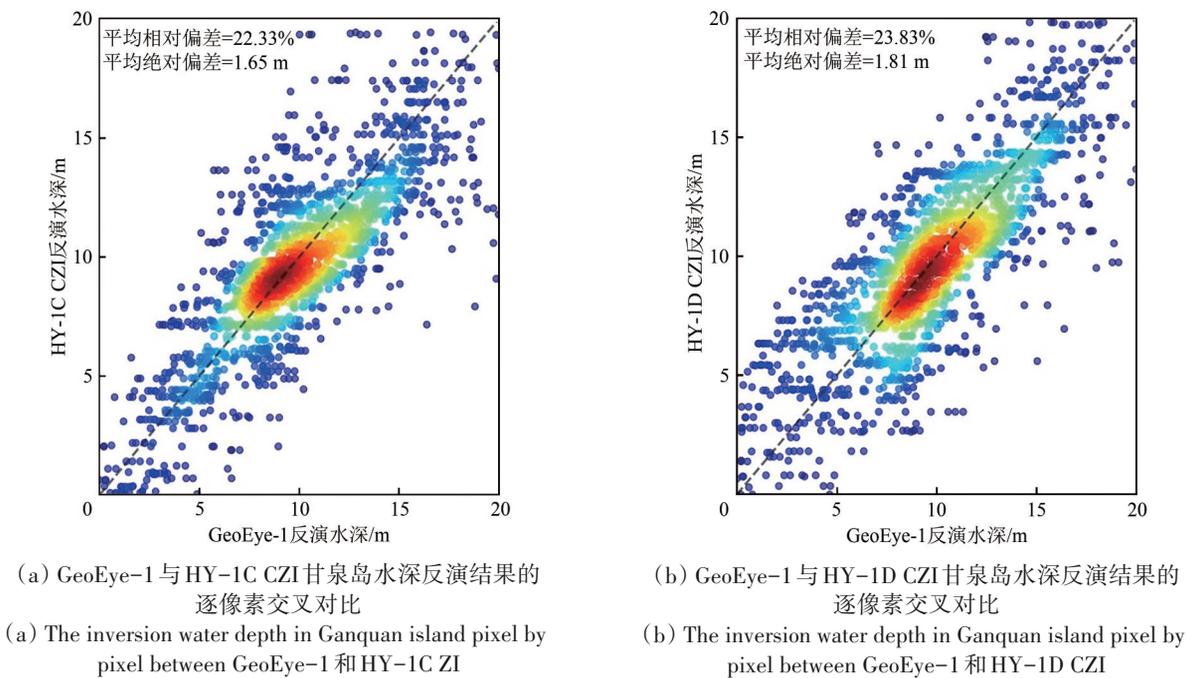


图9 甘泉岛水深反演结果的逐像素交叉对比散点密度图

Fig. 9 Scatter density maps of the inversion water depth in Ganquan island pixel by pixel

结果表明, 甘泉岛水深集中在7—12 m, 两幅图红色的高密度区围绕1:1线分布, 远离1:1线的位置有少量离散点分布, 平均绝对偏差分别为1.65 m和1.81 m, 相对偏差分别为22.33%和23.83%。虽然HY-1C/D卫星的水深验证精度略差于GeoEye-1, 但HY-1C/D卫星反演结果的绝对误差均在2 m以内, 并且与基于高空间分辨率GeoEye-1卫星数据的水深反演结果较为一致, 说明HY-1C/D两颗卫星具备浅海水深探测能力, 可用于岛礁浅海水深探测, 具有较高的参考价值。

4 结 论

本文基于HY-1C/D卫星CZI传感器的4个波段多光谱数据, 以西沙群岛永乐环礁为研究区, 利用Xia等(2020)发展的L-S模型, 实现了较大范围内无需实测水深数据支持的岛礁浅海水深信息反演。研究结果表明, 与甘泉岛实测水深数据相比, HY-1C/D卫星水深反演的平均绝对误差分别为1.60 m和1.85 m, 相对误差分别为22.48%和26.23%, 反演效果较好。GeoEye-1的平均绝对误差为0.78 m, 相对误差为10.86%, 精度最高。HY-1C/D CZI数据反演结果的平均绝对误差可控制在2 m以内, 具有较高的应用价值, 较好地解决了缺乏实测水深条件下的大范围浅海水深反演难题。

虽然HY-1C/D卫星的整体反演精度低于高空间分辨率卫星影像GeoEye-1, 但三颗卫星在甘泉岛的水深反演栅格图中(图6(c)、(d)、(e))的水深变化趋势一致, 礁盘内部较浅, 向外水深增加; 在剖面AB(图4)的水深变化趋势交叉对比结果(图8(a))也基本一致; GeoEye-1数据的反演结果分别与HY-1C/D两颗卫星的逐像元对比结果表明, 两者的平均绝对偏差分别为1.65 m和1.81 m, 在2 m以内, 平均相对偏差分别为22.33%和23.83%, 表明HY-1C/D卫星CZI多光谱遥感数据的水深反演结果可靠性强, 具备较高的参考价值。此外, HY-1C和HY-1D在永乐环礁各岛礁的水深剖面变化的交叉对比表明, 本方法应用于HY-1C/CZI传感器和HY-1D/CZI传感器稳健性强, 两颗卫星的CZI多光谱遥感数据均具备浅海水深探测能力, 反演结果稳定。

HY-1C/D CZI传感器可快速重复获取海洋大范围的光学影像数据, 可以充分发挥其重访周期

短、幅宽大的优势, 开展岛礁浅海水深制图工作, 进而实现高频率监测水下地形的变化情况, 与高空间分辨率卫星影像互为补充, 弥补了传统水深测量的不足, 也填补了中国水色卫星无下午数据的空白。因此, HY-1C/D CZI数据可以发挥其成像能力强的优势, 有效地用于南海、太平洋和印度洋等全球大范围岛礁区域的浅海水深反演与珊瑚礁探测, 应用潜力较大。

志 谢 此次研究所用的HY-1C/D卫星遥感数据来自国家卫星海洋应用中心, 同时得到了厦门大学李炎教授的帮助, 在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- Chen B Q, Yang Y M, Xu D W and Huang E H. 2019. A dual band algorithm for shallow water depth retrieval from high spatial resolution imagery with no ground truth. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 151: 1-13 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.012]
- Dekker A G, Phinn S R, Anstee J, Bissett P, Brando V E, Casey B, Fearn P, Hedley J, Klonowski W, Lee Z P, Lynch M, Lyons M, Mobley C and Roelfsema C. 2011. Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments. *Limnology and Oceanography: Methods*, 9(9): 396-425 [DOI: 10.4319/lom.2011.9.396]
- Eugenio F, Marcello J and Martin J. 2015. High-resolution maps of bathymetry and benthic habitats in shallow-water environments using multispectral remote sensing imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(7): 3539-3549 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2377300]
- Fan C X. 2019. Latest Advances of Global Ocean Tide Models and Their Accuracy Comparisons in Coastal Areas of China. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 39(5): 6 (范长新. 2019. 全球海潮模型最新进展及在中国沿海精度评估. 大地测量与地球动力学, 39(5): 6) [DOI: CNKI:SUN:DKXB.0.2019-05-007]
- Fan Y G and Liu J X. 2015. Water depth remote sensing retrieval model based on artificial neural network techniques. *Hydrographic Surveying and Charting*, 35(4): 20-23 (樊彦国, 刘金霞. 2015. 基于神经网络技术的遥感水深反演模型研究. 海洋测绘, 35(4): 20-23) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-3044.2015.04.005]
- Huang R Y, Yu K F, Wang Y H, Liu J L and Zhang H Y. 2019. Progress of the study on coral reef remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1091-1112 (黄荣永, 余克服, 王英辉, 刘嘉鑫, 张惠雅. 2019. 珊瑚礁遥感研究进展. 遥感学报, 23(6): 1091-1112) [DOI:10.11834/jrs.20198110]
- Irish J L and Lillycrop W J. 1999. Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2/3): 123-129 [DOI: 10.1016/S0924-2716(99)00003-9]
- Lee Z, Carder K L, Chen R F and Peacock T G. 2001. Properties of the

- water column and bottom derived from Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C6): 11639-11651 [DOI: 10.1029/2000JC000554]
- Lee Z, Carder K L, Mobley C D, Steward R G and Patch J S. 1998. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model. *Applied Optics*, 37(27): 6329-6338 [DOI: 10.1364/AO.37.006329]
- Lee Z, Carder K L, Mobley C D, Steward R G and Patch J S. 1999. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Applied Optics*, 38(18): 3831-3843 [DOI: 10.1364/AO.38.003831]
- Lee Z, Casey B, Arnone R A, Weidemann A D, Parsons R, Montes M J, Gao B C, Goode W, Davis C O and Dye J. 2007. Water and bottom properties of a coastal environment derived from Hyperion data measured from the EO-1 spacecraft platform. *Journal of Applied Remote Sensing*, 1(1): 011502-011516. [DOI: 10.1117/1.2822610]
- Li L. 2016. Remote sensing bathymetric inversion for the Xisha Islands based on WorldView-2 data: a case study of Zhaoshu Island and South Island. *Remote Sensing for Land and Resources*, 28(4): 170-175 (李丽. 2016. 基于WorldView-2数据的西沙群岛遥感水深反演——以赵述岛和南岛为例. *国土资源遥感*, 28(4): 170-175) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2016.04.26]
- Liang C, Liu L, Liu J Q, Zou B, Zou Y R and Cui S X. 2020. Extracting mangrove information using MNF transformation based on HY-1C CZI spectral indices reconstruction data. *Haiyang Xuebao*, 42(4): 104-112 (梁超, 刘利, 刘建强, 邹斌, 邹亚荣, 崔松雪. 2020. 基于HY-1C CZI影像光谱指数重构数据MNF变换的红树林提取. *海洋学报*, 42(4): 104-112) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2020.04.012]
- Liu J L, Huang R Y and Yu K F. 2020. Analysis on the geomorphic changes of Huangyan Island based on satellite images over the past 40 years. *Quaternary Sciences*, 40(3): 775-790 (刘嘉懿, 黄荣永, 余克服. 2020. 黄岩岛环礁地貌近40年变化的遥感分析. *第四纪研究*, 40(3): 775-790) [DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2020.03.15]
- Liu Y M, Deng R R, Li J, Qin Y, Xiong L H, Chen Q D and Liu X L. 2018. Multispectral bathymetry via linear unmixing of the benthic reflectance. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(11): 4349-4363 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2874684]
- Liu Y M, Tang D L, Deng R R, Cao B, Chen Q D, Zhang R H, Qin Y and Zhang S Q. 2021. An adaptive blended algorithm approach for deriving bathymetry from multispectral imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 801-817 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3034375]
- Lu G, Yin F, Chen C, Wang D M and Liang W G. 2017. Water Depth Extraction from Landsat-8 Image in Hongze Lake. *Beijing Surveying and Mapping*, 000(004): 13-18 (卢刚, 尹凡, 陈成, 王冬梅, 梁文广. 2017. 基于Landsat-8遥感影像的洪泽湖水深提取技术研究. *北京测绘*, (4): 13-18) [DOI: CNKI:SUN:BJCH.0.2017-04-005]
- Lyzenga D R. 1978. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, 17(3): 379-383 [DOI: 10.1364/ao.17.000379]
- Ma Y H, Zhang H G, Li X R, Wang J, Cao W T, Li D L, Lou X L and Fan K G. 2021. An exponential algorithm for bottom reflectance retrieval in clear optically shallow waters from multispectral imagery without ground data. *Remote Sensing*, 13(6): 1169 [DOI: 10.3390/rs13061169]
- Markham B L and Barker J L. 1987. Thematic Mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, 8(3): 517-523 [DOI: 10.1080/01431168708948658]
- Sheng L, Wang S T, Zhou G W, Bai J and Li Y C. 2015. Research on reefs bathymetry estimation by remote sensing based on nonlinear model. *Science of Surveying and Mapping*, 40(10): 43-47 (盛琳, 王双亭, 周高伟, 白洁, 李英成. 2015. 非线性模型岛礁礁盘遥感水深反演. *测绘科学*, 40(10): 43-47) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2015.10.008]
- Stumpf R P, Holderied K and Sinclair M. 2003. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48(1 part 2): 547-556 [DOI: 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547]
- Su H B, Liu H X, Wang L, Filippi A M, Heyman W D and Beck R A. 2014. Geographically adaptive inversion model for improving bathymetric retrieval from satellite multispectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(1): 465-476 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2241772]
- Wang J K, Chen Z H, Yu K F, Huang R Y and Wang Y H. 2018. Water depth information extraction with multi-spectral remote sensing in coral reefs region. *Remote Sensing Technology and Application*, 33(1): 61-67 (王纪坤, 陈正华, 余克服, 黄荣永, 王英辉. 2018. 珊瑚礁区多光谱遥感水深反演研究. *遥感技术与应用*, 33(1): 61-67) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2018.1.0061]
- 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]
- Wang R, Shen Q, Peng H C, Yao Y, Li J S, Wang M X, Shi J R and Xu W T. 2022. Study on the applicability of multi-source high-resolution satellite images for monitoring black and odorous water body. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 179-192 [DOI: 10.11834/jrs.20220479]
- Wang Y H, Chen Y L, Zhou X H, Yang L and Fu Y G. 2018. Research on reef bathymetry using remote sensing based on polynomial regression model. *Acta Oceanologica Sinica*, 40(3): 121-128 (王燕红, 陈义兰, 周兴华, 杨磊, 付延光. 2018. 基于多项式回归模型的岛礁遥感浅海水深反演. *海洋学报*, 40(3): 121-128) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2018.03.012]
- Westfeld P, Maas H G, Richter K and Weiß R. 2017. Analysis and correction of ocean wave pattern induced systematic coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128: 314-325 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.04.008]
- Xia H Y, Li X R, Zhang H G, Wang J, Lou X L, Fan K G, Shi A Q and Li D L. 2020. A bathymetry mapping approach combining log-ratio and semianalytical models using four-band multispectral imagery without ground data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(4): 2695-2709 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2953381]
- Zhang J L and Yang X K. 2016. Tidal level forecast and accuracy as-

- essment of coastal tidal stations in China. *China Water Transport*, 16(12): 234-235 (张建良, 杨晓坤. 2016. 中国沿岸验潮站潮位预报及精度评估. *中国水运(下半月)*, 16(12): 234-235)
- Zhang L, Teng H Z, Meng C Y, Li J, Xin X H, Ye Q G and Li H B. 2011. Bathymetry using hyperspectral imagery based on semi-analytical model. *Hydrographic Surveying and Charting*, 31(4): 17-21 (张靛, 滕惠忠, 孟婵媛, 李军, 辛宪会, 叶秋果, 李海滨. 2011. 基于半分析模型的高光谱遥感水深探测方法. *海洋测绘*, 31(4): 17-21) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-3044.2011.04.005]
- Zhang Z, Zhang J Y, Ma Y, Tian H B and Jiang T. 2019. Retrieval of nearshore bathymetry around Ganquan Island from LiDAR waveform and QuickBird image. *Applied Sciences*, 9(20): 4375 [DOI: 10.3390/app9204375]
- Zhang Z X and Hao Y L. 2012. Satellite multi-spectral remote sensing inversion in shallow water detection. *Navigation of China*, 35(1): 13-18 (张振兴, 郝燕玲. 2012. 卫星遥感多光谱浅海水深反演法. *中国航海*, 35(1): 13-18) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2012.01.004]
- Zhou M X, Liu Y X, Li M C, Sun C and Zou W. 2015. Geomorphologic information extraction for multi-objective coral islands from remotely sensed imagery: A case study for Yongle Atoll, South China Sea. *Geographical Research*, 34(4): 677-690 (周旻曦, 刘永学, 李满春, 孙超, 邹伟. 2015. 多目标珊瑚岛礁地貌遥感信息提取方法——以西沙永乐环礁为例. *地理研究*, 34(4): 677-690) [DOI: 10.11821/dlyj201504007]

Retrieval and assessment of island shallow water depth without ground data from the HY-1C/D CZI multispectral imagery

ZHANG Huaguo^{1,2}, MA Yunhan¹, LI Dongling¹, Cao Wenting¹, Wang Juan¹

1.State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China;

2.School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Shallow water depth of islands and reefs is an important marine element. The islands and reefs in the South China Sea are located far from the mainland, which makes it difficult to assess long-term changes in underwater topography owing to the low efficiency and difficulty in field investigations. Satellite remote sensing imagery capable of large coverage and high frequency is urgently needed. The double satellite network of HY-1C/D greatly improves the coverage frequency. The Coastal Zone Imager (CZI) can provide fast operational remote sensing services for underwater detection of islands and reefs. To fully explore the depth detection capabilities of the two satellites, this study used Yongle Atoll as the research area, with HY-1C/D CZI multispectral remote sensing imagery as the data source. Combined semi-analytical and log-ratio models were used to perform water depth inversion independent of in situ data. The objective is to access the application potential of HY-1C/D CZI imagery for shallow water depth inversion of islands and reefs. This study combined a semi-analytical and logarithmic ratio model (called L-S model) based on satellite remote sensing imagery of HY-1C/D CZI, which includes four bands from visible to near-infrared. The strong linear relationship between water depth and the relevant spectral parameters of the logarithmic ratio model were used to globally restrict the semi-analytical model. After preprocessing the HY-1C/D CZI domestic multispectral imagery, which included geographic projection, geometric precision correction, calculation of the top of atmosphere reflectance, radiometric correction, sun glint correction, and atmospheric correction, a shallow water depth inversion experiment was carried out in Yongle Atoll, independent of in situ water depth or any other priori knowledge based on the L-S model. The water depth inversion results after tidal height correction using the OSU tidal prediction software in Yongle Atoll were compared with the in situ data and cross-compared with the inversion results based on GeoEye-1 remote sensing imagery. Compared with the in situ water depth, the mean absolute errors of HY-1C/D CZI were 1.60 m and 1.85 m, and the relative errors were 22.48% and 26.23%, respectively. The mean absolute error of the water depth inversion result of GeoEye-1 was 0.78 m and the relative error was 10.86%. Compared with the results of GeoEye-1, the mean average absolute deviation of HY-1C/D CZI were 1.65 m and 1.81 m, and the relative deviations were 22.33% and 23.83%, respectively, which were basically consistent in different satellite sensors. Although the overall accuracy is lower than that of high-spatial-resolution satellite images, the mean absolute error of the inversion results of HY-1C/D CZI can be controlled within 2.0 m, with a high reference value. This solves the problem of the lack of in situ water depth data during shallow water depth inversion at a large scale. In addition, a cross-comparison of the inversion results between HY-1C and HY-1D showed that this method is robust when applied to different satellite sensors. This indicates that HY-1C/D CZI have the advantages of a short revisiting period and large imaging coverage, which can quickly and repeatedly obtain large-scale optical image data of the ocean and perform shallow water depth mapping of islands and reefs, thereby realizing high-frequency monitoring of underwater terrain changes. HY-1C/D CZI imagery and high-spatial-resolution satellite imagery complement each other and compensate for the shortcomings of field measurements. Therefore, based on the HY-1C/D CZI imagery, the water depth information can be retrieved in the range of 0–20 m stably and accurately, which has a wide range of application potential in the shallow water depth inversion of global islands and reefs.

Key words: HY-1C/D, Coastal Zone Imager (CZI), island shallow water depth, Yongle Atoll, L-S model

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFE0117600); National Natural Science Foundation of China (No. 41876208); Scientific Research Fund of the Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, China (No. JG2105)