

陆天启, 吴志芳, 任潇洒, 等. 基于 GeoEye-1 和 WorldView-2 遥感数据的浅海水深反演比较研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(4): 134–142, doi:10.12284/hyxb2022082

Lu Tianqi, Wu Zhifang, Ren Xiaosa, et al. Comparative study on shallow water depth inversion based on GeoEye-1 and WorldView-2 remote sensing data[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(4): 134–142, doi:10.12284/hyxb2022082

# 基于 GeoEye-1 和 WorldView-2 遥感数据的浅海水深反演比较研究

陆天启<sup>1,2,3</sup>, 吴志芳<sup>4\*</sup>, 任潇洒<sup>5</sup>, 姚慧敏<sup>1,2,3</sup>, 邵长高<sup>1,2,3</sup>

(1. 广州海洋地质调查局 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广东 广州 510075; 2. 广州海洋地质调查局 三亚南海地质研究所, 海南 三亚 572025; 3. 中国地质调查局南海地质科学院, 海南 三亚 572025; 4. 仲恺农业工程学院 信息科学与技术学院, 广东 广州 510225; 5. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195)

**摘要:** 浅海区水深的精确反演对于海洋空间管理和生态环境保护至关重要。选取南海西沙群岛的羚羊礁海域为研究区, 基于 GeoEye-1 和 WorldView-2 高分辨率多光谱遥感数据和实测水深数据, 分别建立了单波段模型、多波段模型和波段比值模型。结果显示, 由绿波段参与建立的水深反演模型相关性普遍较高, 同时利用 4 个波段组合建立的多波段模型精度最高, 相关系数分别达到了 0.870 和 0.853。基于该模型的反演结果对 GeoEye-1 和 WorldView-2 遥感数据在不同水深范围内的反演精度进行比较, 结果表明, 两种数据在不同水深范围内的反演误差变化趋势一致, 平均相对误差最大值均出现在 0~5 m, 而最小值均出现在 20~25 m。总体而言, WorldView-2 影像反演水深的精度高于 GeoEye-1 影像的反演精度。研究对于热带浅海区的水深反演工作具有一定的参考意义。

**关键词:** 浅海水深; 多光谱遥感; 模型; 定量反演; 精度比较

中图分类号: P237

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)04-0134-09

## 1 引言

浅海水深是海岸环境的重要参数, 其对于海洋运输、海岸带管理以及珊瑚礁生态保护等方面具有极其重要的意义<sup>[1]</sup>。船载声呐测量和机载激光雷达测量等手段可以获得准确的水深数据<sup>[2]</sup>, 但因其存在耗时耗力、成本高昂以及覆盖面有限等缺点<sup>[3-4]</sup>, 使得这类方法有一定的局限性。相比之下, 遥感技术具有成本低、覆盖面广、动态监测以及较高的空间、时间分辨率等多方面优势<sup>[5]</sup>, 特别是在浅海和偏远的海域, 已经成为传统水深测量的有效补充手段。

半经验半理论模型是目前常用的水深反演方

法。基于水体散射的水深反演模型, 经过简化后只需回归两个经验参数即可建立辐射亮度与水深之间的数据关系式, 这就是经典的单波段水深反演模型<sup>[6]</sup>。通过假设不同波段在不同底质类型上的反射率比值不变, 可建立双波段水深反演模型, 进而可以推广出多波段模型<sup>[7]</sup>。在此基础上, 波段比值模型得以发展, 在反演大范围的水深时, 波段比值模型更加稳定且探测范围更深<sup>[8]</sup>。上述方法均为半经验半理论模型, 因其具有一定的物理意义和计算简便的优点而被广泛应用<sup>[9-10]</sup>。

多光谱遥感数据因具有较高的空间分辨率而被广泛地应用在浅海水深反演领域。基于 Landsat-TM

收稿日期: 2021-07-16; 修订日期: 2021-09-23。

基金项目: 中国地质调查局地调项目 (DD20211362, DD20191037); 三亚崖州湾科技管理局 2020 年度科技计划 (SKJC-2020-01-008)。

作者简介: 陆天启 (1992—), 男, 江苏省新沂市人, 博士, 主要从事遥感定量反演研究。E-mail: lutq2014@126.com

\* 通信作者: 吴志芳, 女, 山东省日照市人, 工程师, 主要从事遥感与地理信息系统研究。E-mail: 764362840@qq.com

数据, Liceaga-Correa 和 Euan-Avila<sup>[11]</sup> 分析了主成分分析、多元线性回归等 4 种水深反演方法在珊瑚礁系统中的绝对误差。利用波段比值模型, Lu 等<sup>[12]</sup> 比较了 Landsat-8、SPOT-6 和 WorldView-2 3 种遥感数据在南海东锣岛海域的水深反演精度。基于多时相的 WorldView-2 和 Landsat-8 数据, Liu 等<sup>[13]</sup> 构建了自适应的水深分段反演模型, 提高了水深反演的精度。此外, 利用 WorldView-3、Planet、Sentinel-2、“高分一号”等多光谱遥感数据在水深反演研究中也取得了较好的效果<sup>[1,14-19]</sup>。GeoEye-1 和 WorldView-2 作为当前国际上空间分辨率较高的两种遥感数据, 是多光谱遥感反演水深的常用数据源, 但目前还未见对 GeoEye-1 和 WorldView-2 在同一海域水深反演能力的研究。

基于 GeoEye-1 和 WorldView-2 高分辨率遥感数据和水深实测数据, 本文以南海西沙群岛的羚羊礁海

域为研究区, 分别建立单波段模型、多波段模型和波段比值模型, 选取精度最高的模型进行水深反演。在此基础上, 比较分析 GeoEye-1 和 WorldView-2 遥感数据在不同水深范围内的反演精度, 为我国热带岛礁海域的浅海水深反演工作提供参考。

## 2 研究区及数据

### 2.1 研究区

研究区选取南海的羚羊礁海域, 羚羊礁位于南海西沙群岛核心区永乐环礁的西南部, 隶属于海南省三沙市, 其经纬度范围为 16°26′~16°30′N, 111°34′~111°37′E(图 1), 为热带季风气候。羚羊礁海域被珊瑚礁、海沙和 underwater 植被覆盖, 因海域远离大陆, 受人类直接影响小, 海域水体符合一类水体标准, 光可穿透性强, 是遥感反演水深的理想区域。

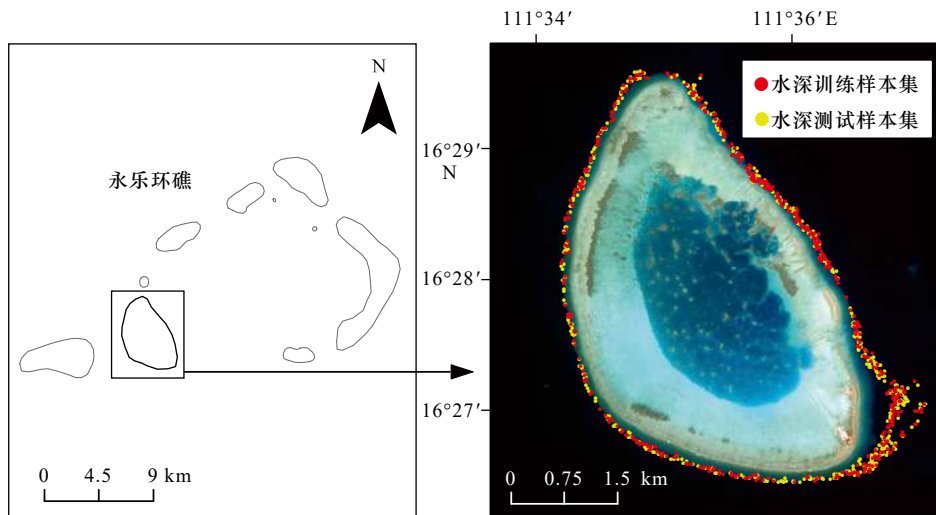


图 1 研究区及水深实测点

Fig. 1 Study area and measured points

### 2.2 数据

研究使用的数据为美国的 GeoEye-1 和 WorldView-2 遥感影像数据, GeoEye-1 和 WorldView-2 数据均为当前世界上分辨率较高的商业遥感卫星数据, 有关卫星数据的获取时间、波长范围及空间分辨率见表 1。选取两种数据波长范围对应的波段进行后续的对比分析, 具体为 GeoEye-1 的波段 1、波段 2、波段 3、波段 4 与 WorldView-2 的波段 2、波段 3、波段 5、波段 7。

水深实测数据使用的是广州海洋地质调查局于 2019 年 9 月利用美国 Teledyne T20P 型多波束测深系统获取的水深数据, 网格分辨率为 20 m。由于羚羊礁海域的地质环境稳定<sup>[20]</sup>, 且使用的影像获取时间与水深实测数据获取的时间接近, 水深在一定时间范围

内变化较小, 故可以适用。根据光学遥感探测水深的的能力, 本文筛选出羚羊礁周围 0~30 m 的水深实测

表 1 遥感卫星数据参数

Table 1 Remote sensing satellite data parameters

参数	GeoEye-1	WorldView-2
获取时间	2017年2月18日	2019年7月15日
波长范围/nm	波段1(蓝): 450~510 波段2(绿): 510~580 波段3(红): 655~690 波段4(近红外): 780~920	波段1(海岸): 400~450 波段2(蓝): 450~510 波段3(绿): 510~580 波段4(黄): 585~625 波段5(红): 630~690 波段6(红边): 705~745 波段7(近红外): 770~895 波段8(近红外): 860~1 040
空间分辨率/m	1.65	1.80

点,并使用 ArcGIS 子集要素工具将其分为训练样本集和测试样本集(图 1),其中,训练样本集样本 440 个,用来建立水深反演模型,测试样本集样本 430 个,用来分析水深反演精度。

### 3 数据处理

#### 3.1 数据预处理

通常遥感影像是以像元亮度值(Digital Number, DN)的形式表现,像元亮度值是一个无量纲的整数。利用像元亮度值只能进行同景影像的相对比较,若要进行不同传感器影像之间的定量比较和应用分析,同时一定程度上消除传感器带来的误差,就需要进行辐

射定标。本文采用绝对辐射定标,定标所需参数从影像的 IMD(Image Metadata)定标文件中获取。而后需要通过大气校正的方法消除传感器接收到的大气等信息。基于 MODTRAN 4+辐射传输模型的 FLAASH(Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)大气校正方法,可以有效消除大气和光照等因素对地物反射的影响,其适用的范围可从可见光至近红外及短波红外<sup>[21]</sup>。本文使用 ENVI(the Environment for Visualizing Images)中的 FLAASH 大气校正模型实现对 GeoEye-1 和 WorldView-2 影像的大气校正,任意选取浅海中的一点,其校正前后的光谱曲线如图 2 所示。

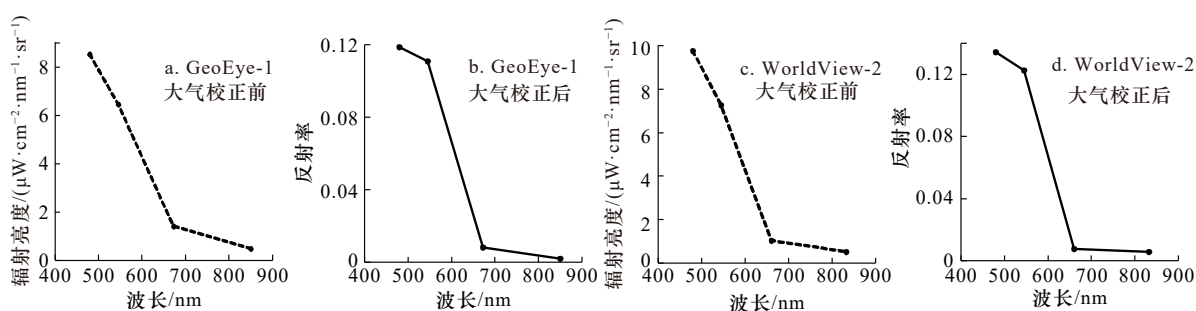


图 2 大气校正前后光谱曲线

Fig. 2 Spectral curves before and after atmospheric correction

为了使两种不同探测器获取的遥感影像在空间上能够完全匹配,在由数据处理部门进行初步的几何校正后,仍需进一步做几何精校正。本文在两幅影像上各选取分布均匀的 30 个地面控制点,通过与同区域的谷歌影像对比进行几何精校正。

#### 3.2 潮汐校正

海水的瞬时潮位随着时间的变化不断地涨落,而水深数据采集时间与遥感影像获取时间不同,因此,为了保证影像获取时刻的实际水深值与水深测量值之间的一致性,需要对水深测量值进行潮汐校正。根据潮汐表(<https://tides4fishing.com/as/china>),获取 GeoEye-1 和 WorldView-2 成像时刻的潮高分别为 0.65 m 和 1.74 m,同时将水深测量值转换至潮高基准面,则影像成像时刻的实际水深值为转换后的水深测量值加上对应的潮高。

### 4 水深反演模型

根据布格尔定理可知,光辐射通量随着水深的变化呈指数规律衰减<sup>[22]</sup>。考虑到这一特性,水体表面反射率  $R_n$  可简化为

$$R_n = R_{wn} + \alpha_n R_{bn} e^{-f k_n Z}, \quad (1)$$

式中,  $R_{wn}$  为第  $n$  波段的水体反射率;  $\alpha_n$  为常量,与太

阳辐射、太阳入射角和水体透过率等因素有关;  $R_{bn}$  为第  $n$  波段的水底反射率;  $f$  为几何光程长度,一般情况下取常数值 2;  $k_n$  为水体的衰减系数;  $Z$  为水深值。公式(1)是传统遥感水深反演常用的模型基础,根据其可以推导出单波段模型、多波段模型和波段比值模型等多种水深反演模型<sup>[23]</sup>。

#### 1) 单波段模型

将公式(1)进行对数运算,可得:

$$Z = \ln(\alpha_n R_{bn}) / f k_n - \ln(R_n - R_{wn}) / f k_n, \quad (2)$$

假设海底底质反射率为常数,同时,大气、海况和光学背景的影响相同,水体的衰减系数也为常数,令  $A = \ln(\alpha_n R_{bn}) / f k_n$ ,  $A_1 = -1 / f k_n$ ,  $X_n = R_n - R_{wn}$ , 则公式(2)可简化为单波段模型的形式:

$$Z = A + A_1 \ln(X_n), \quad (3)$$

式中,  $X_n$  为第  $n$  波段的反射率。

#### 2) 多波段模型

不同类型的水体具有不同的底质反射率和衰减系数,而通过不同波段比值的形式可以一定程度上消除这些差异<sup>[7]</sup>,多波段模型在此基础上得以发展。假设两个波段(例如波段 1 和波段 2)在不同的底质类型上反射率比值保持不变,即  $\frac{\alpha_1 R_{b1}}{\alpha_2 R_{b2}}$  为常数,则通过对两

个不同波段对应的公式(1)进行比值运算, 可得:

$$Z = [1/f(k_2 - k_1)] \left( \ln \frac{\alpha_1 R_{b1}}{\alpha_2 R_{b2}} - \ln \frac{R_1 - R_{w1}}{R_2 - R_{w2}} \right), \quad (4)$$

令  $X_n = \ln(R_n - R_{wn})$ , 并按照与单波段模型相似的推导方法, 可得到双波段模型公式:

$$Z = A + A_1 \ln(X_1) + A_2 \ln(X_2), \quad (5)$$

将双波段模型进行推广, 可得到多波段模型公式:

$$Z = A + A_1 \ln(X_1) + A_2 \ln(X_2) + \dots + A_n \ln(X_n), \quad (6)$$

式中,  $A_n$  为第  $n$  波段的系数。

### 3) 波段比值模型

波段比值模型的假设条件与多波段模型相同, 即水底反射率比值不受底质类型的影响。同样地, 将两个不同波段对应的公式(1)进行比值运算得到公式

(4), 令公式(4)中  $A = \frac{1}{f(k_2 - k_1)} \ln \left( \frac{\alpha_1 R_{b1}}{\alpha_2 R_{b2}} \right)$ ,  $A_1 = \frac{1}{f(k_1 - k_2)}$ ,  $X_n = R_n - R_{wn}$ , 则可得到波段比值模型公式:

$$Z = A + A_1 \ln \frac{X_1}{X_2}. \quad (7)$$

## 5 水深遥感反演

### 5.1 水深反演模型建立

在水深反演的过程中, 水深反演模型的选取直接决定着反演精度的高低。本文基于 GeoEye-1 和 WorldView-2 的蓝波段、绿波段、红波段和近红外波段, 根据单波段模型、多波段模型和波段比值模型 3 种模型的基本形式, 逐一建立波段(波段组合)与水深训练样本集之间的拟合公式, 并计算了其对应的决定系数(表 2)。

表 2 水深反演模型及其决定系数

Table 2 Water depth inversion model and its determination coefficients

模型	GeoEye-1		WorldView-2	
	拟合公式	决定系数	拟合公式	决定系数
单波段模型	$y = -15.618 \ln(X_b) + 121.290$	0.563	$y = -19.630 \ln(X_b) + 153.310$	0.537
	$y = -11.989 \ln(X_g) + 90.712$	0.738	$y = -14.280 \ln(X_g) + 109.510$	0.680
	$y = -9.770 \ln(X_r) + 64.625$	0.091	$y = 0.427 \ln(X_r) + 19.500$	0.001
	$y = 8.866 \ln(X_{nir}) - 12.766$	0.033	$y = 1.120 \ln(X_{nir}) + 17.337$	0.007
多波段模型	$y = 4.179 \ln(X_b) - 14.544 \ln(X_g) + 78.751$	0.745	$y = 6.573 \ln(X_b) - 18.234 \ln(X_g) + 89.696$	0.689
	$y = -14.985 \ln(X_b) - 5.847 \ln(X_r) + 143.192$	0.595	$y = -21.155 \ln(X_b) - 4.477 \ln(X_r) + 181.884$	0.573
	$y = -15.385 \ln(X_b) + 4.275 \ln(X_{nir}) + 103.399$	0.571	$y = 20.910 \ln(X_b) + 3.227 \ln(X_{nir}) + 150.687$	0.592
	$y = -11.957 \ln(X_g) - 0.212 \ln(X_r) + 91.471$	0.739	$y = 15.027 \ln(X_g) - 4.056 \ln(X_r) + 130.695$	0.712
	$y = -11.854 \ln(X_g) + 4.770 \ln(X_{nir}) + 71.632$	0.748	$y = -14.617 \ln(X_g) + 2.369 \ln(X_{nir}) + 103.316$	0.711
	$y = -10.565 \ln(X_r) + 10.653 \ln(X_{nir}) + 27.285$	0.138	$y = 1.674 \ln(X_r) + 1.607 \ln(X_{nir}) + 8.803$	0.011
	$y = 4.745 \ln(X_b) - 15.041 \ln(X_g) + 1.010 \ln(X_r) + 73.513$	0.746	$y = 4.415 \ln(X_b) - 17.636 \ln(X_g) - 3.811 \ln(X_r) + 116.107$	0.716
	$y = 4.670 \ln(X_b) - 14.698 \ln(X_g) + 5.180 \ln(X_{nir}) + 56.621$	0.756	$y = 3.433 \ln(X_b) - 16.656 \ln(X_g) + 2.198 \ln(X_{nir}) + 93.418$	0.713
	$y = -14.626 \ln(X_b) - 6.357 \ln(X_r) + 5.577 \ln(X_{nir}) + 121.762$	0.607	$y = -21.520 \ln(X_b) - 2.591 \ln(X_r) + 2.539 \ln(X_{nir}) + 167.786$	0.603
	$y = -11.736 \ln(X_g) - 0.757 \ln(X_r) + 4.938 \ln(X_{nir}) + 73.666$	0.748	$y = -15.025 \ln(X_g) - 2.823 \ln(X_r) + 1.587 \ln(X_{nir}) + 120.108$	0.723
$y = 4.942 \ln(X_b) - 14.941 \ln(X_g) + 0.499 \ln(X_r) + 5.093 \ln(X_{nir}) + 54.407$	0.757	$y = 2.926 \ln(X_b) - 16.754 \ln(X_g) - 2.761 \ln(X_r) + 1.458 \ln(X_{nir}) + 111.300$	0.727	
波段比值模型	$y = 21.978 \ln \left( \frac{X_b}{X_g} \right) + 7.811$	0.561	$y = 28.096 \ln \left( \frac{X_b}{X_g} \right) + 5.834$	0.569
	$y = -9.668 \ln \left( \frac{X_b}{X_r} \right) + 40.248$	0.258	$y = -6.429 \ln \left( \frac{X_b}{X_r} \right) + 38.193$	0.182
	$y = -13.35 \ln \left( \frac{X_b}{X_{nir}} \right) + 55.538$	0.531	$y = -5.798 \ln \left( \frac{X_b}{X_{nir}} \right) + 40.067$	0.195
	$y = -11.45 \ln \left( \frac{X_g}{X_r} \right) + 36.747$	0.598	$y = -7.341 \ln \left( \frac{X_g}{X_r} \right) + 36.571$	0.356
	$y = -11.17 \ln \left( \frac{X_g}{X_{nir}} \right) + 43.112$	0.730	$y = -6.814 \ln \left( \frac{X_g}{X_{nir}} \right) + 39.628$	0.367
	$y = -10.59 \ln \left( \frac{X_r}{X_{nir}} \right) + 27.64$	0.138	$y = -0.494 \ln \left( \frac{X_r}{X_{nir}} \right) + 21.547$	0.003

注:  $X_b, X_g, X_r, X_{nir}$  分别为蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段的反射率。

根据表2中的决定系数进一步计算不同波段(波段组合)与水深之间的皮尔逊相关系数(图3)。从图3中可看出,在利用两种遥感影像和实测值所建立的水深反演模型中,不同波段(波段组合)与水深的相关性差异较大。由绿波段参与建立模型的相关系数普遍较高,其中,由GeoEye-1绿波段参与建立模型的相关系数均达到了0.749以上,9个模型达到了0.850以

上,由WorldView-2绿波段参与建立模型的相关系数均达到了0.597以上,2个模型达到了0.850以上。相比于单波段模型和波段比值模型,多波段模型的相关系数整体较高,其中使用4个波段建立的多波段模型拟合度最高(图4),其皮尔逊相关系数分别达到了0.870和0.853,因此,选用4个波段建立的多波段模型作为水深反演的最终模型。

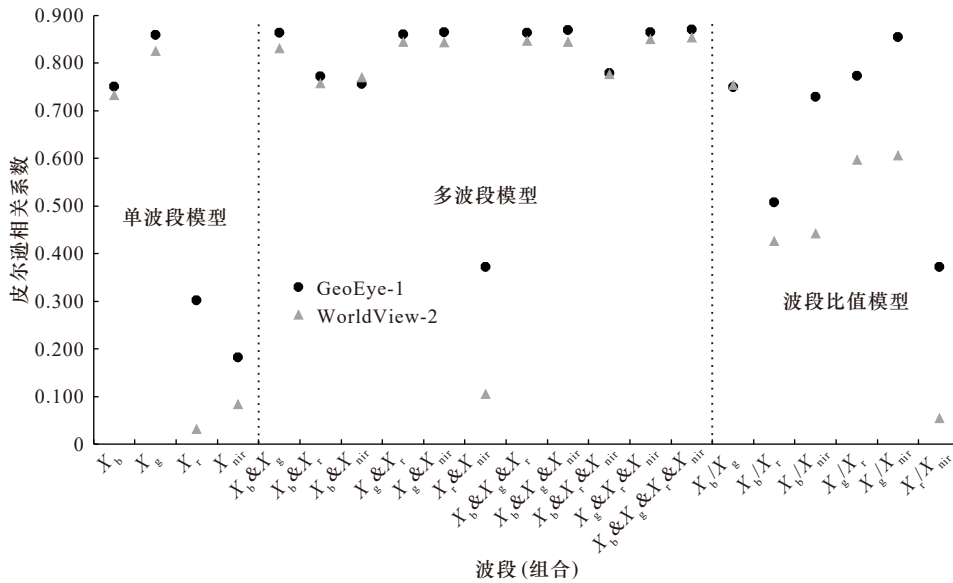


图3 不同波段(波段组合)与水深的相关系数

Fig. 3 Different bands (band combinations) and their correlation coefficients with water depth

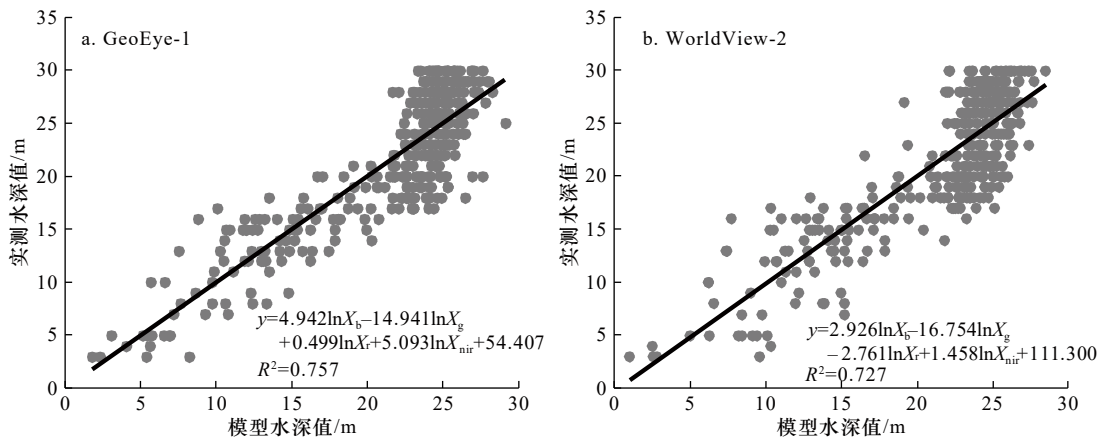


图4 4个波段建立的多波段模型水深值与实测水深值散点图

Fig. 4 Scatter plots of multi-band model water depth value and measured water depth value established by four bands

5.2 水深反演结果

分别将 GeoEye-1 和 WorldView-2 处理后的数据带入到4个波段建立的多波段模型中,计算后以水深5 m为间隔显示其反演结果,如图5所示。

5.3 精度评价与分析

本文采取平均相对误差和均方根误差两种指标来衡量水深反演结果的精度,其中,平均相对误差

(Mean Relative Error, MRE)为

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{obs,i} - x_{model,i}}{x_{obs,i}} \right| \times 100\%, \quad (8)$$

均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{obs,i} - x_{model,i})^2}{n}}, \quad (9)$$

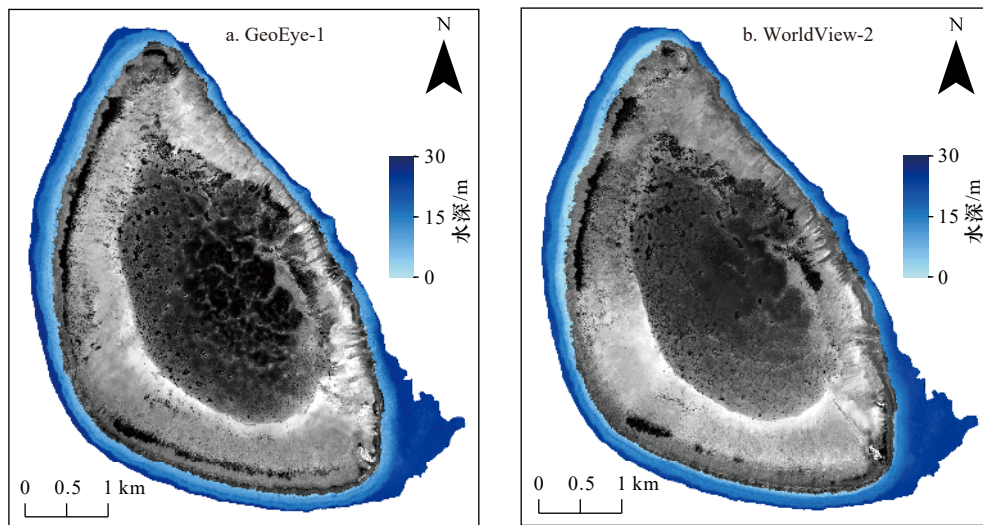


图5 水深反演结果

Fig. 5 Water depth inversion results

式中,  $n$  为水深测试集的点总数量;  $x_{obs,i}$  为第  $i$  个点的实际水深值;  $x_{model,i}$  为第  $i$  个点的反演水深值。

分别计算 GeoEye-1 和 WorldView-2 反演结果与水深测试样本集在不同水深范围内的平均相对误差和均方根误差(表 3)。从表 3 中可看出, 在任意水深范围内, WorldView-2 反演结果的平均相对误差和均方根误差均小于 GeoEye-1 反演结果的误差。平均相对误差最大值均在 0~5 m 水深范围内, 分别为 23.43% 和 19.56%, 其主要原因是该水深范围处于海浪破碎带, 海水表面的粗糙度大, 同时波浪破碎带的悬浮泥沙浓度较高<sup>[24]</sup>, 水体的光学衰减系数较大, 导致可探测深度小, 增大了反演误差。而均方根误差最大值均在 25~30 m 水深范围内, 分别为 3.79 m 和 2.94 m。同时, 整体来看, WorldView-2 反演的平均相对误差 (10.40%) 小于 GeoEye-1 的平均相对误差 (12.58%) 以

及其均方根误差 (2.53 m) 也小于 GeoEye-1 的均方根误差 (2.70 m)。因此, 总体而言, WorldView-2 影像在研究区的水深反演能力要强于 GeoEye-1 影像。

与此同时, 两种数据反演结果的误差在不同水深范围内的变化具有一致性(图 6)。在 0~25 m 水深范围内, 平均相对误差随着水深的增大呈减小趋势, 在 20~25 m 范围内达到最低值, 而后在 25~30 m 范围内有增大趋势(图 5a), 这表明两种数据均在 20~25 m 水深范围内具有较高的反演精度。另一方面, 随着水深的增加, 两种数据反演结果的均方根误差整体上呈增大趋势, 但与平均相对误差变化的趋势相同, 在 20~25 m 水深范围内出现了拐点(图 5b), 这说明该水深范围内的海水状况更加稳定, 更适宜水深反演模型的应用。

## 6 结论

本文分别基于 GeoEye-1 和 WorldView-2 高分辨遥感数据及实测水深值, 建立了 4 个波段的单波段模型、多波段模型和波段比值模型, 分别选取相关性最高的模型反演了羚羊礁浅海海域的水深, 并分析比较了两种数据在不同水深范围内的反演精度, 得到以下结论:

(1) 不同波段建立的水深反演模型差异较大, 而由绿波段参与建立的模型相关性较高。同时, 多波段模型整体上优于单波段模型和波段比值模型, 特别是 4 个波段组合建立的多波段模型在本研究区效果最佳。

(2) GeoEye-1 和 WorldView-2 影像的反演误差在

表 3 不同水深范围的反演误差

Table 3 Inversion error of different depth ranges

水深范围/m	平均相对误差/%		均方根误差/m	
	GeoEye-1	WorldView-2	GeoEye-1	WorldView-2
0~5	23.43	19.56	0.87	0.83
5~10	22.42	16.60	2.25	1.88
10~15	16.19	13.50	2.53	2.15
15~20	13.19	10.71	2.70	2.43
20~25	8.85	7.73	2.39	2.14
25~30	13.90	9.47	3.79	2.94
0~30	12.58	10.40	2.70	2.53

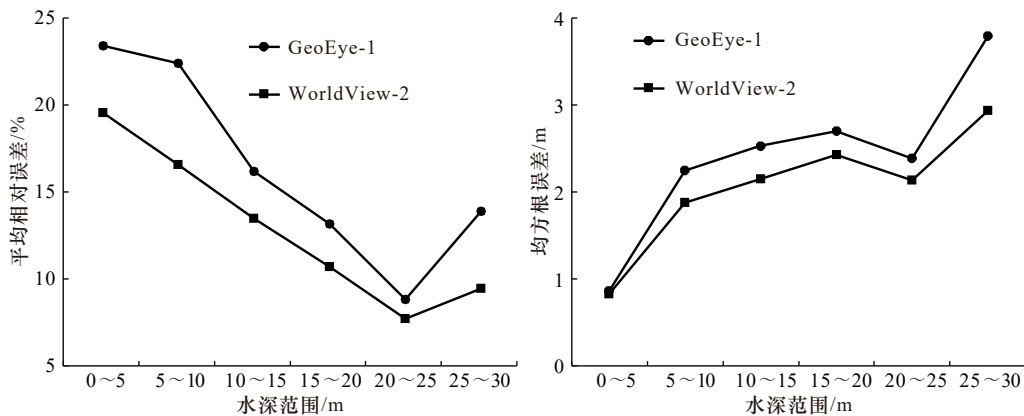


图6 水深反演误差变化趋势

Fig. 6 Variation trend of depth inversion error

不同水深范围内的变化趋势具有一致性,其平均相对误差均在0~5 m水深范围内最大,而在20~25 m水深范围内最小。随着水深的增加,两种数据反演结果的均方根误差整体上呈增大趋势。

(3) WorldView-2数据在不同水深范围内反演结果的平均相对误差和均方根误差均小于GeoEye-1数据的反演结果,因此,WorldView-2影像反演水深的精度高于GeoEye-1影像的反演精度,这对于在热带浅海水深反演数据源的选取有一定的参考意义。

羚羊礁浅海海域大多被珊瑚礁覆盖,底质类型较为均一,这是本文应用水深反演模型的前提条件,但严格意义上,研究区的底质类型是变化的,该海域底质类型变化对反演精度的影响是下一步研究的方向。另外,研究结果表明,该海域在20~25 m水深范围内具有最高的反演精度,影响该水深范围反演精度的因素也亟待研究,这对于提高其他水深范围的反演精度具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] Li Jiwei, Knapp D E, Schill S R, et al. Adaptive bathymetry estimation for shallow coastal waters using Planet Dove satellites[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111302.
- [2] Hsu H J, Huang C Y, Jasinski M, et al. A semi-empirical scheme for bathymetric mapping in shallow water by ICESat-2 and Sentinel-2: a case study in the South China Sea[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 178: 1–19.
- [3] Gao J. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations[J]. *Progress in Physical Geography*, 2009, 33(1): 103–116.
- [4] Jawak S D, Vadlamani S S, Luis A J. A synoptic review on deriving bathymetry information using remote sensing technologies: models, methods and comparisons[J]. *Advances in Remote Sensing*, 2015, 4(2): 147–162.
- [5] Su Haibin, Liu Hongxing, Wu Qiusheng. Prediction of water depth from multispectral satellite imagery—the regression Kriging alternative[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(12): 2511–2515.
- [6] Civco D L, Kennard W C. Satellite remote bathymetry: a new mechanism for modeling[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, 58(5): 545–549.
- [7] Paredes J M, Spero R E. Water depth mapping from passive remote sensing data under a generalized ratio assumption[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(8): 1134–1135.
- [8] Stumpf R P, Holderied K, Sinclair M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(1): 547–556.
- [9] 马毅, 张杰, 张靖宇, 等. 浅海水深光学遥感研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(3): 331–351.  
Ma Yi, Zhang Jie, Zhang Jingyu, et al. Progress in shallow water depth mapping from optical remote sensing[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(3): 331–351.
- [10] Cheng Jie, Ma Yi, Zhang Jingyu. Water-depth-zoning inversion based on the relationship between two-band radiance data and the depth-invariant index[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, 44: 101790.
- [11] Liceaga-Correa M A, Euan-Avila J I. Assessment of coral reef bathymetric mapping using visible Landsat Thematic Mapper data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(1): 3–14.
- [12] Lu Tianqi, Chen Shengbo, Tu Yuan, et al. Comparative study on coastal depth inversion based on multi-source remote sensing data[J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(2): 192–201.
- [13] Liu Yongming, Tang Danling, Deng Ruru, et al. An adaptive blended algorithm approach for deriving bathymetry from multispectral im-

- agery[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 14: 801–817.
- [14] 聂荣娟. 基于Worldview3数据的浅海水深反演研究[J]. *北京测绘*, 2019, 33(9): 1081–1086.  
Nie Rongjuan. Deep seawater inversion based on Worldview3 data[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2019, 33(9): 1081–1086.
- [15] 王燕红, 陈义兰, 周兴华, 等. 基于多项式回归模型的岛礁遥感浅海水深反演[J]. *海洋学报*, 2018, 40(3): 121–128.  
Wang Yanhong, Chen Yilan, Zhou Xinghua, et al. Research on reef bathymetry using remote sensing based on polynomial regression model[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(3): 121–128.
- [16] 韩中含, 徐白山, 杨成林, 等. 基于Planet多光谱影像的南海岛礁水深反演研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(12): 139–142,146.  
Han Zhonghan, Xu Baishan, Yang Chenglin, et al. Research on reef depth retrieval of South China Sea island based on Planet multispectral image[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(12): 139–142,146.
- [17] Casal G, Hedley J D, Monteys X, et al. Satellite-derived bathymetry in optically complex waters using a model inversion approach and Sentinel-2 data[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 241: 106814.
- [18] 陈本清, 杨燕明, 罗凯. 基于高分一号卫星多光谱数据的岛礁周边浅海水深遥感反演[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(2): 70–78.  
Chen Benqing, Yang Yanming, Luo Kai. Retrieval of island shallow water depth from the GaoFen-1 multi-spectral imagery[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(2): 70–78.
- [19] Xia Haoyang, Li Xiaorun, Zhang Huaguo, et al. A bathymetry mapping approach combining log-ratio and semianalytical models using four-band multispectral imagery without ground data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(4): 2695–2709.
- [20] 冯英辞, 詹文欢, 姚衍桃, 等. 西沙群岛礁区的地质构造及其活动性分析[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(3): 48–53.  
Feng Yingci, Zhan Wenhuan, Yao Yantao, et al. Analysis of tectonic movement and activity in the organic reef region around the Xisha Islands[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(3): 48–53.
- [21] 陈玲, 陈理, 李伟, 等. 基于FLAASH模型的Worldview3大气校正[J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(4): 26–31.  
Chen Ling, Chen Li, Li Wei, et al. Atmospheric correction of Worldview3 image based on FLAASH model[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2019, 31(4): 26–31.
- [22] 陆天启, 陈圣波, 郭甜甜, 等. 基于SPOT-6遥感影像的近海水深反演[J]. *海洋学研究*, 2016, 34(3): 51–56.  
Lu Tianqi, Chen Shengbo, Guo Tiantian, et al. Offshore bathymetry retrieval from SPOT-6 image[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2016, 34(3): 51–56.
- [23] 赵洪臣. 基于WorldView-2的多级决策的光学遥感水深反演方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.  
Zhao Hongchen. Water depth inversion method of optical remote sensing using multilevel decision-making scheme based on WorldView-2[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [24] 潘昀, 程永舟, 李青峰, 等. 破碎波作用下沙坝附近悬浮泥沙浓度试验研究[J]. *人民长江*, 2013, 44(21): 71–75.  
Pan Yun, Cheng Yongzhou, Li Qingfeng, et al. Experimental study on suspended sediment concentration near sand bars under action of breaking waves[J]. *Yangtze River*, 2013, 44(21): 71–75.

## Comparative study on shallow water depth inversion based on GeoEye-1 and WorldView-2 remote sensing data

Lu Tianqi<sup>1,2,3</sup>, Wu Zhifang<sup>4</sup>, Ren Xiaosa<sup>5</sup>, Yao Huimin<sup>1,2,3</sup>, Shao Changgao<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 2. Sanya Institute of South China Sea Geology, Guangzhou Marine Geological Survey, Sanya 572025, China; 3. Academy of South China Sea Geological Science, China Geological Survey, Sanya 572025, China; 4. College of Information Science and Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 5. Piesat Information Technology Company Limited, Beijing 100195, China)

**Abstract:** Accurate inversion of shallow water depth is essential for marine space management and ecological environment protection. Lingyang Reef of Xisha Islands in the South China Sea is taken as a typical study area. The single-band model, multi-band model and band-ratio model are established based on GeoEye-1 and WorldView-2 high-resolution multi-spectral remote sensing data and measured points. The results show that the correlation of the inversion model established with the participation of green band is generally high, while the multi-band model established by four bands combination has the highest accuracy and the correlation coefficient reaches 0.870 and

0.853, respectively. Comparing with the inversion accuracy of GeoEye-1 and WorldView-2 data in different depth ranges based on the above model, the conclusion is that the inversion errors of the two kinds of data in different depth ranges have the same trend, with the maximum value of the average relative errors occurring in the range of 0–5 m and the minimum value occurring in the range of 20–25 m. In general, the inversion accuracy of WorldView-2 image is higher than that of GeoEye-1 image. This study has a certain reference significance for the inversion of water depth in shallow tropical sea.

**Key words:** shallow water depth; multispectral remote sensing; model; quantitative inversion; accuracy comparison