

王燕茹, 张利勇, 刘文, 等. 基于高空间分辨率遥感影像的水深反演有效性评估[J]. 海洋学报, 2023, 45(3): 136–146, doi:10.12284/hyxb2023026

Wang Yanru, Zhang Liyong, Liu Wen, et al. Evaluation of validity of bathymetry retrieval data based on high-spatial resolution remote sensing image[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(3): 136–146, doi:10.12284/hyxb2023026

# 基于高空间分辨率遥感影像的水深反演有效性评估

王燕茹<sup>1</sup>, 张利勇<sup>1</sup>, 刘文<sup>1</sup>, 张凯<sup>1,2\*</sup>, 王鑫<sup>1,3</sup>

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590; 2. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 3. 广州三海海洋工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510220)

**摘要:** 卫星遥感反演水深 (Satellite Derived Bathymetry, SDB) 是获取浅海水深信息的有效手段。然而, 其有效范围只限于光学浅水区域, 在深水区域呈现“伪浅海”的失真现象。因此, 如何准确识别 SDB 数据的有效范围对其广泛应用至关重要。本文基于高空间分辨率多光谱卫星影像, 在深入分析深/浅水辐射亮度统计分布特征差异的基础上, 提出一种数据驱动的水深反演有效性评价方法。该方法以卫星影像辐射亮度信息的局域标准差作为特征, 基于 K-S 检验方法对光学深水区域统计特征进行模型优选, 并使用假设检验方法对深水无效区域对应的 SDB 进行识别。甘泉岛水域实验结果表明, 该方法通过统计分布划分光学浅水与深水区域边界, 可以有效识别光学深水区域产生的无效水深反演数据。在剔除无效区域数据后, 光学浅水有效区域内水深反演平均绝对误差 (MAE) 为 1.01, 均方根误差 (RMSE) 为 1.52。实验结果表明, 本文提出的方法可准确识别 SDB 结果的有效区域, 进而为浅海地形解译提供方法支撑。

**关键词:** 水深反演; 数据有效性; 伪浅海; 光学浅水区域

中图分类号: TP79

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)03-0136-11

## 1 引言

浅海水深数据对航海线路的选择、近岸海洋工程建设和海岸带生态研究具有重要意义<sup>[1]</sup>。目前, 浅海区域的现场水深测量主要依靠船载声呐测量与机载激光雷达测深两种手段<sup>[2-5]</sup>。船载声呐是准确获取水深信息的主流方法, 但在浅水区域测量效率有限, 且有航行安全隐患。机载激光雷达测深可高效获取浅海水深信息, 但存在测量成本高以及空域限制等问题。因此, 浅海水深信息的高效获取一直是海洋测绘领域的重要研究课题。限于现场测量方法效率上的不足, 在我国长达  $3.2 \times 10^4$  km 的海岸线上, 仍然存在大量空白区域尚未进行水深测量。对此, 基于多光谱卫星影像的遥感水深反演方法, 可以高效获取水质清澈的近岸水域水深信息。卫星遥感反演水深 (Satel-

lite Derived Bathymetry, SDB) 可获取高现势性的近岸水深信息, 有效提升浅海水深数据的时空覆盖范围, 是现场测量的重要补充手段<sup>[6]</sup>。

光学遥感水深反演方法始于 20 世纪 60 年代。随着多光谱遥感卫星技术的不断发展, 多光谱卫星影像数据的时空覆盖范围显著增加, 该方法逐渐成为研究热点<sup>[7]</sup>。水深反演模型主要包括理论解译模型、半理论半经验模型和统计相关模型<sup>[8-9]</sup>。理论解译模型基于水光场辐射传输方程, 通过测量水体内部的光学参数来计算水体深度<sup>[7, 10-13]</sup>。此类模型理论严密, 但所需水体光学参数较多且获取困难, 使得模型构造过于复杂, 因而难以得到广泛应用。半理论半经验模型基于光在水体中的辐射衰减特性, 采用理论模型与经验参数相结合的方式实现水深反演, 目前已经形成了如单波段模型、双波段模型和多波段模型等多种解算

收稿日期: 2022-05-10; 修订日期: 2022-08-25。

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2020MD084); 山东科技大学科研创新团队支持计划(2019TDJH103)。

作者简介: 王燕茹(1998—), 女, 山东省济南市人, 主要从事海洋水深反演研究。E-mail: 920635744@qq.com

\* 通信作者: 张凯(1983—), 男, 副教授, 主要从事海洋测绘相关研究。E-mail: zk0773@163.com

方法<sup>[14-22]</sup>。其中, Stumpf 对数比值模型<sup>[23]</sup> 因其模型构造简单, 物理机制清晰而被广泛应用。统计相关模型是通过建立遥感图像光谱值和实测水深值之间的相关关系而获得水深数据的模式<sup>[24-26]</sup>, 此类模型高度依赖实测水深数据量的多少, 当训练样本充足时, 往往可以获得较好的水深反演结果。

经过几十年探索, 卫星遥感水深反演算法的模型结构不断优化, 其精度亦显著提高。然而, 在聚焦水深反演精度提升的同时, 现有研究对其结果的有效性评估却鲜有关注。限于可见光对海水的穿透能力有限, 水深反演结果只能适用于有限的近岸浅水区域, 其具体范围取决于天气、水质和海底光反射率等因素的综合影响, 目前尚无模型可以有效描述。而在深水区域, 水深反演结果严重失真, 并呈现“伪浅海”的假象, 严重误导水深反演结果解译。因此, 如何准确识别浅水有效区域和深水无效区域的边界, 对反演结果的有效应用来说, 是一个亟待解决的重要问题。然而, 针对这一问题, 目前国内外对此进行的相关研究非常有限。其中, Lee 等<sup>[27]</sup> 借助 ICESat-2 卫星测深数据辅助, 提出了一种针对高分辨率多光谱卫星反演结果的可靠性评估方法。然而, 该方法依赖于 ICESat-2 卫星测深数据对水深反演区域的覆盖, 从而限制了

其广泛应用。因此, 有必要从多光谱影像数据本身出发, 在不借助额外辅助信息的前提下, 研究卫星遥感水深反演有效性评估方法。

针对上述问题, 本文聚焦于高空间分辨率多光谱遥感影像中光学浅水/深水区域的辐射亮度统计分布特征差异, 研究以高分辨率多光谱影像和少量实测水深真值数据驱动的卫星遥感反演水深有效性评估方法。

## 2 实验区域与数据源

### 2.1 研究区域概况

本文研究区域为甘泉岛周边水域。甘泉岛位于南海西沙群岛永乐环礁的西部(图1), 总面积约为 0.3 km<sup>2</sup>, 呈椭圆形。该岛为典型的珊瑚岛, 岛屿周围为珊瑚礁盘地貌, 海底地形复杂, 且距离大陆较远, 使用传统方法进行水深测量较为困难。但南海海域水质洁净, 非常适合进行多光谱遥感水深反演研究。

### 2.2 数据源

实验所采用的遥感影像数据为 GeoEye-1 高空间多光谱遥感影像(图2a), 拍摄于 2013 年 2 月 18 日, 基于 WGS-84 坐标系、通用横轴墨卡托投影, 空间分辨率为 2 m, 包含蓝、绿、红以及近红外 4 个波段。该多光谱影像数据是以无云层遮盖为标准, 在良好的天

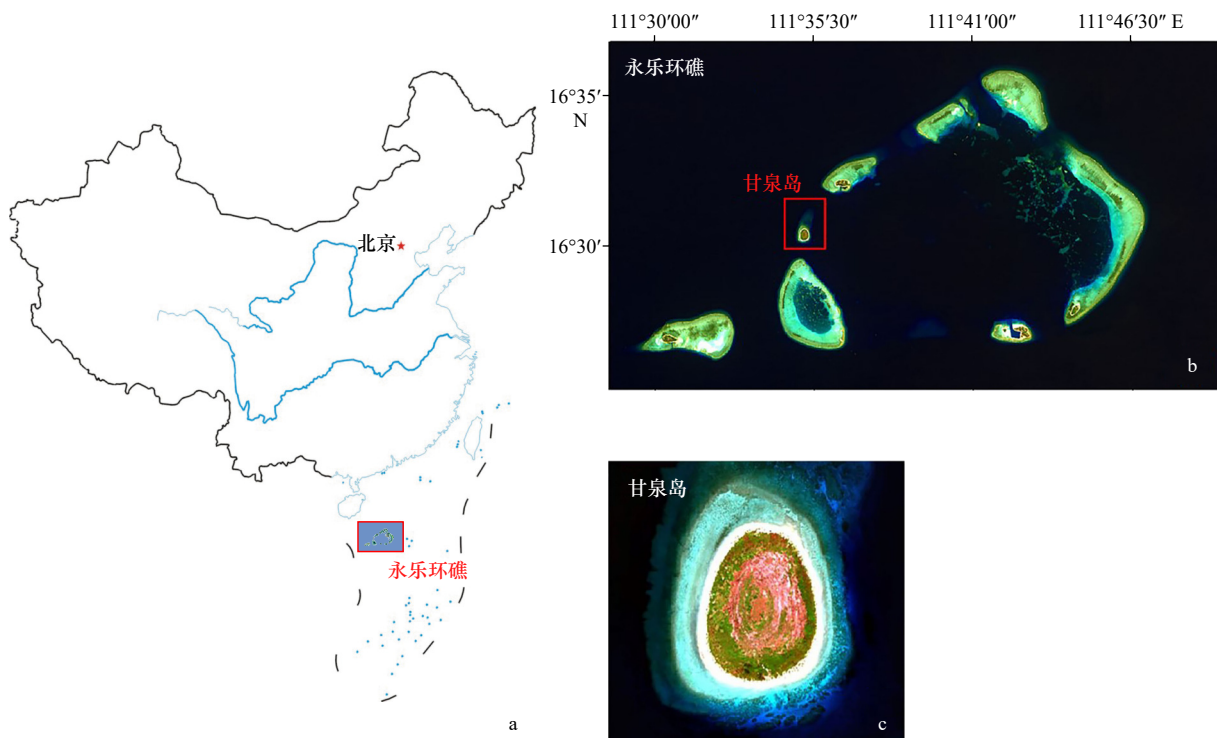


图1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the study area

a. 永乐环礁地理位置<sup>①</sup>; b. 永乐环礁卫星影像; c. 甘泉岛卫星影像

a. Location of the Yongle Atoll; b. satellite image of Yongle Atoll; c. satellite image of Ganquan Island

① a 图审图号为 GS(2016)1585 号。

气情况下采集的。实测水深数据(图 2b)为 2013 年 1 月的激光雷达测深数据与 2016 年 5 月多波束测深数据合成产品。其中浅水区域为激光雷达测深数据,该数据是由机载 Optech Aquarius 测深系统获取, POS AV 510 导航系统用于提供 1.5~3 m 的水平位置精

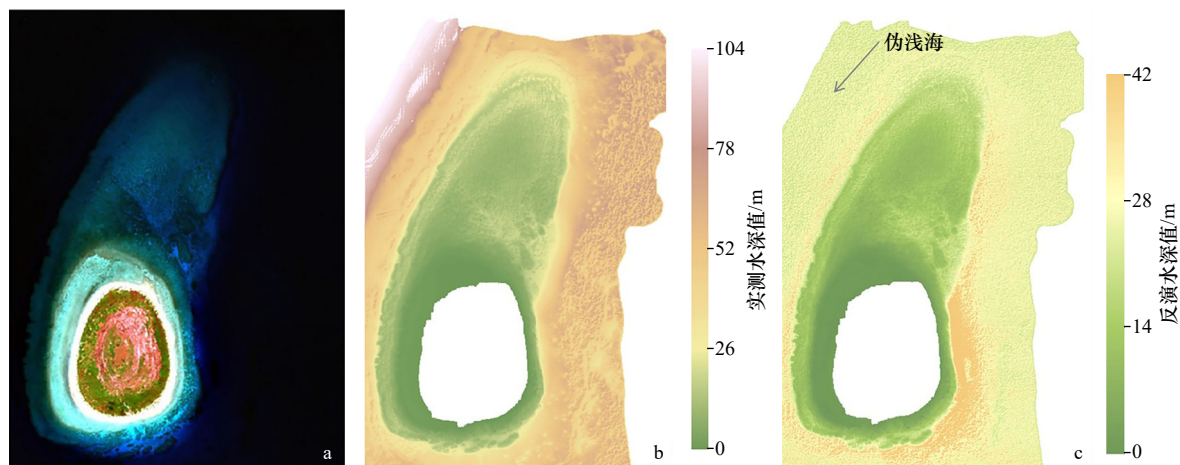


图 2 GeoEye-1 遥感影像(a)、实测水深数据(b)和 Stumpf 模型反演水深(c)

Fig. 2 GeoEye-1 sensing image (a), *in-situ* bathymetry data (b) and satellite derived bathymetry based on Stumpf model (c)

### 2.3 数据预处理

研究表明,当海面受风浪影响时,太阳光会在粗糙海面发生菲涅尔反射,遥感图像相应地产生白色耀斑,严重影响影像质量。因此在 GeoEye-1 影像利用辐射定标与大气校正得到真实水体辐射率后,需要通过 Hedley 等<sup>[28]</sup>的方法消除太阳耀斑。随后,将实测水深数据转换到与遥感影像相同坐标系下,进行地理配准,以确保水深点与同一位置像元值相对应。除此之外,由于遥感影像中包括的水深信息为卫星过境时摄取的瞬时海面深度,实测水深是以理论深度基准面为基准的稳态水深,而水深反演是通过将二者拟合进行建模,所获得的反演结果将自动归算到实测水深的基准上。

从方法的普适性角度出发,本文基于广泛应用的 Stumpf 模型(式(1))对甘泉岛多光谱影像进行水深反演。

$$d = \beta_0 + \beta_1 \times \frac{\ln[t \times R_w(\lambda_b)]}{\ln[t \times R_w(\lambda_g)]} = \beta_0 + \beta_1 \times x, \quad (1)$$

式中,  $d$  为反演水深;  $\beta_0$  和  $\beta_1$  为待拟合系数;  $t$  为缩放比例因子;  $R_w(\lambda_b)$  和  $R_w(\lambda_g)$  分别为蓝、绿波段辐射率;  $\lambda_b$  和  $\lambda_g$  分别为未进行预处理之前的蓝、绿波长。

为保证浅水有效区域数据反演的准确性,选取 2 281 个实测水深点,其中 435 个作为训练数据用于拟合回归模型参数,剩下的 1 846 个水深点作为验证数据进行模型精度检验,最终拟合系数分别为 -7.67 和 80.04。实验所得决定系数  $R^2$  为 0.89,均方根误差为 1.07。利用所得模型参数得到实验区域的水深反演结果(图 2c)。通过对比真值水深数据可以看出,卫星水深反演结果的有效范围主要分布于近岸浅水

度,后经波形提取、滤波、人工剔除异常点等操作后得到的点云数据集。对于激光信号难以穿透的深水区域,水下地形由多波束测深系统进行测量。由机载激光测深和多波束测深数据组成的真值水深数据集,在经过潮汐改正后,其误差小于实际水深的 1%。

区域,而在深水无效区域则呈现“伪浅海”假象。

## 3 方法

### 3.1 水深反演无效区域产生机理

在水深光学遥感(图 3)中,卫星传感器接收到的光辐射信号主要包括大气辐射信息、水体辐射信息和可能存在的水底反射信息,其中水底反射光信息是水下地形反射可见光所产生的回波信号,是遥感水深

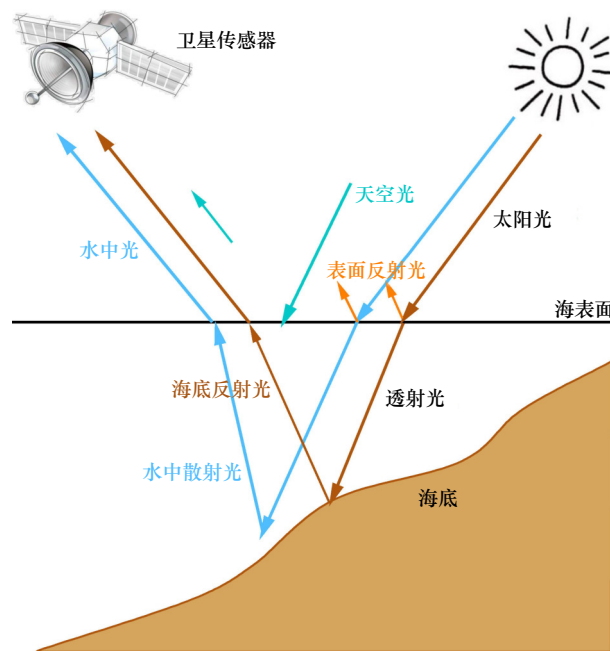


图 3 水深光学遥感示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optical bathymetry remote sensing

反演的物理基础<sup>[29]</sup>。卫星水深反演过程中,可见光在深/浅水区域传输路径上存在差异性。对于光学深水区域来说,由于太阳辐射在传输过程中,水体对其的吸收与散射导致太阳辐射难以穿过水体到达水底,所以光学深水区域辐亮度信息由海水的散射和反射成分贡献,仅受海水本身光学性质影响<sup>[30]</sup>。而在浅水区域中,海底受到阳光有效照射后会产生强反射。由于浅海区域复杂地形以及底质分布的影响,导致该区域辐亮度数据复杂多变。

相较于浅水区域海底产生的复杂强反射,光学深水区域的辐亮度值普遍偏低,并由于其本身光学特征较稳定,辐亮度值波动较小,并具有比较单一的统计分布特征。基于该差异,卫星影像蓝绿波段的辐亮度统计量[均值、标准差(Standard Deviation, STD)]是光学深/浅水区域的潜在有效识别特征。对此,本文的研究思路从实际数据的局域统计量入手,寻找光学

浅水与深水区域在特征空间中的准确边界,通过探索弱信号区域的数据统计分布规律,提取光学深水区域。基于遥感影像的局域均值与局域标准差的统计分布如图4所示,从图中可以看出,相比于局域均值来说,局域标准差在光学深/浅水区域的统计区分度更加显著。因此,本文以蓝、绿波段辐亮度值的局域标准差统计量作为主要特征,研究光学深/浅水区域的划分方法。

### 3.2 基于局域辐亮度的信息参数化

为划分水深反演的有效浅水区域和无效深水区域,本文使用局域滑动子窗计算不同区域的标准差表征局域辐亮度统计特性<sup>[31]</sup>。在每个局域子窗中,标准差通过如下公式计算:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{ki} - x_{\text{mean}})(x_{ki} - x_{\text{mean}})}{N}}, \quad (2)$$

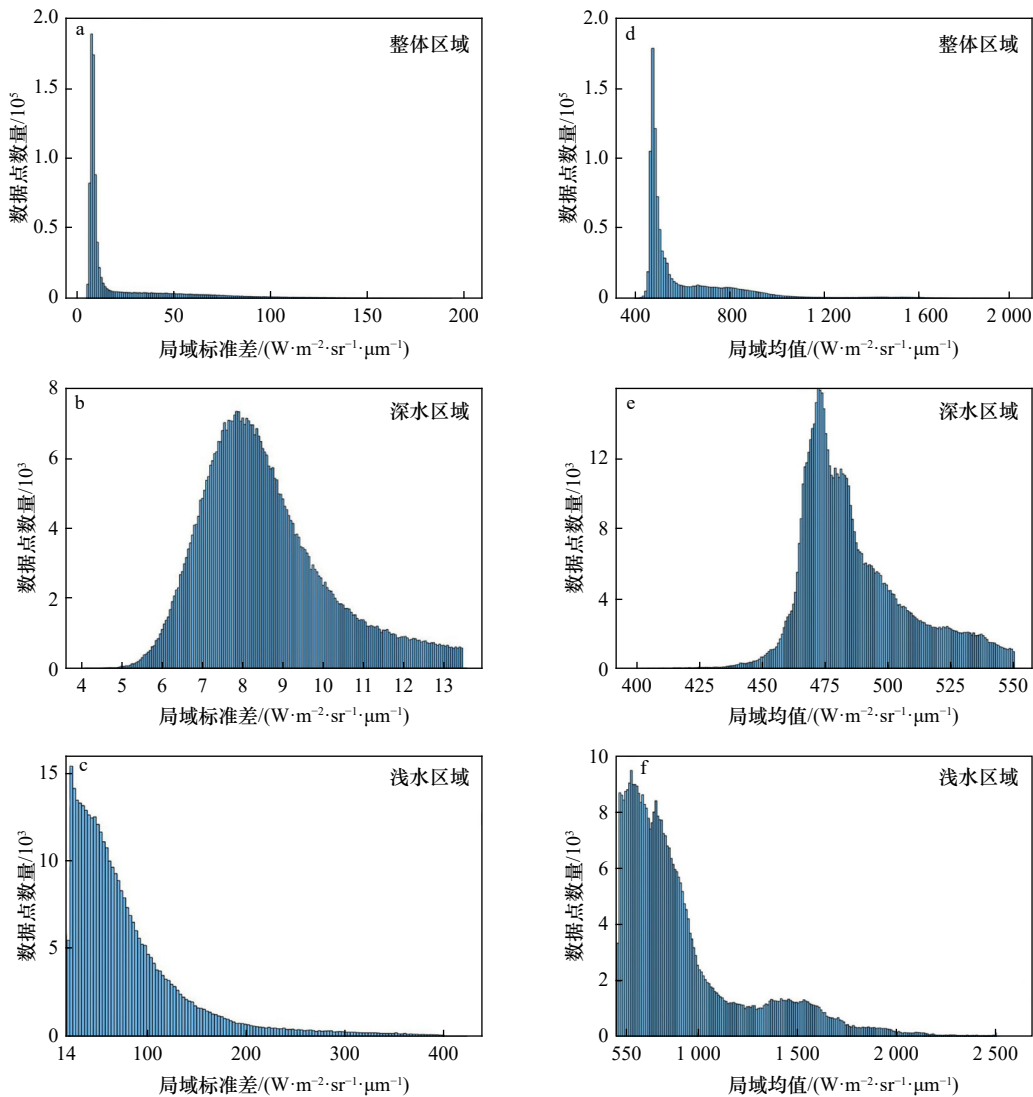


图4 光学深/浅水区域辐亮度统计分布特征图

Fig. 4 Statistical distribution map of radiance in the optical shallow/deep water region

式中,  $\sigma_k$  为第  $k$  个窗口的标准差;  $x_{ki}$  是第  $k$  个窗口中第  $i$  个辐亮度值;  $x_{\text{mean}} = \sum_{i=1}^n x_i/n$  是局域子窗中辐亮度的平均值。

### 3.3 光学深水区域统计分布检验

宏观角度而言, 光学深水区域的光辐射受水体水质影响, 将产生明显的时空变化特征。在典型的卫星水深反演场景中, 区域范围的有限性使得深水区域的水质趋近于均质, 故其统计分布特性可以用单一分布进行近似。因此, 如果可以从现象角度对深水区域的辐亮度统计分布进行拟合, 将可以基于统计假设检验原理对光学深水区域进行识别。对此, 在有效提取其统计分布特征的前提下, 可用于深水区域的划分。本研究使用 K-S 检验 (Kolmogorov-Smirnov Test)<sup>[32]</sup> 来确定深水区域统计分布特征。

K-S 检验作为一种针对连续分布的非参数检验方法, 通过比较数据的实际频数分布与特定理论分布

间的最大差距距离  $D_N$ , 判断实际频数分布是否服从特定理论分布。

假设样本数据  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$  符合理论分布  $F(x)$ , 经验分布函数  $S(x)$  为

$$S(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{\{x_i \leq x\}} = \begin{cases} 0, & x < x_1, \\ \frac{k}{n}, & x_k \leq x < x_{k+1}, k = 1, 2, \dots, N-1, \\ 1, & x \geq x_N, \end{cases} \quad (3)$$

则最大偏差  $D_N$  的计算方法为

$$D_N = \max |S(x) - F(x)|, \quad (4)$$

$D_N$  值越小, 表示拟合效果越好, 样本数据越接近理论分布函数。

本文选用 5 种常用统计分布作为深水区域所对应的理论分布  $F(x)$  的候选, 通过极大似然法估计模型参数后, 利用 K-S 检验与实际数据选取最相符的候选统计分布。所选用的 5 种常见统计分布及其概率密度函数如表 1 所示, 其中  $\lambda, \nu$  为模型参数。

表 1 5 种候选统计分布的概率密度函数及标准差求解公式

Table 1 Probability density functions and standard deviation computation formula of five candidate statistical distributions

| 分布函数   | 瑞利分布                                  | 韦伯尔分布   | 正态分布   | 伽马分布   | 对数正态分布  |
|--------|---------------------------------------|---|--|--|---|
| 概率密度函数 | $\frac{x}{v^2} e^{-\frac{x^2}{2v^2}}$ | $\frac{\sigma}{\lambda} x^{\nu-1} e^{-\frac{x^\nu}{\lambda}}$ | $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ | $\frac{\lambda^\nu x^{\nu-1}}{\Gamma(\nu)} e^{-\lambda x}$ | $\frac{1}{\sqrt{2\pi}x\nu} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\nu^2}}$ |
| 标准差    | $\sqrt{4 - \pi/2}v$                   | $\lambda^{\frac{1}{\nu}}$                                     | $1.4826 \times \text{MAD}(x_i)$                                | $\frac{1}{\lambda} \sqrt{\nu}$                             | $1.4826 \times \text{MAD}(\ln x_i)$                             |

注: MAD 为中位数的绝对偏差。

### 3.4 基于分割阈值进行深水区域识别

确定深水区域的统计分布后, 基于其模型参数估计值, 在假设检验的统计框架下, 设置光学深/浅水区域的划分阈值。为保证可以大限度地获取光学深水区域所对应的标准差值  $t$ , 本研究基于  $4\sigma$  进行阈值划定, 公式如下:

$$t_i = \{i \in D_k : t_i < t_{\text{dep}} = \mu_i + 4\sigma_i\}, \quad (5)$$

式中,  $D_k$  为第  $k$  个局域子窗;  $t_i$  为光学深水区域局域标准差值;  $t_{\text{dep}}$  为光学深水区域范围最大阈值;  $\mu_i$  与  $\sigma_i$  分别为  $t_i$  的均值与标准差。

标准差  $\sigma_i$  求解公式是在模型参数  $\lambda, \nu$  的基础之上获得的, 其中,  $\text{median}(\cdot)$  为中值求解公式,  $\text{MAD}(\cdot)$  为中位数绝对偏差, 公式为

$$\text{MAD}(\cdot) = \text{median}(|x_i - \text{median}(x_i)|). \quad (6)$$

### 3.5 研究方法概述

通过上述步骤, 可以对单一波段辐亮度数据所对应的光学深/浅水区域范围进行划分。使用水深反演过程中的所有波段数据 (本文中为蓝、绿波段) 求其光学深水区域, 并对不同波段技术结果进行空间并集求解, 即可得到最终的水深反演有效区域。本文提出

方法的整体流程如图 5 所示。

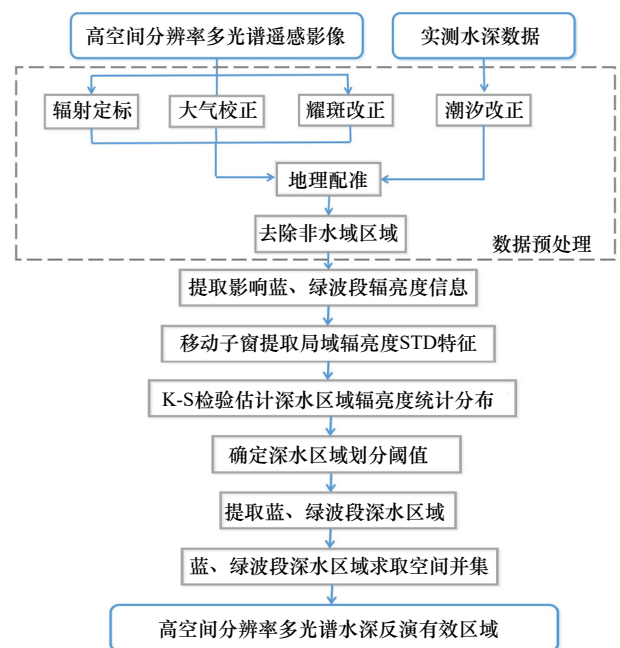


图 5 算法整体流程图

Fig. 5 The flow chart of the proposed algorithm

## 4 实验结果分析

首先,从影像波段数据的局域统计量出发,计算光学深/浅水区域的统计分布特征差异。为此,将影像蓝、绿波段剔除掉非水域区域后,使用尺寸为 $7\times 7$ 的局域滑动子窗,利用公式(2),求取辐亮度标准差(图6c,图6d)。在标准差特征图中,浅水有效区域与深水无效区域的辐亮度特征差异得以凸显,并能直观观察到两者之间存在明显的边界区域。

对蓝、绿波段的局域标准差特征进行直方图分析(图7),可进一步凸显光学深水区和浅水区域的辐亮度统计特征差异。光学深水区域对应于弱辐亮度标准差,其分布呈现出较为规则的单峰分布特征。相反,光学浅水区域的辐亮度标准差呈现出强烈的局域随机波动,且无明显分布规律特征。这一显著统计特征差异,可以作为深水区域划分的依据。

表2给出了K-S检验的拟合优度检验结果。5种候选分布中,对数正态分布的最大偏差值 $D_N$ 最

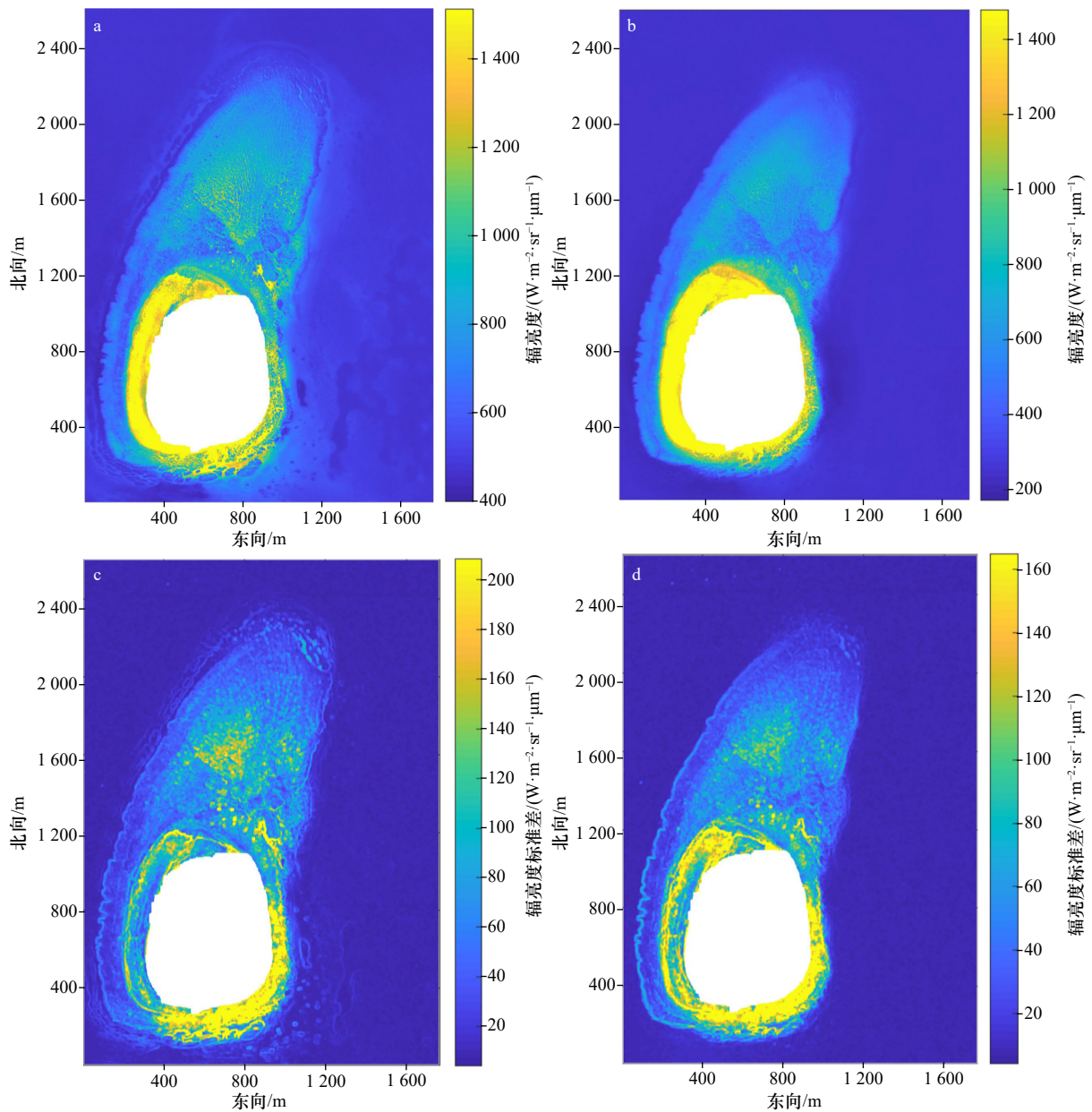


图6 蓝、绿波段辐亮度数据及对应标准差特征分布

Fig. 6 Radiance data of blue/green bands and distribution of associated standard deviation features

- a. 蓝波段辐亮度; b. 绿波段辐亮度; c. 蓝波段辐亮度标准差特征分布; d. 绿波段辐亮度标准差特征分布  
 a. Radiance of blue band; b. radiance of green band; c. distribution of radiance standard deviation feature of blue band;  
 d. distribution of radiance standard deviation feature of green band

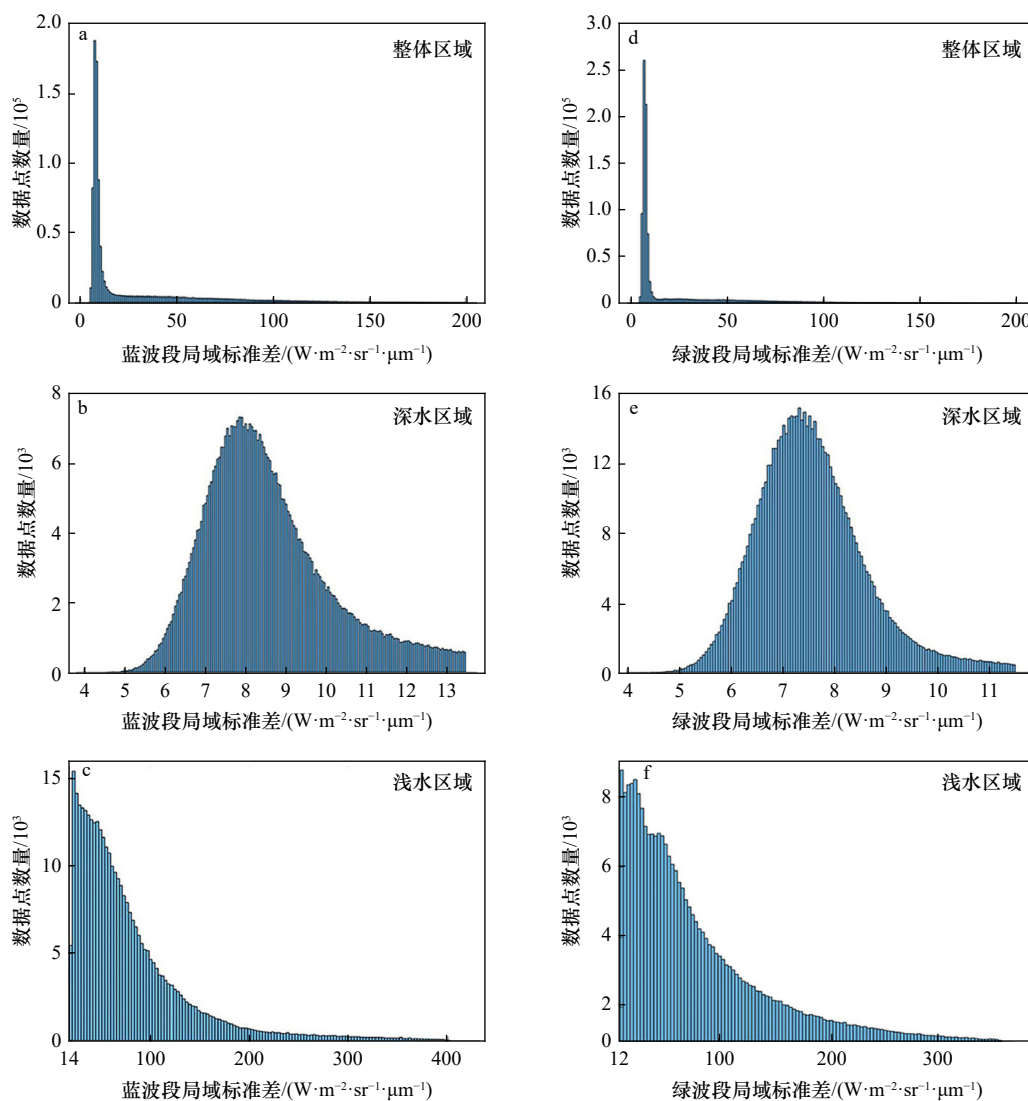


图 7 辐亮度标准差统计分布

Fig. 7 Radiance standard deviation statistical distribution

表 2 K-S 检验的拟合优度检验结果

Table 2 Test results of the goodness of fit of K-S test

| 分布函数 | 瑞利分布 | 韦伯尔分布 | 正态分布 | 伽马分布 | 对数正态分布 |
|------|------|-------|------|------|--------|
| 蓝波段  | 0.32 | 0.11  | 0.08 | 0.06 | 0.04   |
| 绿波段  | 0.42 | 0.10  | 0.06 | 0.04 | 0.03   |

注: 表中数据为最大偏差值, 数值越小, 拟合效果越好。

小。这表明无论蓝波段或绿波段, 深水区域的辐亮度统计特征都趋近于对数正态分布, 统计分布的“拖尾”现象较为显著。为尽量减小深水区域识别误差引入的水深反演系统偏差, 本文基于  $4\sigma$  准则(公式(5))进行不同波段的深/浅水区域统计阈值划分(图 8a, 图 8c)。对比蓝绿波段数据可以看出, 深水区域内蓝波段“拖尾”现象相比绿波段更加明显, 导致该波段信号中深/

浅水区域在特征空间中的边界相对模糊。这一特征具体体现在深/浅水区域划分结果(图 8b, 图 8d)中, 其表现为区域边界相对不规则, 呈现出较为显著的噪点效果。

通过对蓝、绿波段数据中划定的单一光学深水区域进行逻辑求并集计算后, 得到两波段确定的水深反演无效区域, 也即为最终的卫星遥感水深反演有效区域。所得有效区域内的实测水深值分布(图 9a)基本在 27.9 m 以下, 仅在边缘区域存在较大数据, 最大值为 37.3 m。图 9b 为浅水有效区域内水深反演误差分布情况, 水深反演的平均绝对误差为 1.01, 均方根误差为 1.52。

为进一步验证算法的效果, 提取深/浅水区域边界的水深反演结果进行分析。如图 10a 所示, 边缘区域的实测水深值占比 95% 以上的区间范围为 17.8~

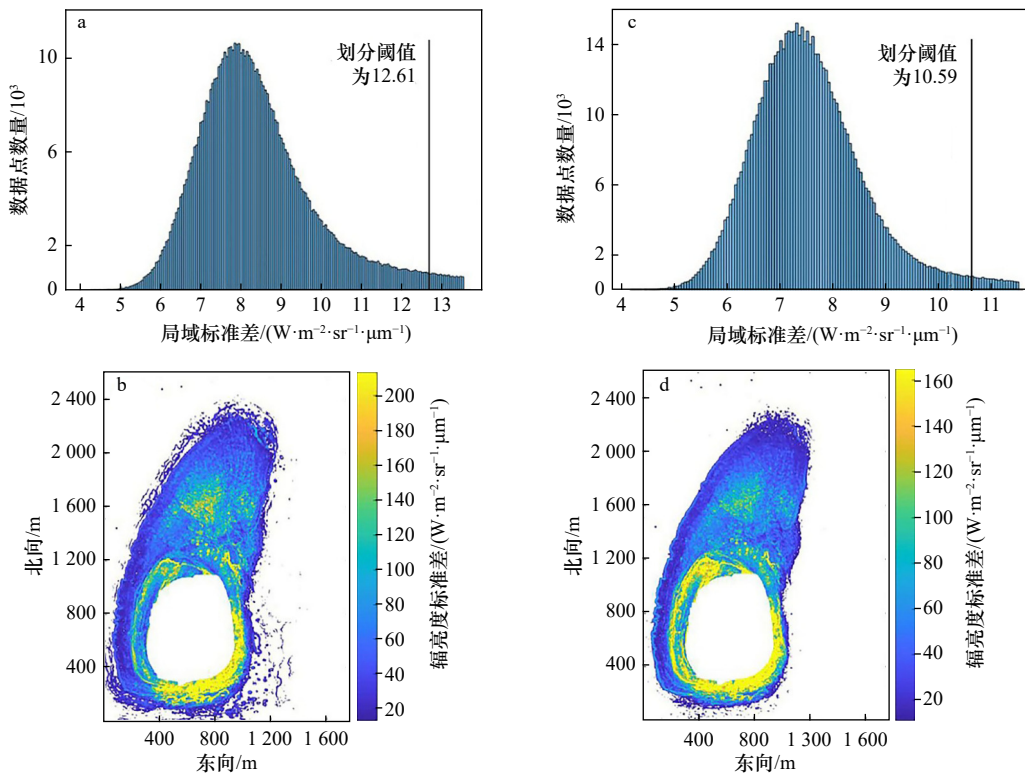


图 8 不同波段深/浅水区域划分阈值及划定的光学深水区域

Fig. 8 Different waveband deep/shallow water region division thresholds and delineated optical deep water regions

a. 蓝波段划分阈值; b. 蓝波段确定深水区域; c. 绿波段划分阈值; d. 绿波段确定深水区域

a. Blue band division threshold; b. blue band to determine deep water area; c. green band division threshold; d. green band to determine deep water area

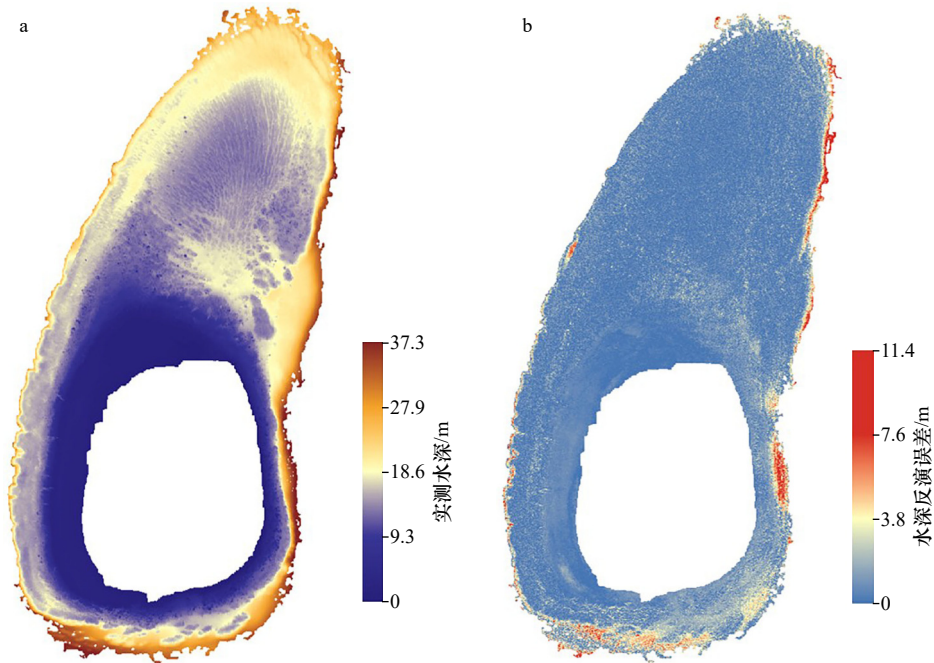


图 9 卫星遥感反演水深有效区域内信息分布

Fig. 9 Information distribution in the effective area of satellite derived bathymetry

35.2 m, 此范围内的水深值可近似代表有效区域的整体边界水深信息。图 10b 为水深反演结果误差随水

深变化的趋势。从图中可以看出, 水深反演误差与实际水深之间具有显著的统计相关性。图 10b 中的深/

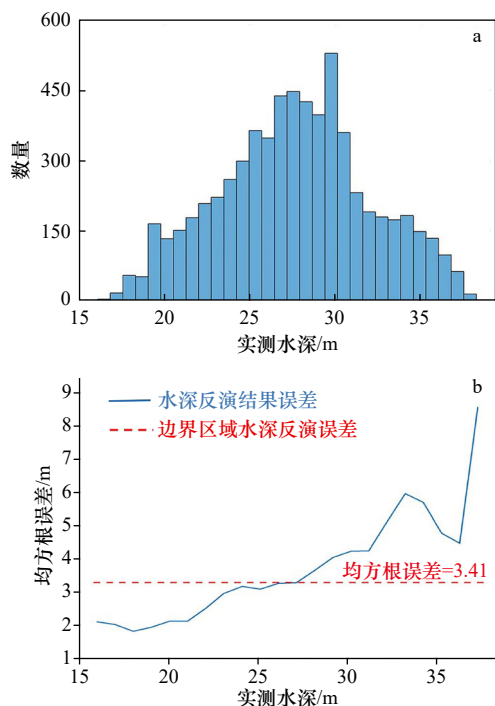


图 10 边界区域统计信息

Fig. 10 Statistics information about the boundary area

浅水边界区域的整体均方根误差为 3.41, 从统计角度较为有效地识别了光学深水区域的“伪浅海”假象, 保障了水深反演结果的准确性。

## 5 讨论与结论

卫星遥感水深反演的有效范围只限于光学浅水区域, 如何准确评估水深反演结果的有效适用范围是其广泛应用所亟待解决的重要问题。对此, 本研究聚焦于光学深/浅水区域的辐射亮度统计分布特征差异, 提出了一种数据驱动的水深反演有效性评估方法。基于在甘泉岛水域的实验结果, 得出以下结论:

(1) 由于回波信号产生机理的显著差异, 影像辐射亮度值的统计特征在深/浅水区域内具有显著差别。在水体水质与底质的共同作用下, 浅水区域反射率高, 且其统计分布极不规则, 难以用单一统计分布模型加以表征。相比之下, 深水区域由于其光学性质相对稳定, 辐射亮度值偏小, 且其统计分布呈现出显著的单峰分布特征。因此, 从影像辐射亮度值的局域统计特征出发, 对光学深/浅水区域进行划分, 是一个合理的

选择。图 4 表明, 辐射亮度数据的局域标准差参量在深/浅水区域具有显著差别, 可作为水深反演光学深水区域识别的有效统计指标。

(2) 在获取数据局域统计量的过程中, 局域子窗的尺寸大小对计算结果有影响, 其选择需考虑两方面因素。随着子窗尺寸增大, 参与计算的数据量增加, 在一定程度上可抑制高频噪声干扰, 但统计结果的分辨率将随之降低。本文将窗口尺寸设置为  $7 \times 7$ , 兼顾了高频噪声干扰的抑制。结果表明, 该设置一定程度上抑制了光学深/浅水区域边界中的“噪点”现象。而对于低信噪比卫星影像中显著的“噪点”假象干扰, 亦可考虑使用 DBSCAN 算法进行进一步剔除。

(3) 由于光学深水区域水体光学特征相对稳定, 产生的辐射亮度值具有规则的统计分布特征。有效估计其统计分布参数, 是准确识别光学深水区域的关键。实验表明, 使得直方图右侧产生光学深水区域的辐射亮度标准差具有显著的“拖尾”现象(图 7), 高斯分布难以准确表征其统计特性。因此, 使用 K-S 检验从数据本身出发, 选取最优统计模型, 以提高假设检验结果的准确性, 进而提取出光学深水区域。

(4) 实验结果表明, 基于影像蓝、绿波段辐射亮度值的局域标准差所得出的水深反演有效区域, 其内部水深反演的平均绝对误差为 1.01, 均方根误差为 1.52。通过进一步提取深/浅水区域边界的水深反演结果, 使得划分的水深反演有效性得到了明确的验证, 其精度基本与现有文献(平均绝对误差=0.988, 均方根误差=1.88)中基于大量实测水深先期划定提取范围后的反演精度处于同一水平<sup>[3]</sup>。

(5) 本文提出的方法以影像本身的光谱特征为依据, 对光学深/浅水区域进行划分, 进而确定卫星水深反演的有效区域。实验表明, 针对高空间分辨率卫星影像数据, 该方法可有效识别 SDB 数据中光学深水区域产生的“伪浅海”假象, 进而保障水深反演结果的有效性。而对于中低空间分辨率影像(如 Sentinel、Landsat), 限于其分辨率瓶颈, 辐射亮度值的局域统计特征模糊, 难以有效区分浅水与深水区域。因此, 未来的研究方向可尝试从多源信息融合的角度出发, 进一步探索可有效应用于中低空间分辨率影像的水深反演有效区域划分方法。

### 参考文献:

- [1] 苏奋振, 杜云艳, 裴相斌, 等. 中国数字海洋构建基准与关键技术[J]. 地球信息科学, 2006, 8(1): 12-15.  
Su Fenzhen, Du Yunyan, Pei Xiangbin, et al. Constructing digital sea of China with the datum of coastal line[J]. Geo-Information Science, 2006, 8(1): 12-15.

- [2] 赵建虎, 欧阳永忠, 王爱学. 海底地形测量技术现状及发展趋势[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1786–1794.  
Zhao Jianhu, Ouyang Yongzhong, Wang Aixue. Status and development tendency for seafloor terrain measurement technology[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1786–1794.
- [3] Zavalas R, Ierodiaconou D, Ryan D, et al. Habitat classification of temperate marine macroalgal communities using bathymetric LiDAR[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(3): 2154–2175.
- [4] Eren F, Pe'eri S, Rzhanov Y, et al. Bottom characterization by using airborne lidar bathymetry (ALB) waveform features obtained from bottom return residual analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 206: 260–274.
- [5] 杨必胜, 梁福逊, 黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1509–1516.  
Yang Bisheng, Liang Fuxun, Huang Ronggang. Progress, challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1509–1516.
- [6] Hodúl M, Bird S, Knudby A, et al. Satellite derived photogrammetric bathymetry[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 142: 268–277.
- [7] 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.
- [8] 王艳姣, 董文杰, 张培群, 等. 水深可见光遥感方法研究进展[J]. *海洋通报*, 2007, 26(5): 92–101.  
Wang Yanjiao, Dong Wenjie, Zhang Peiqun, et al. Progress in water depth mapping from visible remote sensing data[J]. *Marine Science Bulletin*, 2007, 26(5): 92–101.
- [9] 党福星, 丁谦. 多光谱浅海水深提取方法研究[J]. *国土资源遥感*, 2001(4): 53–58.  
Dang Fuxing, Ding Qian. A study of shallow water depth extraction using Landsat imagery[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2001(4): 53–58.
- [10] Lyzenga D R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(3): 379–383.
- [11] Lee Z, Carder K L, Steward R G, et al. Remote sensing reflectance and inherent optical properties of oceanic waters derived from above-water measurements[C]//Proceedings of SPIE 2963, Ocean Optics XIII. Halifax: SPIE, 1997: 160–166.
- [12] Lee Z, Carder K L, Mobley C D, et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(27): 6329–6338.
- [13] Li Jiran, Zhang Huaguo, Hou Pengfei, et al. Mapping the bathymetry of shallow coastal water using single-frame fine-resolution optical remote sensing imagery[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(1): 60–66.
- [14] Tanis F J, Byrne H J. Optimization of multispectral sensors for bathymetry applications[C]//Proceeding of 19th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan: Environmental Research Institute, 1985: 865–874.
- [15] Chen Benqing, Yang Yanming, Xu Dewei, et al. A dual band algorithm for shallow water depth retrieval from high spatial resolution imagery with no ground truth[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 151: 1–13.
- [16] 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.
- [17] Liu Yongming, Tang Danling, Deng Ruru, et al. An adaptive blended algorithm approach for deriving bathymetry from multispectral imagery[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 14: 801–817.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 陈琛, 马毅, 张靖宇. GF-1 WFV图像经验模分解的光谱保真性与水深遥感探测[J]. *海洋学报*, 2018, 40(4): 51–60.  
Chen Chen, Ma Yi, Zhang Jingyu. Spectral fidelity and water depth remote sensing detection of EMD of GF-1 WFV images[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(4): 51–60.
- [22] Gholamalifard M, Kutser T, Esmaili-Sari A, et al. Remotely sensed empirical modeling of bathymetry in the southeastern Caspian Sea[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(6): 2746–2762.
- [23] 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.
- [24] 张鹰, 张东, 王艳姣, 等. 含沙水体水深遥感方法的研究[J]. *海洋学报*, 2008, 30(1): 51–58.  
Zhang Ying, Zhang Dong, Wang Yanjiao, et al. Study of remote sensing-based bathymetric method in sand-containing water bodies[J]. *Haiyang Xuebao*, 2008, 30(1): 51–58.

- [25] Lyzenga D R. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1981, 2(1): 71–82.
- [26] 张鹰, 张芸, 张东, 等. 南黄海辐射沙脊群海域的水深遥感[J]. *海洋学报*, 2009, 31(3): 39–45.  
Zhang Ying, Zhang Yun, Zhang Dong, et al. An underwater bathymetry reversion in the radial sand ridge group region of the southern Huanghai Sea using the remote sensing technology[J]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(3): 39–45.
- [27] Lee Z, Shangguan M, Garcia R A, et al. Confidence measure of the shallow-water bathymetry map obtained through the fusion of Lidar and multiband image data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 2021: 9841804.
- [28] 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.
- [29] 邸凯昌, 丁谦, 陈薇, 等. 南沙群岛海域浅海水深提取及影像海图制作技术[J]. *国土资源遥感*, 1999, 41(3): 59–64.  
Di Kaichang, Ding Qian, Chen Wei, et al. Shallow water depth extraction and chart production from tm images in Nansha islands and nearby sea area[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1999, 41(3): 59–64.
- [30] 平仲良. 可见光遥感测深的数学模型[J]. *海洋与湖沼*, 1982, 13(3): 225–230.  
Ping Zhongliang. Mathematics model for visible remote sensing of water depth[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1982, 13(3): 225–230.
- [31] Brando V E, Dekker A G. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1378–1387.
- [32] Kvam P H, Vidakovic B. *Nonparametric Statistics with Applications to Science and Engineering*[M]. Wiley: Wiley InterScience, 2008.
- [33] Zhang K, Wang X, Wu Z, et al. Improving statistical uncertainty estimate of satellite-derived bathymetry by accounting for depth-dependent uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60(99): 1–9.

## Evaluation of validity of bathymetry retrieval data based on high-spatial resolution remote sensing image

Wang Yanru<sup>1</sup>, Zhang Liyong<sup>1</sup>, Liu Wen<sup>1</sup>, Zhang Kai<sup>1,2</sup>, Wang Xin<sup>1,3</sup>

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 3. Guangzhou Sanhai Marine Engineering Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510220, China)

**Abstract:** Satellite derived bathymetric using multispectral imagery is an effective means to obtain shallow water depth information. However, its validity is limited to optical shallow water areas, but presents a “pseudo-shallow sea” distortion phenomenon in deep water areas. Therefore, accurately identifying the valid region of satellite derived bathymetry (SDB) data is crucial for its wide application. Based on high-spatial resolution remote sensing image, a data-driven method for evaluating the validity of SDB based on analysis of the differences in the statistical distribution of radiance in deep/shallow water regions is proposed in this paper. This method uses the local standard deviation of the radiance information of satellite images as a feature, optimizes the statistical characteristics of the optical deep water area based on the K-S test method, and uses the hypothesis test method to identify the SDB corresponding to the deep water invalid area. The experimental results in Ganquan Island region show that the method can effectively identify the invalid SDB associated with the optical deep water area by dividing the boundary between optical shallow and deep water area. After removing the invalid data, the mean absolute error (MAE) of SDB in the optical shallow region is 1.01, and the root mean square error (RMSE) is 1.52. The experimental results show that the proposed method can accurately identify the optical shallow region of SDB result, which benefits the interpretation and application of SDB results.

**Key words:** bathymetric retrieval; data validity; pseudo-shallow sea; optical shallow water area