



谢甜, 郭金运, 姜笑, 等. 2026. 基于改进重力地质法的岛礁区海底地形反演. 地球物理学进展, 41(1):0104-0114, doi:10.6038/pg2026H0513.
XIE Tian, GUO JinYun, JIANG Xiao, et al. 2026. Seafloor topography inversion in island reef areas based on improved gravity-geology method. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(1):0104-0114, doi:10.6038/pg2026H0513.

基于改进重力地质法的岛礁区海底地形反演

Seafloor topography inversion in island reef areas based on improved gravity-geology method

谢甜¹, 郭金运^{1*}, 姜笑¹, 李真¹, 李辉²

XIE Tian¹, GUO JinYun^{1*}, JIANG Xiao¹, LI Zhen¹, LI Hui²

1. 山东科技大学测绘与空间信息学院, 青岛 266590

2. 西北工业大学航海学院, 西安 710072

1. School of Geomatics and Spatial Information, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

摘要 传统重力地质法 (Gravity-Geologic Method, GGM) 是一种结合船载测深与重力异常数据, 利用布格板公式恢复短波重力异常, 从而反演海底地形的方法. 为进一步提高 GGM 在海底地形反演中的精度, 本文设计了一种改进重力地质法 (Improved-Gravity-Geology Method, IGGM). 该方法引入布格板公式中的权重参数, 在顾及局部海底地形对控制点产生短波影响的情况下, 对控制点处的长波分量进行精细化建模. 采用改进重力地质法构建了南沙群岛附近岛礁区 (112°E—116°E, 8°N—12°N) 空间分辨率为 1' × 1' 的海底地形模型, 并利用美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration of the United States, NOAA) 提供的船载测深数据对其进行精度评定. 结果表明, IGGM 模型能够更精确地反映地形的细微变化. IGGM 模型与实测水深数据差异的标准差 (Standard Deviation, STD) 为 175.68 m, 相较于 GGM、SIO V25.1 和 SRTM15 + V2.0 模型分别降低了 7.01 m、20.67 m 和 19.68 m. 特别是在水深 ≤ 1000 m 复杂岛礁区域, 与 GGM 模型相比, IGGM 模型表现更优, 其与实测水深数据差异的标准差减小了 10.20 m. 这验证了改进后的重力地质法在反演精度上的有效提

Abstract The traditional Gravity-Geologic Method (GGM) is an approach that combines shipborne bathymetric data and marine gravity anomalies data to invert seafloor topography by resolving short-wavelength gravity anomalies using the Bouguer plate formula. To further enhance the accuracy of GGM in seafloor topography inversion, an Improved Gravity-Geologic Method (IGGM) has been developed in this paper. A weighting parameter was introduced into the Bouguer plate formula, and short-wavelength gravity corrections were calculated at control points to refine the long-wavelength gravity field modeling further. A seafloor topography model with a spatial resolution of 1' × 1' was constructed for the reef area near the Nansha Islands (112°E—116°E, 8°N—12°N) using the Improved Gravity-Geologic Method. The accuracy of the model was evaluated using shipborne bathymetric data provided by the National Oceanic and Atmospheric Administration of the United States (NOAA). Results indicate that the IGGM model more accurately reflects fine topographic variations, with the standard deviation of 175.68 m in depth differences from measured data, representing a reduction of 7.01 m, 20.67 m and 19.68 m compared to the GGM model, the SIO V25.1 model and the SRTM15 + V2.0 model, respectively. Compared to the GGM model, the IGGM

收稿日期 2025-03-25; 修回日期 2025-09-28.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家自然科学基金 (42274006, 42430101) 资助.

第一作者简介 谢甜, 女, 2000 年生, 硕士研究生, 主要从事海底地形反演等研究. E-mail: tiantianxie2023@163.com

* 通讯作者 郭金运, 男, 1969 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事空间大地测量、海洋大地测量、物理大地测量等研究.

E-mail: jinyunguo1@126.com

升,尤其是在地形复杂的岛礁区域,能够更准确地反映海底地形变化.

关键词 重力地质法;重力异常;海底地形;岛礁区;密度差异常数

中图分类号 P229

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026II0513

CSTR:32085.14.pg2026II0513

model shows a significant accuracy advantage in complex reef areas with depths ≤ 1000 m, reducing the standard deviation of depth differences by 10.20 m. This validates the effectiveness of the Improved Gravity-Geologic Method in enhancing inversion accuracy, especially in reef regions, where it more accurately reflects the trend of seafloor topography changes, providing essential support for seafloor topography modeling in these areas.

Keywords Gravity-geological method; Gravity anomaly; Seafloor topography; Islands and reefs; Density constant

0 引言

海洋占据地球表面的大部分,是地球的重要组成部分之一,对海上运输和海洋资源开发等领域的发展具有重要影响.其中,南海是中国近海中面积最大且水深最深的海域,内部有众多岛屿、珊瑚礁和浅滩分布(Morton and Blackmore, 2001).该区域水深变化显著,地形十分复杂.高精度海底地形模型的构建为深入理解地球形态、海底构造活动及海洋演变过程提供了直接依据,同时也是海洋经济开发、科学研究等多个领域不可或缺的基础信息(周帅等, 2024).由此可见,南海岛礁区海底地形数据对于保障航运安全、维护和保障南海权益而言都具有重要意义.

当前测深技术主要包括卫星遥感影像反演水深技术、激光雷达测深技术和卫星重力反演水深技术等(翟振和等, 2023).然而,激光雷达测深技术的应用局限于浅海水域,而遥感影像反演方法则受到雷达与光谱仪参数限制以及海洋环境的复杂影响,导致其在全球范围内的普适性不强(孙和平等, 2022).随着卫星测高技术的进步,其精度与空间分辨率得到了显著提升(郭金运等, 2021; 范雕等, 2022),通过该技术获取的海面高度信息能够进一步反演生成高精度和高分辨率的重力信息,该方法具有效率高和时间成本低等优势,极大的促进了海底地形反演的快速发展(Xing et al., 2020; 欧阳明达, 2022; 蒋涛等, 2023).目前,利用卫星测高重力数据反演海底地形的的方法多种多样,主要包括:线性回归法(Smith 和 Sandwell 法, S&S 法或 SAS 法)(Smith and Sandwell, 1997)、导纳函数法(频域法)(Parker, 1973; 欧阳明达等, 2015)、最小二乘配置法(范雕等, 2023)和重力地质法(Gravity-Geology Method, GGM)(An et al., 2022; 安德超等, 2022; 许闯等, 2023)等.与其他方法相比,重力地质法具

有方法简单、反演精度高、计算速度快的优点,因此应用广泛.目前,该方法已经在多个海域的地形反演中取得成功应用,如南海、日本海等区域(安德超等, 2022; Jiang et al., 2024).重力地质法在利用布格板公式计算控制点处的短波分量时,假设海面点的短波重力异常与海底点的海深之间是一对一的映射关系.然而,海面重力异常与海底地形之间实际上是非线性关系,海底地形会影响海面上一定范围内的重力观测量.为进一步提高反演海底地形的精度,针对重力地质法,国内外许多学者对于重力地质法的改进提出了多种方案:采用消除区域海底地形长波重力效应的改进重力地质法(An et al., 2022),采用矩形棱镜模型和采用Tikhonov 正则化方法对GGM 进行改进(Xing et al., 2020),采用等效质量线法近似周围海底地形的非线性引力效应校正短波改进重力地质法(Jiang et al., 2024)等,均提高了反演精度.

本文通过改进重力地质法,旨在消除区域海底地形中的长波重力效应,并探讨控制点长波分量的精细化建模方法.结合研究区域内的测高重力异常数据和船载测深数据,构建了南沙群岛附近岛礁区分辨率为 $1' \times 1'$ 的水深预测模型.为了评估预测结果的精度,采用SIO V25.1 模型与SRTM15 + V2.0 模型作为对比参考,验证改进重力地质法的可行性和稳定性.

1 研究方法

1.1 重力地质法

重力地质法最初被用于陆地基岩厚度的探测(Ibrahim and Hinze, 1972),之后发现该方法也非常适合通过卫星测高数据获取的重力异常来推算海底地形.它可以结合船载测深数据和重力异常数据预测海深,计算简便快速且精度较高.重力地质法利用密度差异常数及船载测深控制点,能有效的从观测重力异常中分离出与海底地形线性相关性较强的短

波重力异常,进而实现海底地形的反演.相较于 S&S 法依赖于重力数据与船载测深数据的统计分析来推算线性关系,重力地质法在研究区域内通过已知的线性关系,将重力异常数据与船载测深控制点进行三维拟合,从而构建海底地形模型格网.由于 GGM 原理与反演模型中插值船测控制点的方法相似,该方法能最大程度保留船测水深数据中的短波信息,因此具备较高的精度(蒋涛等, 2023).

海面观测得到的重力异常可以看作由两部分组成:一部分是由海底地形变化引起的短波重力异常,另一部分则是由深部密度不均匀所导致的长波重力异常,其公式为:

$$\Delta g_{\text{obs}} = \Delta g_{\text{short}} + \Delta g_{\text{long}}, \quad (1)$$

式中, Δg_{obs} 、 Δg_{short} 和 Δg_{long} 分别表示观测重力异常、短波重力异常和长波重力异常.

通过布格板公式可以近似计算水深控制点处的短波重力异常,公式为:

$$\Delta g_{\text{short}}(j) = 2\pi G \Delta \rho (E(j) - D), \quad (2)$$

式中, G 为万有引力常量 ($6.672 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}^2$); j 表示水深控制点的位置; $E(j)$ 为控制点处水深; $\Delta \rho$ 为海水与海底洋壳之间的密度异常数; D 为参考水深,通常取测深数据的最大水深值.由式(1)和式(2)可得:

$$\Delta g_{\text{long}}(j) = \Delta g_{\text{obs}}(j) - \Delta g_{\text{short}}(j), \quad (3)$$

式中, $\Delta g_{\text{obs}}(j)$ 为控制点处的观测重力异常,可通过实际观测重力异常数据插值得到; $\Delta g_{\text{long}}(j)$ 为控制点处的长波重力异常,通过格网化处理,可以获得海域内任意格网点的长波重力异常 $\Delta g_{\text{long}}(i)$.

由式(1)可计算出 i 点的短波重力异常 $g_{\text{short}}(i)$,通过布格板公式将短波重力异常转换为海底地形起伏,再加上密度异常数 $\Delta \rho$ 及参考深度 D ,即可得到位置 i 处的水深值 $E(i)$,公式为:

$$E(i) = \frac{g_{\text{short}}(i)}{2\pi G \Delta \rho} + D. \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta g_{\text{short}}^{j_n} &= 2\pi G \Delta \rho \frac{(\cos^k \theta_1)(E_{j_1} - D) + (\cos^k \theta_2)(E_{j_2} - D) + \cdots + (\cos^k \theta_m)(E_{j_m} - D)}{\cos^k \theta_1 + \cos^k \theta_2 + \cdots + \cos^k \theta_m} \\ &= 2\pi G \Delta \rho \frac{\sum_{s=1}^m (\cos^k \theta_s)(E_{j_s} - D)}{\sum_{s=1}^m (\cos^k \theta_s)}. \end{aligned} \quad (6)$$

与传统的布格板公式相比,公式(6)对重力异常的短波分量进行了更精细的计算.随后,将控制点的重力异常减去所得的精细化短波分量,从而得到

在 GGM 反演过程中,有两个重要参数:密度异常数 $\Delta \rho$ 和参考水深 D ,通常将参考水深 D 设为研究区域内水深数据中的最大值.其中,反演结果对参考深度 D 的具体选择不太敏感,但它对 $\Delta \rho$ 的微小变化却表现得非常敏感.采用重力地质法进行海底地形模型构建的关键问题在于如何确定密度异常数的有效值(Strykowski *et al.*, 2005).

1.2 改进重力地质法

相较于其他反演技术,改进后的重力地质法展现出独特的优势.该方法能依据船载测深数据,将重力异常分解为短波重力异常与长波重力异常,并利用短波重力异常信息反演海底地形.其计算效率高,模型构建简洁.传统重力地质法通常适用于平坦区域,在地形复杂区域反演精度较低.为提高反演精度,本文在考虑海底地形对控制点短波影响的基础上,对控制点处的长波分量进行了精细化建模,实现多个海面点对应单个海底点的关系,从而构建更高精度的海底地形模型.图 1 为 IGGM 原理图,以控制点 j_n 为圆心, R 为海底地形影响计算范围, j_n^m 为周围船载测深点, m 为计算范围内所有测点的个数.

基于 GGM 的布格板公式,遵循万有引力定律,考虑到两点之间的万有引力与距离有关,引入 $\cos^k \theta_m$ 作为权重参数,则周边船测点对控制点处短波重力异常影响为:

$$\Delta g_{\text{short}}^{j_n^m} = 2\pi G \Delta \rho (\cos^k \theta_m)(E_{j_n^m} - D), \quad (5)$$

式中, j_n^m 为水深控制点的位置, θ 为控制点所对应的海底点与海面上周边船测点的夹角, k 为待求参数. k 与 θ 的确定均通过迭代法求取,通过解算不同参数条件下反演水深与实测水深之间差值的 STD 与相关系数进行最优值的解算.

经加权处理后,控制点处的短波重力异常分量为:

控制点处的长波分量:

$$\Delta g_{\text{long}}^{j_n} = \Delta g_{\text{obs}}^{j_n} - \Delta g_{\text{short}}^{j_n}. \quad (7)$$

然后,依次通过张力样条函数和三次样条插值

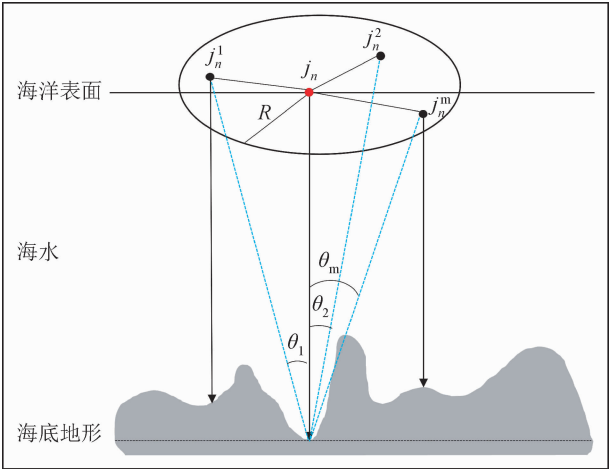


图 1 IGGM 原理图
Fig. 1 Schematic geometries of the improved gravity-geologic method

得到海域内未经测量任意点处的长波重力异常. 依据公式(3)和公式(4)即可得出海域内未经测量点的水深预测值.

2 海底地形反演

2.1 研究区域和数据

本文的研究区域为南沙群岛附近岛礁区 (112°E—116°E, 8°N—12°N). 南海位于太平洋西南部,是中国面积最大的近海,也是太平洋的边缘海域 (Wei *et al.*, 2021). 南沙群岛位于南海南部,属珊瑚礁地貌,岛礁分布密集,海底槽沟纵横交错. 研究区域内,最大水深超过 4000 m、地形复杂,海底起伏较大,主要由岛屿、沙洲、暗礁、暗沙和暗滩等构成.

(1)海洋重力异常模型

本文采用的海洋重力异常数据是山东科技大学

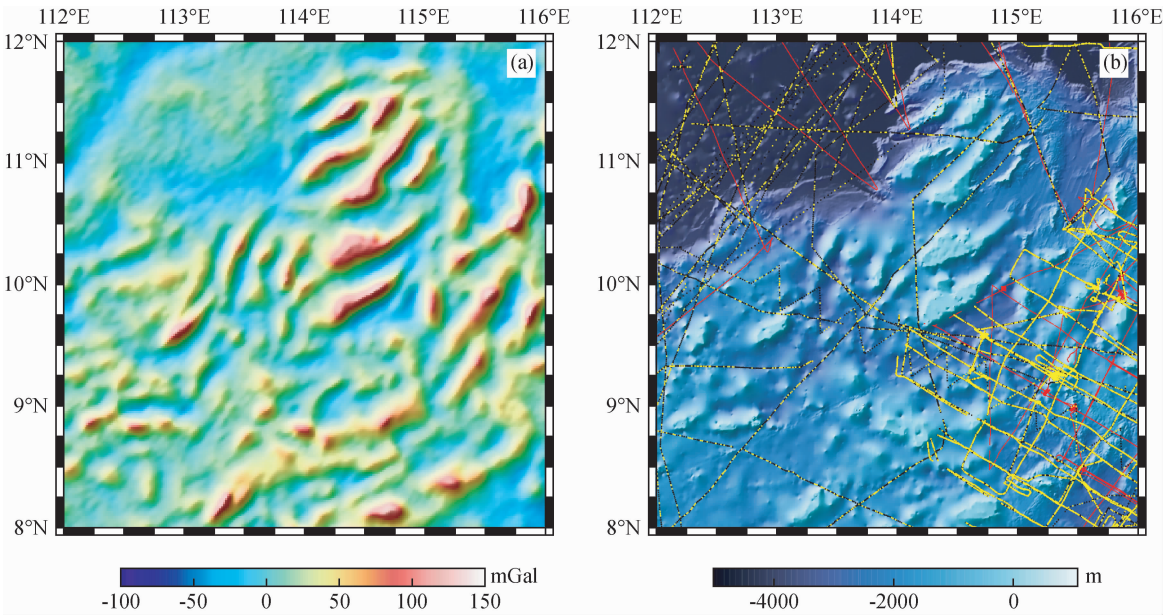


图 2 研究区域重力异常和船载测深数据
(a)SDUST2022GRA 重力异常模型; (b) NCEI 测深数据分布. 黑色点和黄色点为控制点,红色点为检核点.
Fig. 2 Gravity anomalies and shipborne bathymetry data in the study area

(a)SDUST2022GRA gravity anomaly model; (b) NCEI bathymetry data. The black and yellow points are control points, red points are checkpoints.

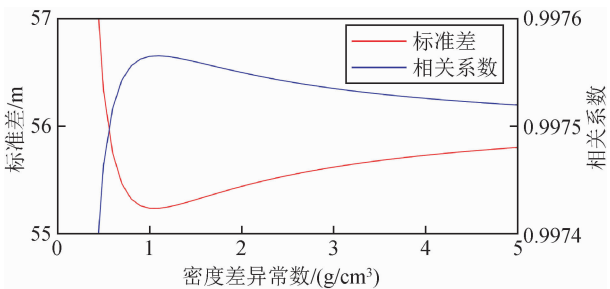


图 3 STD 与相关性系数变化趋势
Fig. 3 STD and correlation coefficient trend

于 2022 年发布的 SDUST2022GRA 海洋重力异常模型 (下载网址: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8337387>),如图 2a 所示. 该模型是采用雷达和激光高度计数据,对每种类型的高度计基准面采用不同的权重确定方法,从而建立的一个新的全球海洋重力异常模型,其格网分辨率为 1'×1'. 并利用已发表的全球重力异常高度计模型 (DTU17、V32.1、NSOAS22) 和船载重力测量数据,对 SDUST2022GRA 的精度和空间分辨率进行了评估. 结果表明,

SDUST2022GRA 是一个可靠的全球海洋重力异常模型(李真等, 2024; Li *et al.*, 2024).

(2) 海底地形模型

GEBCO_2024 是全球海洋总测深图(General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO)于 2024 年发布的全球测深产品(下载网址: <https://www.gebco.net>). 该模型覆盖全球的海洋和陆地区域, 格网分辨率为 $15'' \times 15''$, 由日本 Nippon 基金会-GEBCO Seabed 2030 项目开发的第六版 GEBCO 网格. 本文采用 GEBCO_2024 模型作为船测水深数据的粗差剔除基础数据, 以确保数据质量和精度.

SRTM15 + V2.0 是由美国斯克里普斯海洋研究所(Scripps Institution of Oceanography, SIO)发布的高分辨率全球水深地形模型, 其空间分辨率达到 $15''$ (Tozer *et al.*, 2019), 能够提供全球海洋和陆地的详细地形信息, 广泛应用于地球科学和海洋研究领域.

SIO V25.1 是 SIO 于 2023 年发布的全球海底地形模型(下载网址: https://topex.ucsd.edu/pub/global_topo_1min/), 其格网分辨率为 $1' \times 1'$. 该模型提供了更为精细的海洋地形数据, 适合于高精度研究需求. 在本研究中, SRTM15 + V2.0 模型和 SIO V25.1 模型均用于验证反演模型的有效性和可靠性.

(3) 船载测深数据

本研究区域的船载测深数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下属的国家环境信息中心(National Centers for Environmental Information, NCEI)(下载网址: <http://www.noaa.gov>), 轨迹分布如图 2b 所示, 底图采用了 GEBCO_2024 模型. 尽管测深数据整体上具有较高的准确性, 但由于时间跨度长, 早期数据中仍然存在一定的粗差. 故本文以 GEBCO_2024 模型为基础, 根据“三倍中误差”准则进行误差剔除. 将 GEBCO_2024 模型的水深数据插值到船载测深点上, 计算其与实测水深间的差异, 去除差异超过三倍中误差的点. 在研究区域内, 共剔除 1554 个船载测深点, 保留 56995 个, 数据剔除率约为 2.65%. 考虑同一测线上船载测深数据存在相关性, 若使用随机或间隔选取的方式确定检核点, 可能会导致插值模型的检核精度虚高. 为此, 本文选取研究区域内 2 条航迹线上的 19166 个船测点作为检核点, 其余 27 条航迹线上的 37829 个船测点作为控制点参与模型构建, 检核点仅用于最终的模型精度评估, 不参与模型计算和参数选取过程, 保证了精度评估的可靠性. 同时, 控制点进一步划分为两部分,

1/3 的点(黄色点)用于迭代计算密度差异常数, 剩余 2/3 的点(黑色点)用于模型计算.

2.2 密度差异常数的确定

重力地质法通过单个密度差异数值来估算海底洋壳界面上的微小密度差异变化, 然而这种方法的物理意义已逐渐变得较为薄弱. 因此, 可以将该常数看作经验参数, 用于建立短波重力异常与海深之间的线性关系. 在 GGM 计算海深的过程中, 全球海底洋壳平均密度和海水平均密度的差异常数 $\Delta\rho$ 是一个关键参数(Nagarajan, 1994), 理论值为 1.67 g/cm^3 . 然而, 由于区域地质条件和沉积物厚度变化, 固定的平均密度差异常数可能不适用. 若 $\Delta\rho$ 设定过小, GGM 模型预测的海深将会偏大; 相反, 若 $\Delta\rho$ 设定过大, 预测海深则会更趋近参考海深(Wild-Pfeiffer, 2008).

通常确定密度差异常数的方法有向下延拓法和迭代法(Hsiao *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011). 本文采用迭代法, 计算在不同 $\Delta\rho$ 取值下 12610 个迭代点处的海深预测值, 并与实测数据对比, 计算预测水深与实测水深之间差值的标准差和相关性. 当标准差最小及相关系数最大时, 对应的 $\Delta\rho$ 即为最优密度差异数值(Kim *et al.*, 2010, 2011; 许闯等, 2023). 图 3 展示了 GGM 迭代过程中 STD 与相关系数的变化情况. 对于每个候选 $\Delta\rho$ 值, 先使用式(6)加权布格板公式计算短波重力异常, 再通过式(7)计算可得到控制点的长波重力异常, 并利用张力样条函数和三次样条插值获得整个研究区域的长波重力异常. 最终, 依据公式(3)和公式(4)计算海域内未经测量点的水深预测值. 在 IGGM 迭代过程中, 当计算半径 $R = 4'$ 且参数 $k = 5$ 时, STD 最小且相关系数最大, 此时 $\Delta\rho$ 的最优值为 1.1 g/cm^3 . 因此, 本研究区域的最佳密度差异常数为 1.1 g/cm^3 .

2.3 模型构建

为验证重力地质法改进前后的精度提升效果, 首先基于 GGM 原理进行海底地形模型的构建, 再考虑海底地形的非线性项对 GGM 进行优化, 从而构建 IGGM 模型. GGM 模型的具体构建方法为: 将控制点的重力异常减去其通过式(2)得到的短波部分, 并对结果进行格网化, 生成研究海域内的长波重力异常. 然后, 通过三次样条插值计算出任意一点的长波重力异常. 接着, 根据式(3)计算出任意一点的短波重力异常, 从而获得研究海域内 $1' \times 1'$ 的短波重力异常格网. 最后结合式(4)、短波重力异常及确定的最优密度差异数值(1.1 g/cm^3), 即可构建对应

的 $1' \times 1'$ 海底地形模型 (GGM 模型). 采用改进重力地质法建立水深模型, 消除了区域海底地形的长波重力效应. IGGM 计算步骤如下:

(1) 定义计算半径 R 的取值范围和迭代步长;

(2) 筛选当前预设计算半径 R 范围内的控制点;

(3) 定义密度异常常数 $\Delta\rho$ 的取值范围及迭代步长;

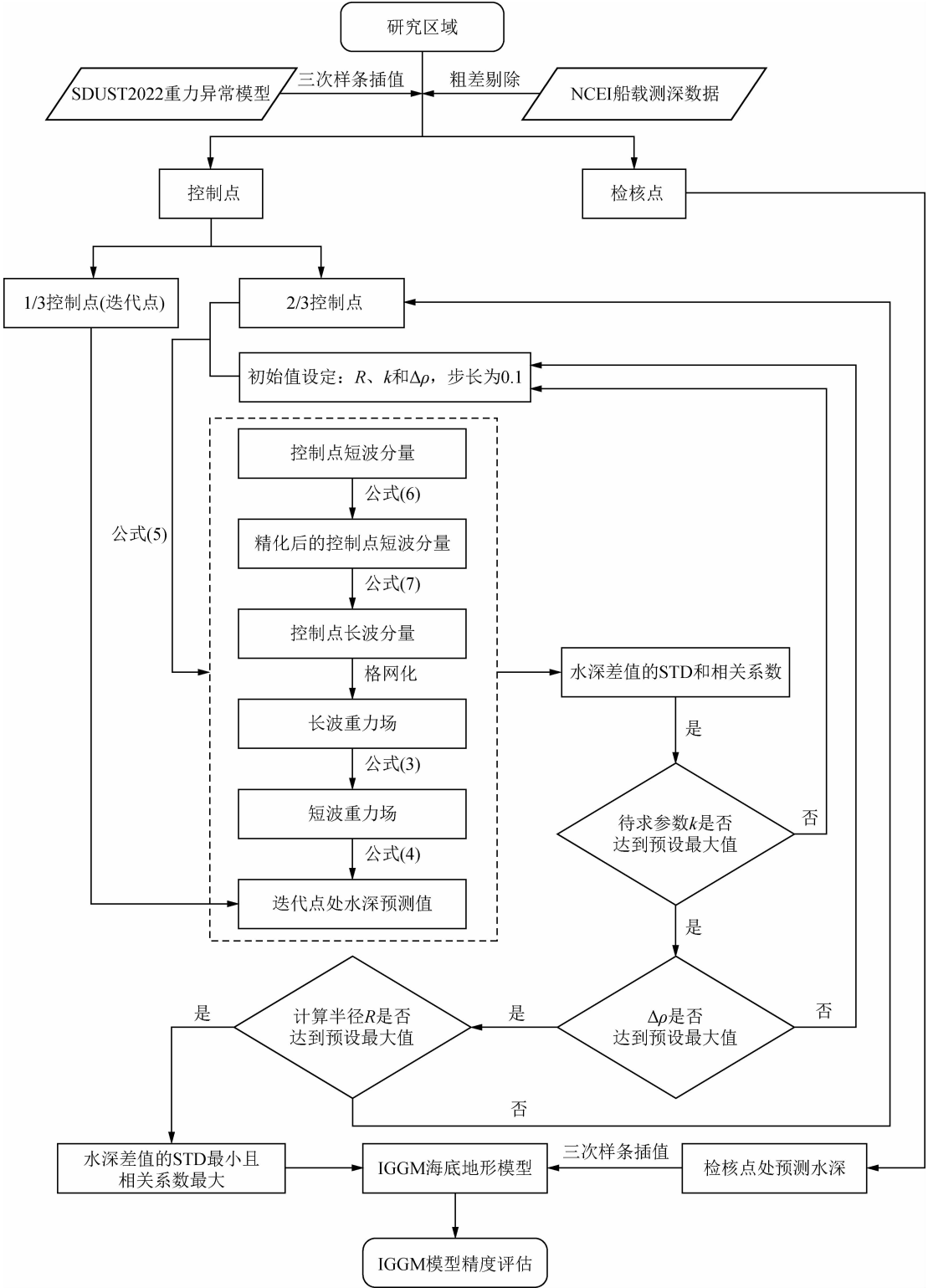


图 4 IGGM 计算流程

Fig. 4 Flowchart of the improved gravity-geologic method

- (a) 定义参数 k 的取值范围及迭代步长;
 - (b) 根据当前 k 的预设值计算控制点处各周边点引起的重力异常短波分量影响;
 - (c) 计算控制点处校正后的重力异常短波分量;
 - (d) 计算控制点处校正后的重力异常长波分量, 再利用张力样条函数对测深数据进行网格化处理, 获得重力异常长波场;
 - (e) 从重力异常模型中扣除长波重力场, 得到迭代点处的重力异常短波分量;
 - (f) 利用布格板公式计算迭代点 i 上的水深预测值 E_i ;
 - (g) 计算迭代点处的预测水深与船载实测水深的差值, 统计当前参数 R 、 $\Delta\rho$ 、 k 取值下对应差值的相关系数及 STD;
 - (h) 根据步长改变 k 的值, 迭代步骤(b)–(g), 直到参数 k 达到预设的最大值。
- (4) 根据步长改变 $\Delta\rho$ 的值, 迭代步骤(3), 直到 $\Delta\rho$ 达到预设的最大值;
 - (5) 根据步长改变计算半径 R 的值, 迭代步骤(2)–(5), 直到半径 R 达到预设的最大值;
 - (6) 通过比较各参数在不同取值条件预测水深与实测水深之间的相关系数及两者差值的 STD, 基于 STD 最小且相关系数最大的优化准则, 确定 R 、 $\Delta\rho$ 和 k 的最优值;
 - (7) 利用各参数的最优值反演得到最终的海深模型。

图4展示了IGGM计算过程和迭代法求取最佳计算半径 R 、参数 k 及最优密度异常数 $\Delta\rho$ 的流程图。改进部分主要集中在利用局部范围内的船测水深求取短波分量阶段, 并结合区域海底地形的影响对控制点处的短波重力异常进行加权修正。最终的反演公式仍沿用传统布格板公式, 但通过优化长波分量的求取方式, 提升了水深预测精度。其中, $\cos^k \theta_m$ 用于衡量周围测深点对控制点短波重力异常的贡献程度, k 值越大, 纳入计算的周围点越多, 但其权重逐渐减小。为了更准确地反映局部海底地形对重力异常的影响, 该方法在计算半径 R 内选取多个测深点, 基于其短波重力效应进行加权计算, 改进了传统重力地质法中单点映射的计算方式。通过加权平均, 综合考虑了周围测深点对控制点重力异常的影响, 使校正结果更准确地反映局部海底地形对重力异常的贡献。

将 $\Delta\rho$ 的范围设定为 $0.1 \sim 5 \text{ g/cm}^3$, 待求参数 k

的范围设定为 $0 \sim 30$ 。当计算半径 $R = 4'$ 且参数 $k = 5$ 时, STD 最小且相关系数最大, $\Delta\rho$ 的最优值为 1.1 g/cm^3 。最后, 将 SDUST2022GRA 重力异常模型和船载测深数据结合, 构建得到 $1' \times 1'$ 的海底地形模型(IGGM 模型), 如图5c所示。图5a展示了NCEI船测水深控制点格网化模型, 其结果采用张力样条函数生成。该方法通过引入张力参数调控插值曲面的曲率, 从而使数据点之间的过渡更加平滑。相比传统插值方法, 张力样条函数在适应复杂地形方面具有更高的灵活性, 可以有效控制插值表面的平滑度(Smith and Wessel, 1990)。

从图5可以看出, 三组海深模型均能反映研究区域的整体地形变化, 但在中业群礁、郑和群礁和南部的尹庆群礁区存在较大差异。由于岛礁区船载测深数据稀少, 且该区域海底地形起伏较大, 直接将船测数据格网化后得到的地形较为粗糙, 因此该模型精度最低, 几乎无法呈现海底地形的详细信息。而GGM模型和IGGM模型均能够较为清晰地描绘研究海域的各类海洋地貌特征, 例如大陆架、大陆坡和深海盆等。

为了评估反演模型的精度, 本文引入平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)作为精度评价指标。MAE的计算公式如下:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - H_i|, \quad (8)$$

式中, n 表示船测点数量, E_i 表示水深预测值, H_i 表示实测水深值。

此外, 还引入平均绝对百分比误差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE), 它是模型预测误差与实测水深之比的绝对值的平均值, 这一指标常用于回归分析和模型评估中(Zhou *et al.*, 2023)。MAPE值越低, 表示模型整体精度越高。MAPE的计算公式如下:

$$\text{MAPE} = \left(\sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - H_i}{H_i} \right| \right) / n \times 100\% . \quad (9)$$

通过STD、MAE、MAPE等指标对模型精度进行评估。使用STD作为模型精度评估标准, 并将MAPE作为模型的相对精度指标(胡敏章等, 2020)。

3 结果分析

3.1 模型对比分析

为验证反演模型的精度, 本文将检核点作为外部检核条件, 引入SIO V25.1和SRTM15 + V2.0模型, 对GGM与IGGM模型进行对比分析。将各模型

的海深值内插到检核点处,计算其与实测水深的差值,从而评估模型精度,统计结果见表 1. 从表 1 可见,IGGM 模型的 STD 为 175.68 m,精度明显优于 GGM(182.69 m)、SIO V25.1(196.35 m)和 SRTM15 + V2.0(195.36 m)模型. 从平均绝对误差(MAE)来看,IGGM 模型分别比 GGM、SIO V25.1 和 SRTM15

+ V2.0 模型减小了 1.20 m、9.35 m、4.52 m. 从相对精度分析,IGGM 模型相比于 GGM、SIO V25.1 和 SRTM15 + V2.0 模型,分别减小了 0.10%、1.22%、0.99%. 综合各项指标的统计结果,IGGM 模型相较于 GGM、SIO V25.1、SRTM15 + V2.0 模型,能够获得更高的精度.

表 1 各海底地形模型与检核点差异

Table 1 Differences between various seafloor topography models and check points

Model	Max/m	Min/m	Mean/m	STD/m	RMS/m	MAPE/%	MAE/m
GGM-NCEI	1218.80	-841.40	11.10	182.69	183.02	6.44%	112.92
IGGM-NCEI	1095.50	-844.16	9.58	175.68	175.94	6.34%	111.72
SIO V25.1-NCEI	900.83	-760.59	24.62	196.35	197.88	7.56%	121.07
SRTM15 + V2.0-NCEI	1047.90	-734.91	29.30	195.36	197.54	7.33%	116.24

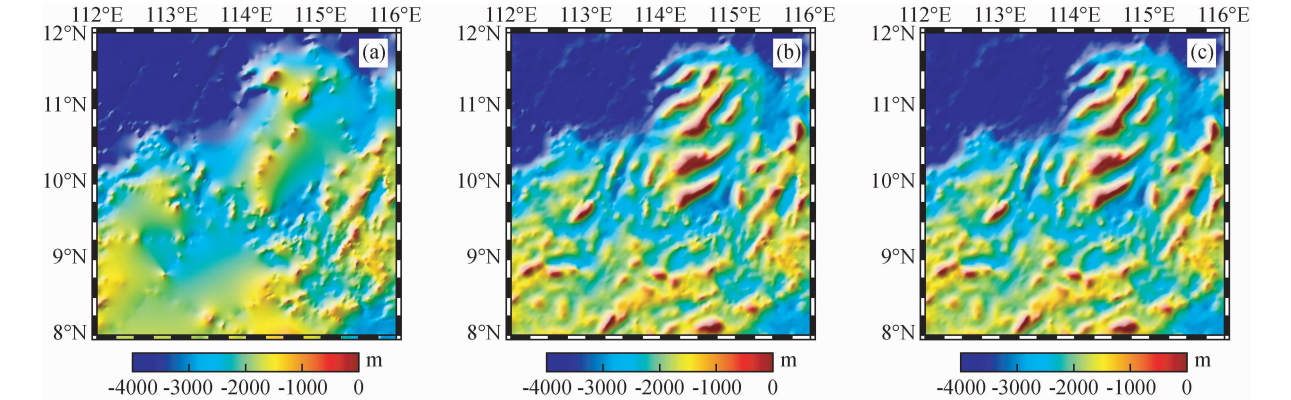


图 5 海底地形模型

(a) 船测控制点格网化模型; (b) GGM 模型; (c) IGGM 模型.

Fig.5 Submarine terrain model

(a) Grid model of bathymetric control points; (b) GGM model; (c) IGGM model.

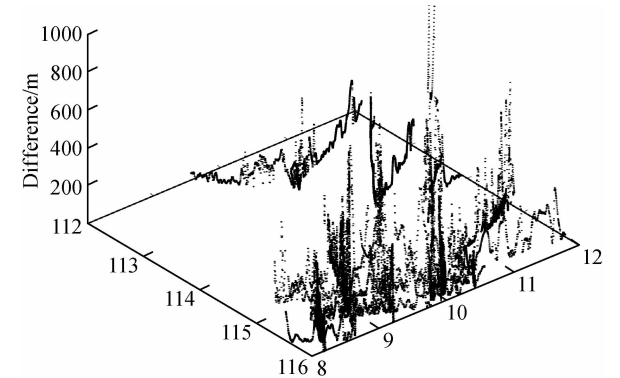


图 6 IGGM 模型与检核点处实测水深差异的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of differences between the IGGM model and the shipborne measured depths

为进一步分析重力地质法反演精度的影响因素,统计了 IGGM 模型与检核点处实测水深差值的

绝对值的空间分布情况,如图 6 所示. IGGM 模型误差虽覆盖较广区域,但在部分海域相对集中,水深差异较大的点主要位于地形起伏度较大的区域. 同时,对 GGM、IGGM、SIO V25.1 和 SRTM15 + V2.0 模型在检核点处与实测水深绝对差进行了区间统计. 从图 7 可以看出,四种海深模型与检核点处实测水深的差值相比,海深绝对差主要集中在 0 ~ 100 m 范围内,占比分别为 64.36%、65.32%、62.61% 和 63.80%. 其中,IGGM 模型的海深差值超过 300 m 的点约占总数的 9.06%,优于 GGM、SIO V25.1 和 SRTM15 + V2.0 模型的对应占比(分别为 9.34%、12.37%、11.84%). 结合图 6 和图 7 可见,IGGM 模型在检核点处与实测水深差异较大的点主要集中在研究区域的中部. 这一差异可能由以下几个因素导致:首先,该区域地形复杂,岛礁密集,如中业群礁、

九章群礁、太平岛和景宏岛等. 该区域地势起伏大, 海底地形变化显著, 增加了水深预测的不确定性; 其次, 区域内船载测深数据的稀缺及船载测深航线的分布不均匀, 导致该地区测深数据的覆盖不足, 从而影响了模型的预测精度.

3.2 不同水深区间的精度分析

为了更全面地分析各模型精度的影响因素, 本文对不同水深范围内各模型的表现差异进行了分析. 研究区域位于南沙群岛附近岛礁区, 该区域岛礁分布广泛且零散, 水深变化剧烈, 地形复杂. 本文对 GGM、IGGM、SIO V25.1 和 SRTM15 + V2.0 模型在

不同水深范围内与实测水深差值的标准差(STD)进行了统计分析, 具体数据见表 2. 从表 2 可见, 各模型在不同水深区间的表现差异显著. 在水深 ≤ 1000 m 的浅水区, GGM 和 IGGM 模型精度明显优于 SIO V25.1 和 SRTM15 + V2.0 模型, STD 分别为 275.16 m 和 264.96 m, 较 SIO V25.1 的 350.85 m 和 SRTM15 + V2.0 的 354.33 m 低约 20%. 在 (1000, 2000] m 水深区间内, GGM、IGGM 模型同样表现出较高精度, 优于 SIO V25.1 和 SRTM15 + V2.0 模型. 而在水深 > 2000 m 的深水区, SIO V25.1 和 SRTM15 + V2.0 模型精度则优于 GGM、IGGM 模型.

表 2 不同水深范围内各模型与检核点差异的 STD
Table 2 STD of deviation between various seafloor topography models and check points

水深/m	检核点数/个	STD/m			
		GGM	IGGM	SIO V25.1	SRTM15 + V2.0
≤ 1000	496	275.16	264.96	350.85	354.33
(1000, 2000]	6575	166.37	150.75	245.46	234.71
> 2000	12095	175.77	171.50	148.74	155.32

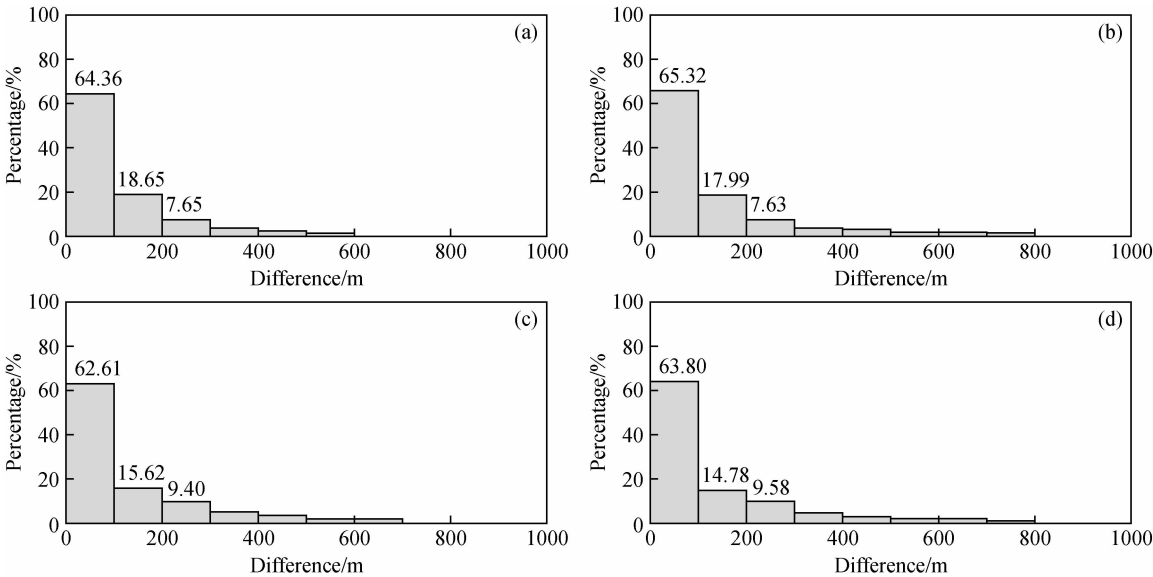


图 7 各模型与检核点的绝对差统计直方图
(a) GGM 模型; (b) IGGM 模型; (c) SIO V25.1 模型; (d) SRTM15 + V2.0 模型.
Fig. 7 Histogram of absolute differences between various models and check points
(a) GGM model; (b) IGGM model; (c) SIO V25.1 model; (d) SRTM15 + V2.0 model.

3.3 剖面分析

为进一步探究 IGGM 模型水深与 NCEI 船测水深的关系, 本文选取了沿 9°N 和 10°N 的剖面进行对比分析, 如图 8 所示. 从图 8a 沿 9°N 剖面可知, 在地形较为平坦、实测水深较多的区域, IGGM 反演水

深与船测水深基本一致, 差值曲线波动较小. 然而, 在 114°E 附近, 差值曲线明显增大. 该区域实测数据稀少, 导致船测水深数据在网格化过程中精度降低, 从而影响反演水深模型, 造成误差增大. 图 8b 沿 10°N 剖面显示, 在较为平坦区域, IGGM 反演水深

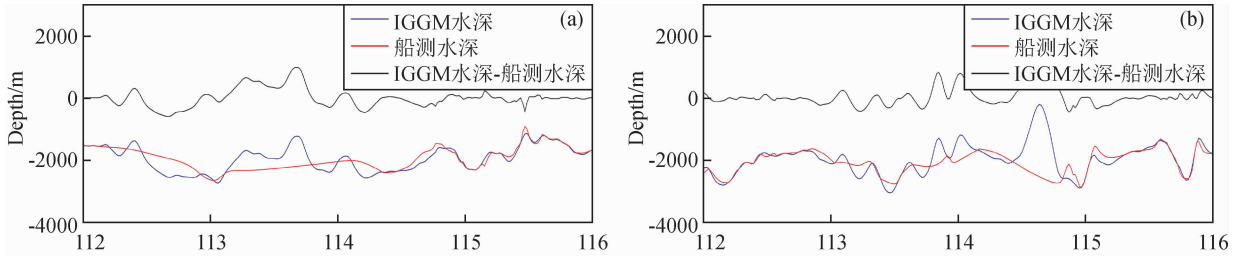


图8 IGGM水深与船测水深沿9°N、10°N的水深剖面图

(a)沿9°N剖面;(b)沿10°N剖面.

Fig. 8 Depth profiles of IGGM depths and ship measured depths at 9°N and 10°N

(a) Profile along 9°N; (b) Profile along 10°N.

与船测水深仍保持较好一致性,差值较小.但在115°E附近,差值曲线出现明显波动.该区域包括太平岛和景宏岛,岛礁密集,地形起伏剧烈,从而影响了反演精度,导致误差显著增大.

综合各项指标的统计结果,IGGM模型相比SIO V25.1和SRTM15+V2.0模型更接近NCEI船测水深数据,且相较GGM模型精度提高了7.01 m,表现出更高的精度.然而,在海山、岛屿等地形复杂区域,反演精度仍有一定提升空间.

4 结论

本文基于卫星测高数据计算海洋重力异常,针对传统重力地质法仅考虑地形的线性部分、忽略非线性项的不足,采用一种改进的重力地质法,旨在细化长波重力场并提高海底地形反演精度.本文重建了南沙群岛附近岛礁区1'×1'海底地形模型,并深入分析了影响海底地形反演精度的多个因素,得出以下主要结论:

(1)鉴于船测航线的分布情况,本文选取2条单独的船测航线作为检核数据,用于模型的最终检验.这种选择方法相比每条航线中每三个点选取一个检核点,减小了周围控制点对检核点插值的影响,从而提高了精度指标的可靠性.

(2)改进后的重力地质法结合了重力异常数据和船载测深点,能够在研究区域内较高精度地反演海底地形.利用该方法生成的IGGM测深模型在整体精度上优于GGM、SIO V25.1和SRTM15+V2.0模型,在复杂地形区域表现更佳,能够更清晰地反映研究区域的地形地貌特征.在岛礁环境的海深反演中,IGGM模型表现出更高的精度.

(3)IGGM模型能够在船测数据稀缺的区域提供有效补充,但在地形起伏较大的区域,其误差仍然

较大.这表明,IGGM模型的精度受限于船测数据的稀疏分布及海底地形的复杂性,仍有进一步提升的空间.

致谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- An D C, Guo J Y, Li Z, *et al.* 2022. Improved gravity-geologic method reliably removing the long-wavelength gravity effect of regional seafloor topography: a case of bathymetric prediction in the South China Sea. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 1-12, doi: 10.1109/TGRS.2022.3223047.
- An D C, Guo J Y, Ji B, *et al.* 2022. Considering the gradient of ocean topography to predict bathymetry with the gravity-geology method in the South China Sea. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 37(5): 1789-1798, doi: 10.6038/pg2022FF0512.
- Fan D, Li S S, Meng S Y, *et al.* 2022. Analyzing the influence of physical parameters of single layer/double layer crust on seafloor topography inversion from gravity data. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 37(6): 2258-2266, doi: 10.6038/pg2022GG0039.
- Fan D, Li S S, Feng J K, *et al.* 2023. Applying least square collocation method to predict seafloor topography in the unknown sea area. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica (in Chinese)*, 52(12): 2039-2053, doi: 10.11947/j. AGCS.2023.20220644.
- Guo J Y, Wei Z J, Zhu C C, *et al.* 2021. Bathymetry inversion of South China Sea based on iterative continuation of gravity anomalies. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science) (in Chinese)*, 40(4): 1-10, doi: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2021.04.001.
- Hsiao Y S, Kim J W, Kim K B, *et al.* 2011. Bathymetry estimation using the gravity-geologic method: an investigation of density contrast predicted by the downward continuation method. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 22(3): 347-358, doi: 10.3319/TAO.2010.10.13.01(Oc).
- Hu M Z, Zhang S J, Jin T Y, *et al.* 2020. A new generation of global bathymetry model BAT - WHU2020. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica (in Chinese)*, 49(8): 939-954, doi: 10.11947/j. AGCS.2020.20190526.
- Ibrahim A, Hinze W J. 1972. Mapping buried bedrock topography with gravity. *Groundwater*, 10(3): 18-23, doi: 10.1111/j.1745-6584.1972.tb02921.x.
- Jiang T, Jiang X, Guo J Y, *et al.* 2023. Review on research progress of recovering bathymetry from satellite altimetry-derived data. *Journal*

- of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 53(6): 2029-2044, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230285.
- Jiang X, Guo J Y, Lin M, *et al.* 2024. Enhanced gravity-geologic method to predict bathymetry by considering non-linear effects of surrounding seafloor topography. *Geophysical Journal International*, 239(1): 754-767, doi: 10.1093/gji/ggae301.
- Kim J W, Von Frese R R B, Lee B Y, *et al.* 2011. Altimetry-derived gravity predictions of bathymetry by the gravity-geologic method. *Pure and Applied Geophysics*, 168(5): 815-826, doi: 10.1007/s00024-010-0170-5.
- Kim K B, Hsiao Y S, Kim J W, *et al.* 2010. Bathymetry enhancement by altimetry-derived gravity anomalies in the East Sea (Sea of Japan). *Marine Geophysical Researches*, 31(4): 285-298, doi: 10.1007/s11001-010-9110-0.
- Li Z, Guo J Y, Sun Z M, *et al.* 2024. Global marine gravity anomalies recovered from multi-beam laser altimeter data of ICESat-2. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 53(2): 252-262, doi: 10.11947/j. AGCS.2024.20230207.
- Li Z, Guo J Y, Zhu C C, *et al.* 2024. The SDUST2022GRA global marine gravity anomalies recovered from radar and laser altimeter data: contribution of ICESat-2 laser altimetry. *Earth System Science Data*, 16(9): 4119-4135, doi: 10.5194/essd-16-4119-2024.
- Morton B, Blackmore G. 2001. South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 42(12): 1236-1263, doi: 10.1016/S0025-326X(01)00240-5.
- Nagarajan R. 1994. Gravity-geologic investigation of buried bedrock topography in northwestern Ohio [Master's thesis]. Columbus, USA: The Ohio State University.
- Ouyang M D, Sun Z M, Zhai Z H, *et al.* 2015. Bathymetry prediction based on the admittance theory of gravity anomalies. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 44(10): 1092-1099, doi: 10.11947/j. AGCS.2015.20140427.
- Ouyang M D. 2022. Research progress and prospects of seabed topography inversion from altimetry data. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 37(6): 2291-2300, doi: 10.6038/pg2022GG0003.
- Parker R L. 1973. The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal International*, 31(4): 447-455, doi: 10.1111/j.1365-246X.1973.tb06513.x.
- Smith W H F, Wessel P. 1990. Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, 55(3): 293-305, doi: 10.1190/1.1442837.
- Smith W H F, Sandwell D T. 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277(5334): 1956-1962, doi: 10.1126/science.277.5334.1956.
- Strykowski G, Boschetti F, Papp G. 2005. Estimation of the mass density contrasts and the 3D geometrical shape of the source bodies in the Yilgarn area, Eastern Goldfields, Western Australia. *Journal of Geodynamics*, 39(5): 444-460, doi: 10.1016/j.jog.2005.04.004.
- Sun H P, Li Q Q, Bao L F, *et al.* 2022. Progress and development trend of global refined seafloor topography modeling. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 47(10): 1555-1567, doi: 10.13203/j.whugis20220412.
- Tozer B, Sandwell D T, Smith W H F, *et al.* 2019. Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+. *Earth and Space Science*, 6(10): 1847-1864, doi: 10.1029/2019EA000658.
- Wei Z J, Guo J Y, Zhu C C, *et al.* 2021. Evaluating accuracy of HY-2A/GM-derived gravity data with the gravity-geologic method to predict bathymetry. *Frontiers in Earth Science*, 9: 636246, doi: 10.3389/feart.2021.636246.
- Wild-Pfeiffer F. 2008. A comparison of different mass elements for use in gravity gradiometry. *Journal of Geodesy*, 82(10): 637-653, doi: 10.1007/s00190-008-0219-8.
- Xing J, Chen X X, Ma L. 2020. Bathymetry inversion using the modified gravity-geologic method: application of the rectangular prism model and Tikhonov regularization. *Applied Geophysics*, 17(3): 377-389, doi: 10.1007/s11770-020-0821-y.
- Xu C, Li J B, Wu Y L. 2023. Improved gravity-geologic method and its application to seafloor topography inversion in the South China Sea. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 48(6): 891-901, doi: 10.13203/j.whugis20220199.
- Zhai Z H, Sun Z M, Ma J, *et al.* 2023. Nonlinear sequence correlation method for inversion of seabed topography from disturbed gravity data in local sea area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 38(2): 631-640, doi: 10.6038/pg2023GG0240.
- Zhou S, Liu X, Guo J Y, *et al.* 2023. Bathymetry of the Gulf of Mexico predicted with multilayer perceptron from multisource marine geodetic data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 1-11, doi: 10.1109/TGRS.2023.3328035.
- Zhou S, Liu X, Li Z, *et al.* 2024. Multi-layer perceptron inversion of seafloor topography in the South China Sea using multi-source marine geodetic data. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 67(4): 1368-1382, doi: 10.6038/cjg2023Q0833.

附中文参考文献

- 安德超, 郭金运, 纪兵, 等. 2022. 顾及海底地形坡度的南海海底地形分区 GGM 反演. *地球物理学进展*, 37(5): 1789-1798, doi: 10.6038/pg2022FF0512.
- 范雕, 李姗姗, 孟书宇, 等. 2022. 单层/双层地壳物理参数对重力数据反演海底地形影响分析. *地球物理学进展*, 37(6): 2258-2266, doi: 10.6038/pg2022GG0039.
- 范雕, 李姗姗, 冯进凯, 等. 2023. 基于最小二乘配置的陌生海域海底地形反演方法. *测绘学报*, 52(12): 2039-2053, doi: 10.11947/j. AGCS.2023.20220644.
- 郭金运, 魏志杰, 祝程程, 等. 2021. 基于重力异常迭代延拓的南海海底地形反演. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 40(4): 1-10, doi: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2021.04.001.
- 胡敏章, 张胜军, 金涛勇, 等. 2020. 新一代全球海底地形模型 BAT_WHU2020. *测绘学报*, 49(8): 939-954, doi: 10.11947/j. AGCS.2020.20190526.
- 蒋涛, 姜笑, 郭金运, 等. 2023. 利用卫星测高数据反演全球海底地形研究进展. *吉林大学学报(地球科学版)*, 53(6): 2029-2044, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230285.
- 李真, 郭金运, 孙中苗, 等. 2024. 基于 ICESat-2 多波束激光测高数据的全球海洋重力异常反演分析. *测绘学报*, 53(2): 252-262, doi: 10.11947/j. AGCS.2024.20230207.
- 欧阳明达, 孙中苗, 翟振和, 等. 2015. 采用重力异常的导纳理论推估海底地形. *测绘学报*, 44(10): 1092-1099, doi: 10.11947/j. AGCS.2015.20140427.
- 欧阳明达. 2022. 测高数据反演海底地形研究进展与展望. *地球物理学进展*, 37(6): 2291-2300. doi: 10.6038/pg2022GG0003.
- 孙和平, 李倩倩, 鲍李峰, 等. 2022. 全球海底地形精细建模进展与发展趋势. *武汉大学学报(信息科学版)*, 47(10): 1555-1567, doi: 10.13203/j.whugis20220412.
- 许闯, 黎晋博, 吴云龙. 2023. 改进的重力地质法及其在中国南海地区海底地形反演中的应用. *武汉大学学报(信息科学版)*, 48(6): 891-901, doi: 10.13203/j.whugis20220199.
- 翟振和, 孙中苗, 马健, 等. 2023. 一种局部海域扰动重力数据反演海底地形的非线性序列相关方法. *地球物理学进展*, 38(2): 631-640, doi: 10.68/pg2023GG0240.
- 周帅, 刘新, 李真, 等. 2024. 融合多源海洋大地测量数据的南海海底地形多层感知机反演. *地球物理学报*, 67(4): 1368-1382. doi: 10.6038/cjg2023Q0833.