

阮晓光, 占赵杰, 闫兆进, 等. 基于全球测深数据的中国海岸线周边海域数字水深模型融合[J]. 海洋学报, 2024, 46(7): 16–28, doi:10.12284/hyxb2024062

Ruan Xiaoguang, Zhan Zhaojie, Yan Zhaojin, et al. Digital bathymetric model fusion of offshore waters around China's coastline based on global bathymetry data[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(7): 16–28, doi:10.12284/hyxb2024062

基于全球测深数据的中国海岸线周边 海域数字水深模型融合

阮晓光^{1,2}, 占赵杰¹, 闫兆进^{3*}, 谈秋英⁴, 郭美静⁵, 杨阳¹

(1. 浙江水利水电学院测绘科学与技术学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江水利水电学院南浔创新研究院, 浙江 杭州 310018; 3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 4. 浙江公路技师学院, 浙江 杭州 311300; 5. 福州大学数字中国研究院, 福建 福州 350108)

摘要: 数字水深模型 (Digital Bathymetric Models, 简称“DBMs”), 是近海工程建设、资源开发、环境保护等领域的重要基础地理信息数据。现有全球公开 DBMs 产品如 GEBCO (The General Bathymetric Chart of the Oceans)、SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission)、ETOPO (Earth Topography) 等在不同海域的数据类型、数据来源和产品精度均存在差异。为利用全球测深数据和 DBMs 产品重建中国近海水深模型, 本文提出一种基于水深分区的加权融合重建框架。首先, 从 5 个维度 (整体精度、不同水深、航线剖面、地理分区、局部细节) 对比分析 6 种常用 DBMs 产品的可靠性和适用性; 然后, 顾及水深和地形特征对研究区进行分割和分区, 并选取分区内最优 DBMs 产品, 以最小误差为约束进行最优加权融合; 最后, 对融合结果进行实测值恢复、平滑滤波等后处理, 形成中国海岸线周边近海海域 15" 分辨率高精度无缝水深模型。结果表明, 融合结果相比 SRTM30_PLUS、GEBCO_2022、SRTM15_V2.5.5 和 ETOPO_2022 均方根误差降低了 27%、14%、14% 和 13%, 地形细节也得到保留, 证明了该融合框架的可行性, 可为多数据集大规模海底地形的融合重建和及时更新提供参考。

关键词: 数字水深模型; 多源数据融合; 水深; 海底地形; 中国海岸线

中图分类号: P229.1; P28

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)07-0016-13

1 引言

海洋长期以来被视为人类探索世界最耗时的领域之一, 全球海洋面积约为 3.62 亿 km², 占世界面积的约 71%, 拥有不可估量的战略价值与意义^[1-2]。我国陆架边缘海域约 300 万 km², 占全球陆架海的 12.5%, 大陆岸线绵延 1.8 万 km, 同时还拥有 1.4 万 km 的岛屿海岸线^[3]。水深是反映海底地形起伏的基本要素, 不仅对人类认识和利用海洋起着关键作用, 也是进行

科学研究和制定海洋政策的重要依据^[4]。数字水深模型 (Digital Bathymetric Models, 简称“DBMs”) 是一种反映海洋水深变化描述海底地貌特征的三维数字模型, 可用于海底地貌特征以及成因、海洋资源、海洋渔业等诸多领域研究, 还在近海海底工程勘察设计、海上导航、海底电缆建设等工程领域具有广泛的应用^[5-6]。随着船测水深数据、海洋重力信息的不断细化和完善, 多个国家和组织通过数据融合建成了一些全球公开 DBMs 产品, 如 GEBCO (The General Bathymetric

收稿日期: 2023-07-14; 修订日期: 2024-01-24。

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目 (LZJWY22E090002); 国家自然科学基金 (42201451); 中国博士后科学基金面上项目 (2022M723379); 南浔青年学者项目 (RC2024021062); 浙江省社会科学界联合会研究课题 (2024N085); 江苏省双创博士项目 (JSSCBS20221523)。

作者简介: 阮晓光 (1990—), 男, 河南省周口市人, 主要从事海底地形建模与分析研究。E-mail: ruanxg@zjweu.edu.cn

* **通信作者:** 闫兆进 (1991—), 男, 山东省济宁市人, 副教授, 主要从事地学大数据挖掘与空间分析建模研究。E-mail: yanzhaojin@cumt.edu.cn

Chart of the Oceans)、SRTM(The Shuttle Radar Topography Mission)等^[7-9], 这些数据集为地学相关研究提供了重要支撑。然而, 全球测深数据存在来源、格式和精度等多方面差异, 构建高精度数字水深模型面临困难。此外, 受重力和测高卫星轨道分辨率的局限, 短时间内无法提供更高分辨率、更高精度的重力异常和垂直重力梯度, 导致 DBMs 产品更新速度慢、空间分辨率低(最高约 500 m), 以南海为例重力反演海底地形精度在 100 m 以上^[10]。因此, 充分利用多源水深数据和 DBMs 产品互补优势, 及时更新和优化全球或局部海域水深模型尤为重要, 已经成为研究热点。

近年来, 在海洋测深数据融合方面, 常用方法是经典的“Remove-Restore”法, 利用差值栅格恢复局部的高分辨率数据, 实现融合模型最小扰动情况下的平滑过渡, 增强局部地形细节^[11-12]。演变而来的“合并-融合”方法融合多(单)波束声呐测深、海图水深与数字水深产品, 亦被用于填补数据空洞, 修复空洞区高分辨率海底地形, 从而保留海底地形特征, 已经成为生产全球大尺度高分辨率海底地形的主流手段^[13]。海洋数字水深模型产品融合的研究与陆地 DEM(Digital elevation model)类似, 按照原理可分为频率域融合、稀疏表达融合、空间域融合等^[5, 14-16]。其中, 直接平均或加权平均方法, 简单易行、效率高, 且融合效果好,

但如何确定最优融合权重是避免融合结果出现伪影和边缘效应的关键^[14]。以往研究中权重图通常由源 DEM 数据与参考数据间的高程误差图(Height error maps, HEMs)估算得到, 该方法在缺乏可靠先验数据的海域并不可行, 且未意识到分析影响权重图最相关地形参数的重要性, 这限制了该方法的广泛适用性^[14]。

针对多源水深数据和数字水深模型融合方面研究的不足, 本文提出一种基于水深分区的加权融合重建框架, 顾及水深和地形特征以最小误差为约束进行最优加权融合, 实现中国海岸线周边近海海域高精度数字水深模型的及时更新和优化。

2 研究区与数据

2.1 研究区

本文以中国海岸线向外延伸 150 km 缓冲区的近海海域作为研究区域, 如图 1a 所示, 纬度范围在 11.676°N 至 41.047°N 之间, 经度范围在 105.620°E 至 130.355°E 之间, 国界底图来源于自然资源部标准地图服务系统(审图号: GS(2019)1822 号)。

2.2 测深数据

船测水深数据主要取自 NCEI(National Centers for Environmental Information)的全球海洋航迹地球物理数据库(<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/geodas>。

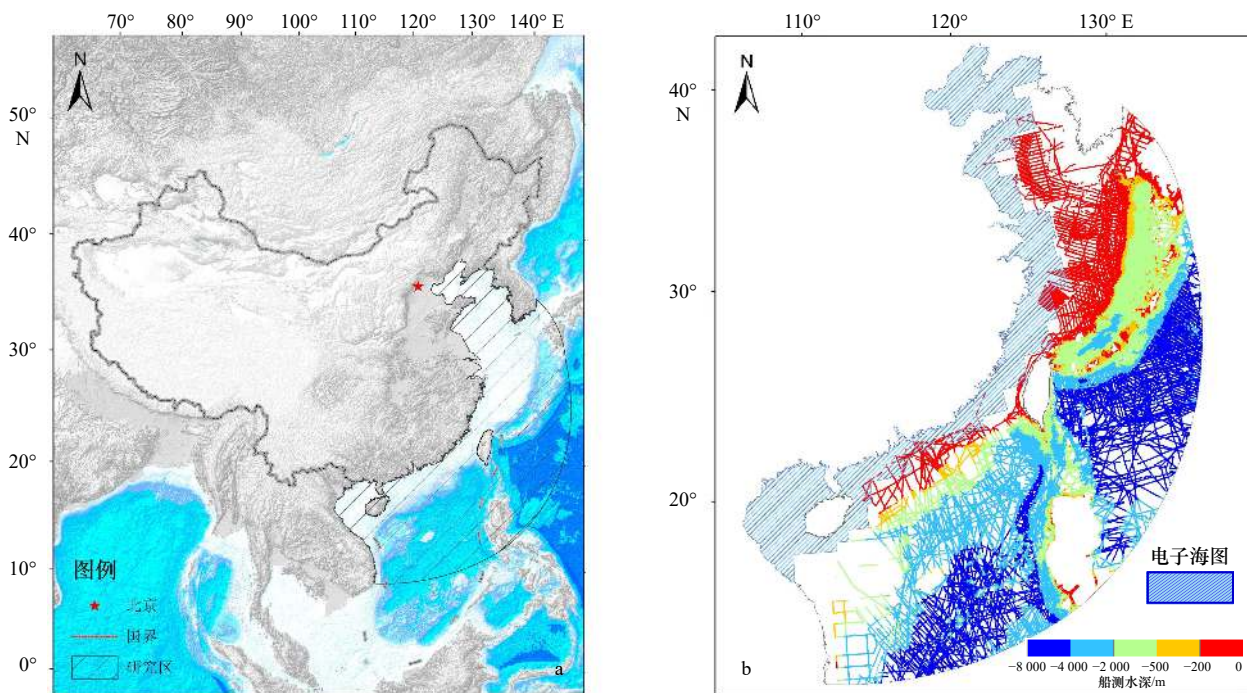


图 1 a. 研究区;b. 测深数据分布

Fig. 1 a. Study area ; b. distribution of bathymetry data

该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作, 底图无修改

Note: The map is produced based on the standard map with review number GS (2019) 1822 downloaded from the website of the Standard Map Service of the Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, with no modifications to the base map

html), 该数据库收纳了全球范围内不同研究机构的实测水深数据。本文获取 1950 年至今所有航次采集的船测单(多)波束声呐测深数据, 数据分布如图 1b 所示。鉴于该海域多波束声呐测深数据分布较少, 本研究使用的数据主要是单波束声呐测深数据为主。

海图作为地图学的一个分支, 是以海洋为描绘对象的地图, 海部要素包括水深、等深线、海底地质等, 可用于支撑海上航行保障、资源开发、海洋划界和海洋军事活动等。本文从电子海图(Electronic Navigational Charts, 简称“ENCs”)读取的水深值作为海岸线 NCEI 船测水深缺失的补充。该 ENCs 数据按照 IHO S-57 格式进行收集和汇编, 由通过国际海道测量组织(IHO)

认证、中国人民解放军海军海道测量局(CNHO)授权的数据服务商提供, 其平面基准为 WGS-84 坐标系, 大部分深度在 100 m 以浅, 比例尺为 1:25 万, 共计 27 幅, 数据分布如图 1b 所示。

2.3 DBMs 数据集

选取 6 种不同分辨率、不同版本的常用 DBMs 产品作为融合数据源, 其空间分辨率、空间范围、空间基准、数据来源等信息见表 1, 预处理后的模型结果如图 2 所示。其中, TOPO 指 Global Seafloor Topography; DTU 指 Technical University of Denmark; ETOPO 指 Earth Topography; MSL 指 Mean Sea Level(平均海平面); SIO 指 Scripps Institution of Oceanography。

表 1 DBMs 数据集概况
Table 1 An overview of DBMs datasets

数据集	更新时间	组织机构	国家	分辨率	空间范围	水平基准垂直基准	数据来源
GEBCO_2022	2022	The Nippon Foundation-GEBCO	UK-Japan	15"	179° 59' 52.5"W~0° 179° 59' 52.5"E; 89° 59' 52.5"N~89° 59' 52.5"S	WGS84 MSL	https://download.gebco.net/
SRTM30_PLUS	2014	SIO	USA	30"	经度180°~0°~180°; 90°N~90°S	WGS84 MSL	https://topex.ucsd.edu/pub/srtm30_plus/srtm30/grd/
SRTM15_V2.5.5	2023	SIO	USA	15"	经度180°~0°~180°; 90°N~90°S	WGS84 MSL	https://topex.ucsd.edu/pub/srtm15_plus/
TOPO_25.1	2023	SIO	USA	1'	经度180°~0°~180°; 90°N~90°S	WGS84 MSL	https://topex.ucsd.edu/pub/global_topo_1min/
DTU10	2010	DTU Space	Denmark	1'	经度180°~0°~180°; 90°N~90°S	WGS84 MSL	https://ftp.space.dtu.dk/pub/DTU10/1_MIN/
ETOPO_2022	2023	NCEI	USA	15"	经度180°~0°~180°; 90°N~90°S	WGS84 MSL	https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model/

其中, GEBCO_2022 数据产品是 the Nippon Foundation-GEBCO Seabed 2030 计划的第 4 个版本, 基础主要来源于 SRTM15_PLUS, 最新区域数据和重力模型的使用, 使得 GEBCO_2022 对海底地形的描述更加详细; SRTM15_V2.5.5 汇聚了 3 亿多条新施测的水深航迹线, 其 15"分辨率下的数据采样率超过 11%; SRTM30_PLUS 分辨率为 30", 其海洋水深部分由 CryoSat-2 和 Jason-1 重力模型反演得到, 并利用 2.98 亿个测深数据对重力与地形的比值进行校正; TOPO_25.1 模型融合了 Cryosat-2、Jason-1 和 Envisat 多源卫星测高数据, 由 V29 全球重力异常模型反演得到, 其 1'的分辨率影响了地形细节。DTU10 模型由 ERS-1、GEOSAT 等卫星高度计重力异常反演得到, 并集成 GEBCO 早期数据集, 因此存在统计偏差, 对海底地形的表达不够清晰, 在平面上呈不连续的阶梯状分布。ETOPO_2022 采用了最新的 ICESat-2 数据和其他数据源, 其在反映重力异常长波信息的大陆架、海盆等区域精度高, 但

浅滩、暗礁等浅水区存在不确定性。

3 方法与实验

几乎所有的 DBMs 都是由卫星重力信息(重力异常或垂直重力梯度异常)反演得到, 在不同的海底区域存在的重力信息长短波分离误差、密度差常数误差等因素, 直接导致反演水深精度的不确定性, 例如海岸附近和深海区域^[5, 12]。所选用的 6 个 DBMs 各有优缺点, 不同区域的质量也不尽相同, 因此有必要对模型进行融合和优化。首先, 对所有数据和产品进行预处理, 包括格式转换、平面坐标和水深基准统一、分辨率统一、数据清洗等步骤; 然后, 对 DBMs 进行基于水深分区的加权融合, 包括地形分割和分区、模型对比与优选、分区加权融合、融合模型后处理等; 最后, 对模型融合结果进行多维评估。技术流程如图 3 所示。

3.1 数据预处理

(1) 测深数据格式转换

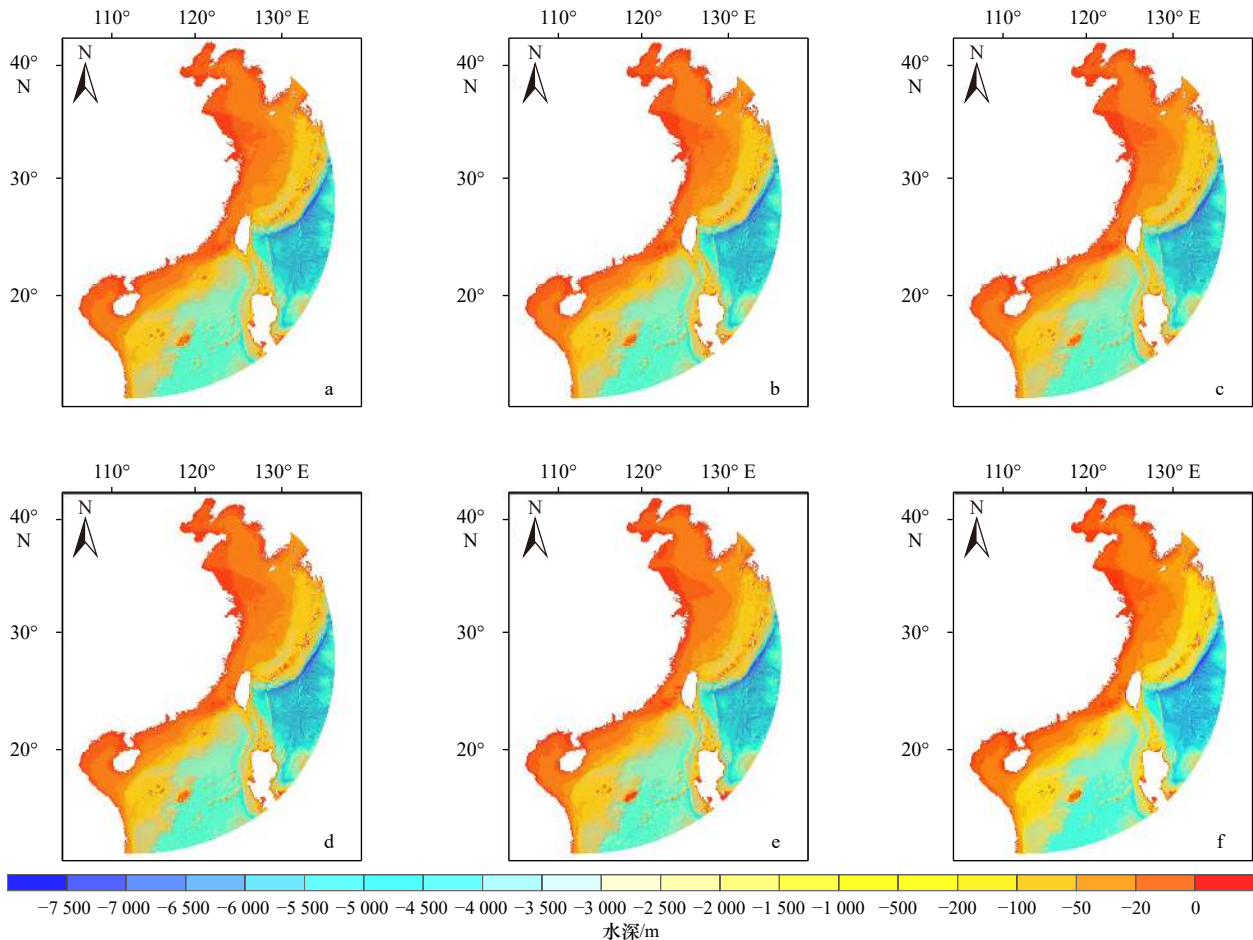


图2 研究区 DBMs. a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS; c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022

Fig. 2 DBMs in the study area. a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS; c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022

NCEI 全球海洋航迹地球物理原始数据以 M77T 方式存储, 包含 ASCII 文本格式的测深数据, 该格式包括标题记录和数据记录。其中, 标题记录提供每个调查对象的元数据, 数据记录提供测量机构的 ID、测量日期、时区、测点水深以及经纬度坐标。本文利用通用制图工具 GMT (Generic Mapping Tools) 集成的 MGD7/MGD77T 模块, 将 M77T 格式的测深数据合并转换为 XYZ ASCII 数据格式^[17]。

(2) 数学基准统一

数学基础的统一包括平面坐标、水深基准以及分辨率的统一。

空间基准的统一包括水平坐标基准和垂直基准统一。本文利用 Safe Software 软件集成的 FME 数据格式转换模块 (Feature Manipulation Engine), 将 NCEI 船测水深数据的水平基准转换为 WGS-84 坐标系, 同时将数据转换为 Esri shapefile 文件格式, 垂直基准为平均海平面 (MSL)。同样, S-57 格式的电子海图原始数据也转为 Esri shapefile 格式。

此外, 6 种水深产品数据类型不尽相同, 包括 netCDF、GeoTiff、Esri ASCII 等栅格类型, 本文将其统一为 GeoTiff 格式, 并投影为 Asia_North_Albers_Equal_Area_Conic 等面积投影坐标系。考虑到本研究待编辑和融合的水深产品最高空间分辨率为 15" (约 450 m), 融合前需将 6 个产品的空间分辨率统一为 15", 利用反距离权重插值法 (IDW) 将分辨率为 1' 和 30" 的数据产品分辨率插值为 15"。船测水深点的原始间距最小不足 1 m, 空间分辨率过高, 需要对原始船测水深点进行网格化, 保证每个水深栅格 (15"×15") 仅对应一个水深值。若一个栅格范围存在多点, 则栅格值用多个水深点的平均值代替。经过预处理的 6 个水深产品如图 2 所示。

(3) 数据清洗

为降低粗差等对精度估计结果的影响, 本文利用现有应用最广的水深产品之一 SRTM30_PLUS 数据集水深值作为参考数据, 按国际海道测量组织 IHO S-44 第 5 版有关规定剔除无效值 (corr_ = null, 或 corr_ ≥ 0 m), 并根据 pauta 准则对所有有效航次数据进行异

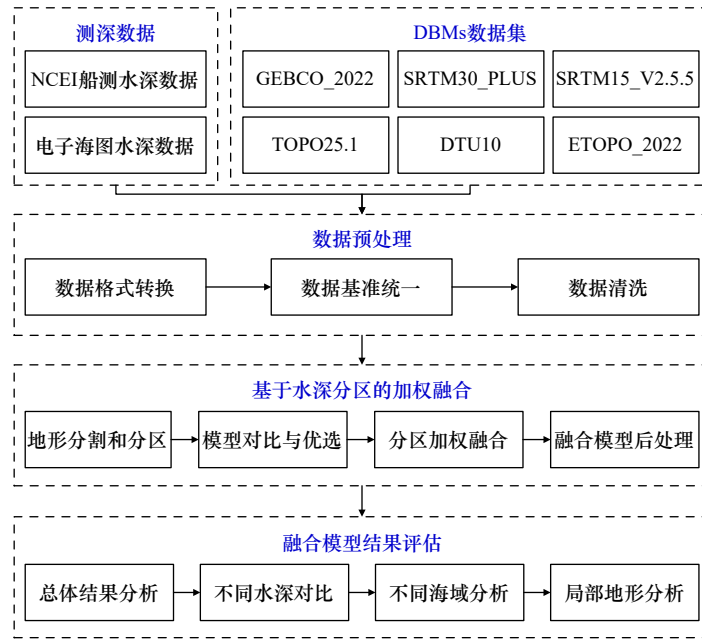


图3 模型融合框架

Fig. 3 The model fusion framework

常值检验和剔除^[18]。具体方法参考 SRTM30_PLUS 数据集编辑和生产过程^[9], 共剔除 8 860 个水深异常值, 预处理后的数据如图 1b 所示。

为验证处理后的 NCEI 船测水深数据可靠性, 构建了 NCEI 船测水深数据与 6 个 DBMs 水深值点位之间一一对应的空间相关矩阵(表 2), 结果证明相关系

数均接近于 1, 反映出几种数据源互相存在较高的总体相关性。进一步, 在船测水深数据与海图数据存在重叠的区域进行空间插值建立水深格网, 再利用船测水深提取格网水深值进行一致性验证, 结果如图 4 所示, 两者拟合较好, 相关系数达到 0.99, 证明处理后的 NCEI 船测数据具有一定可靠性和一致性。

表 2 NCEI 船测水深数据与 DBMs 的空间相关矩阵

Table 2 The spatial correlation matrix between NCEI ship-measured bathymetry data and DBMs

	船测水深	GEBCO_2022	SRTM30_PLUS	SRTM15_V2.5.5	TOPO_25.1	DTU10	ETOPO_2022
船测水深	1	0.999 0	0.998 6	0.999 0	0.998 0	0.992 0	0.999 0
GEBCO_2022	0.999 0	1	0.999 3	0.999 6	0.998 6	0.992 5	0.999 8
SRTM30_PLUS	0.998 6	0.999 3	1	0.999 2	0.999 1	0.992 8	0.999 1
SRTM15_V2.5.5	0.999 0	0.999 6	0.999 2	1	0.998 7	0.992 4	0.999 6
TOPO_25.1	0.998 0	0.998 6	0.999 1	0.998 7	1	0.993 3	0.998 5
DTU10	0.992 0	0.992 5	0.992 8	0.992 4	0.993 3	1	0.992 4
ETOPO_2022	0.999 0	0.999 8	0.999 1	0.999 6	0.998 5	0.992 4	1

3.2 数据融合

首先, 对基于实测水深数据对中国近海 DBMs 进行可靠性和适用性评估; 然后, 顾及水深和地形特征对研究区进行分割和分区, 并选取最优 DBMs 产品进行最优加权融合; 最后, 对融合结果进行实测值恢复、平滑滤波等后处理, 得到最终的融合 DBM(图 3)。

(1) 地形分割和分区

研究表明, 重力水深反演精度与地形特征高度相

关, 缓坡区明显高于海山区^[5]。因此, 为顾及不同模型对融合模型的贡献, 有必要对研究区进行分割和分区。本文基于水深范围和海底地形特征, 通过多尺度分割选定最优分割尺度, 该方法从像素层开始, 计算不同尺度参数下对象内均质性结果的局部方差, 以局部方差变化率最大值所相应的分割尺度为最优尺度, 从而保证分割对象内的均质性和对象间的异质性均得到最大化。最终将研究区划定 5 个地理子区域, 空

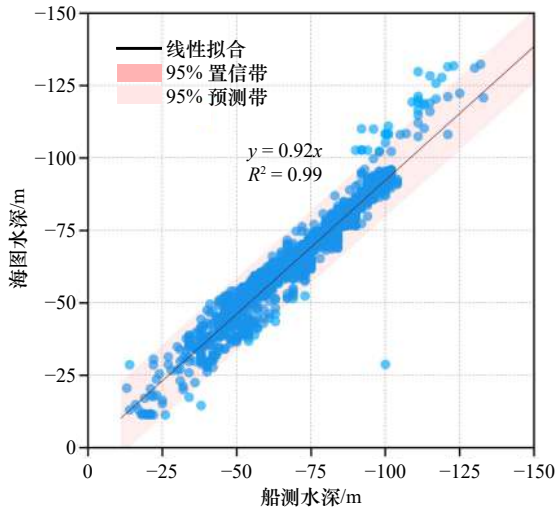


图4 NCEI 船测水深数据可靠性验证

Fig. 4 Reliability verification of NCEI ship-measured bathymetry data

白区域为陆地, 如图5所示。

(2) 模型对比与优选

利用处理后的实测数据对中国近海 DBMs 产品质量进行定量评估, 分析各自的可靠性和适用性, 作为分区内选择待融合模型的参考。本文采用平均绝对误差 (mean absolute error, 简称“MAE”)、标准差 (standard deviation, 简称“SD”)、均方根误差 (root mean square error, 简称“RMSE”) 等3个误差指标, 用于定量分析。其中, MAE 能表征在没有异常值情况下的水深值精度鲁棒性; SD 可用于用来衡量一组水深值自身的离散程度; RMSE 则能更准确地反映存在

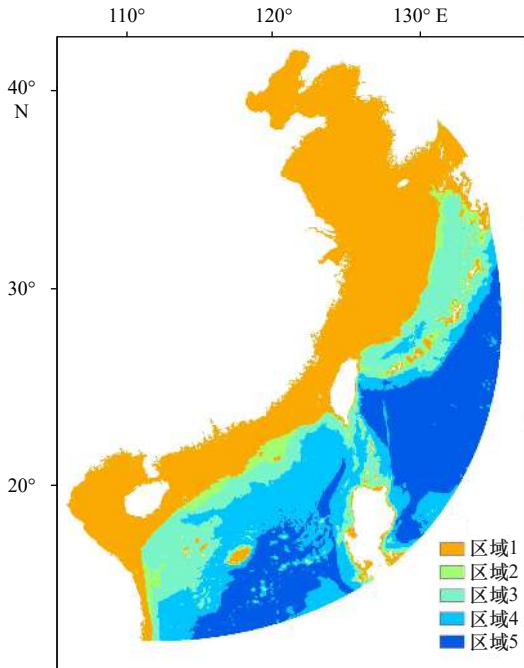


图5 分割分区结果

Fig. 5 The segmentation and partitioning results

异常值情况下的水深值误差分布。

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|, \quad (1)$$

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}, \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}, \quad (3)$$

式中, e_i 为原始 DBMs 的水深值与实测数据水深值作差得到的误差; \bar{e} 为误差均值; n 为参与计算的实测水深值点数。

此外, 采用决定系数 R^2 表征 DBMs 水深值与实测水深值的拟合程度, R^2 的值越接近 1, 说明二者的拟合程度越好。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}, \quad (4)$$

式中, d_i 为原始 DBMs 的水深值; \bar{d} 为原始 DBMs 的水深平均值。

(3) 分区加权融合

加权融合是一种简单实用的融合方法, 可以抑制原始 DBM 中的噪声^[4]。本文以最小误差 (RMSE) 为约束条件, 确定每个分区内待融合模型的最优融合权重。通过遍历权重分配确定多个水深产品的最优权重, 再利用线性加权平均, 计算最优融合结果, 具体步骤如图6所示。

$$\text{Bathymetry}_i = \text{DBM}_1 \times w_i + \text{DBM}_2 \times (1 - w_i), \quad (5)$$

式中, DBM_1 和 DBM_2 分别为待融合数字水深模型; w_i 为 DBM_1 对应的融合权重; Bathymetry_i 为经过加权融合的数字水深模型水深结果; 研究区分区权重分配结果见表3。

(4) 融合模型后处理

不同 DBMs 在水深分割边界处略有差异, 导致融合模型接缝处有空白, 为了形成质量更好的融合产品, 有必要对模型进行异常值剔除、平滑滤波等后处理, 因此本文提出一种实测点恢复和自适应滤波的模型后处理方法。由于研究区实测数据主要为离散的单波束水深数据, 经典的“Remove-Restore”后处理方法并不适用^[9], 提出通过实测点恢复和基于邻域统计的自适应平滑滤波方法, 对上一步融合后的地形模型进行优化。将实测点转化为规则格网, 与融合模型进行镶嵌可以实现融合模型的实测点恢复, 再通过异常值检测与滤波, 实现空洞填充, 减少地形异常值。具体步骤如下:

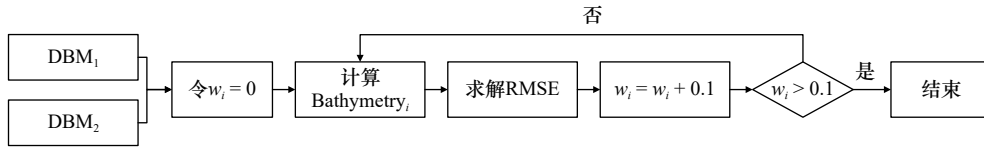


图 6 最优融合权重选取步骤

Fig. 6 The selection steps for the optimal fusion weights

表 3 最优融合权重分配表

Table 3 Distribution table for the optimal fusion weights

水深/m	RMSE(m)		权重分配		
	融合前	融合后	GEBCO_2022	ETOPO_2022	SRTM15_V2.5.5
0~-200	20.324	20.130	0.1	0.9	0
-200~-500	61.327	61.325	0.1	0.9	0
-500~-2 000	70.394	69.563	0.1	0.9	0
-2 000~-4 000	90.683	84.767	0.5	0	0.5
-4 000~-8 000	78.804	78.730	0.2	0.8	0

①利用自然邻域法将 Esri shapefile 的格式实测数据转为 15"×15"分辨率的规则栅格;②移去其在融合模型中的对应栅格,二者镶嵌恢复融合模型的实测点;③提取每个像素中心周围 3×3 窗口大小的邻域补丁块,计算

邻域像素与中心像素之间的差值,若差值大于 3 倍标准差,则将该中心像素判断为离群值(异常值);④利用邻域像素的均值替代异常值,同时实现原始地形产品中的空洞填充,从而达到滤除异常值的目的(图 7)。

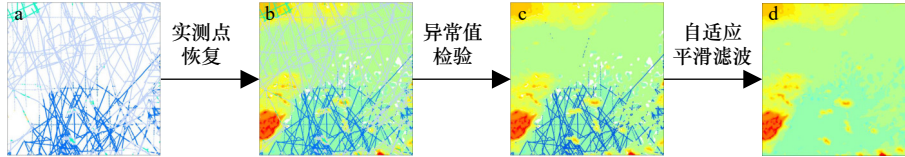


图 7 模型融合后处理

Fig. 7 Post-processing of model fusion

a. 15"×15"水深栅格; b. 镶嵌栅格; c. 邻域统计结果; d. 最终融合结果

a. 15"×15" bathymetric raster; b. mosaiced raster; c. neighbourhoo statistics results; d. final fusion result

4 结果与讨论

4.1 模型对比结果

(1) 整体分析

引入实测数据,以 6 个 DBMs 减去实测值得到的差异,进行定量评价,结果如图 8 所示。整体表现最好的 GEBCO_2022、SRTM15_V2.5.5、SRTM30_PLUS 和 ETOPO_2022 等 DBMs 产品,其误差范围主要在 -100~100 m 之间,占 80% 以上。从误差分布频率直方图(图 8 可见),差异总体呈现正态分布,其中 DTU10 模型以外,其余模型水深误差都趋于正值,说明模型水深比实测值更浅。其中, GEBCO_2022、SRTM15_V2.5.5 和 ETOPO_2022 的水深误差分布较为集中, R² 接近于 1,与实测值拟合结果最好。ETOPO_2022 的 RMSE、SD 以及 MAE 最小,整体精度较高,精度鲁棒

性好。6 个 DBMs 模型中有 2 个 SRTM 模型, SRTM15_V2.5.5 的分辨率为 15", SRTM30_PLUS 的分辨率为 30", 但是从整体结果来看,两者的精度相差不大, SRTM15_V2.5.5 的各项精度指标略好于 SRTM30_PLUS。DTU10 误差主要分布在 -500~500 m 之间,占总体差异的 85% 以上,误差较为离散,精度最差, R² 结果最低(0.99)。

(2) 航线对比分析

选取船测航线的实测数据对 6 个模型的地形细节进行分析,选取 EW9509 与 25 874 两条航线部分进行对比(图 9)。

对于航线 EW9509, GEBCO_2022、SRTM30_PLUS、SRTM15_V2.5.5、TOPO_25.1、DTU10 与 ETOPO_2022 的 R² 分别为 0.97、0.97、0.98、0.93、0.66 和 0.96。对于航线 25874, GEBCO_2022、SRTM30_PLUS、SRTM15_V2.5.5、TOPO_25.1、DTU10 与 ETOPO_2022 的 R² 分

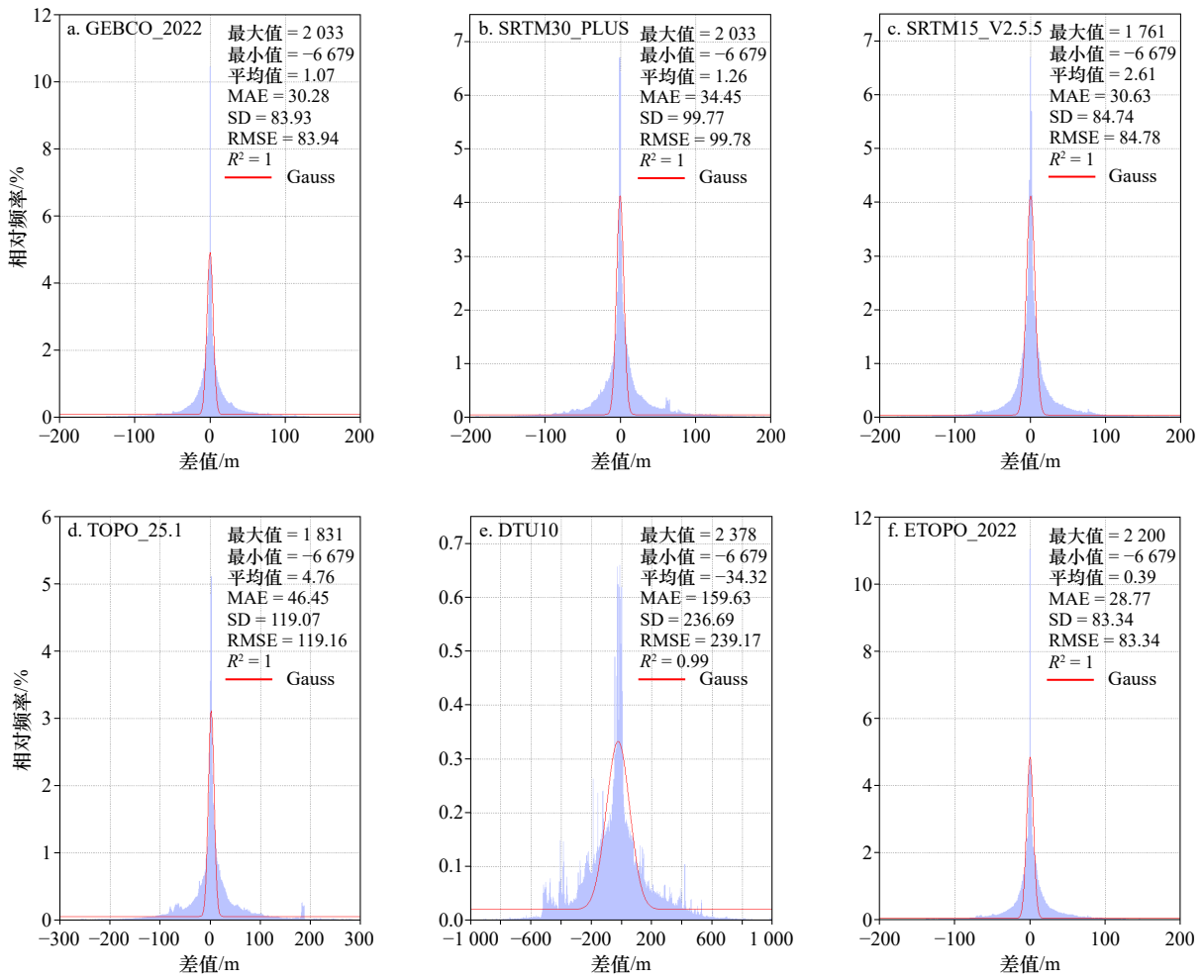


图 8 DBMs 与实测水深值的误差分布

Fig. 8 Distribution of differences between DBMs and measured bathymetry values

正值表示 DBM 水深比实测值浅, a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS; c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022

A positive value indicates that the DBM bathymetry is shallower than that of the measured values, a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS;

c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022

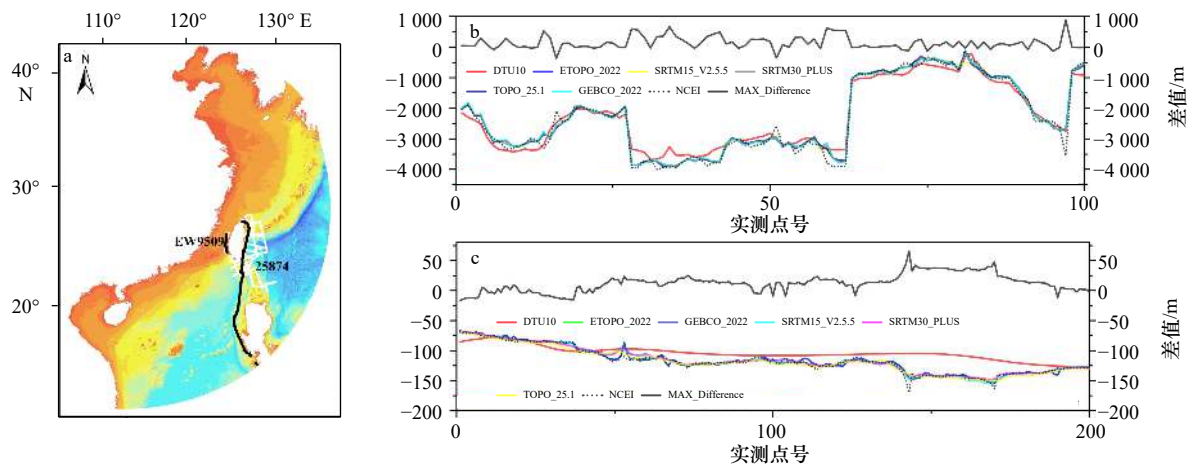


图 9 航线分析

Fig. 9 Route analysis

a. 航线位置; b. 25 874 航线剖面; c. EW9509 航线剖面 (黑点代表实测水深)

a. Route location; b. profile route 25 874; c. profile route EW9509 (the black spots represent measured bathymetry)

别为 0.70、0.76、0.66、0.63、0.58 和 0.70。通过计算每个航迹点位置 DBMs 水深值与实测值之差的最大值 (MAX_Difference), 证明 DBMs 的绝对差异与水深关系不大, 最大差异主要集中在海底地形变化剧烈的海域。明显可见在地形起伏较缓处, 除 DTU10, 5 个模型差异不大, 剖面线一致性较好。DTU10 模型整体曲线平滑, 细节丢失严重。

4.2 融合结果与讨论

(1) 总体结果分析

总体融合结果如图 10 所示。与原始 DBMs 相比, 融合的 DBM 总体精度得到了提高, 差异范围更小, 主要集中在 $-100 \sim 100$ m, RMSE 相比, SRTM30_PLUS、GEBCO_2022、SRTM15_V2.5.5 与 ETOPO_2022, 降低了 27%、14%、14% 和 13%。融合后的模型其 R^2 拟合结果最好, 误差分布比原始模型更为集中, 更加接近 1。

(2) 不同水深对比

不同水深范围融合前后结果对比如图 11 所示。与原始 DBMs 相比, 融合 DBM 在各个水深处的 RMSE 有所降低, $0 \sim -200$ m、 $-500 \sim -2000$ m、 $-2000 \sim -4000$ m 以及 $-4000 \sim -8000$ m 分别降低了 1.34 m、0.83 m、5.91 m 以及 0.07 m。其中在 $-2000 \sim -4000$ m 处效果提升最好, 但在 $-4000 \sim -8000$ m 的深海区

域, 该融合模型精度虽有提升, 但是提升效果有限, 也体现出公开水深模型在不同水深区域存在一定不确定性。

(3) 不同海域分析

不同海域(黄海、南海、东海)融合前后结果对比见表 4。实验结果表明, 不同海域内的精度指标均有提高。黄海的 MAE、SD 与 RMSE 等误差指标分别降低 4.5%、17%、17%。南海 3 个误差指标分别降低 33%、24% 与 24%, R^2 提高了 0.05。东海 3 个误差指标分别降低 60%、10.1%、8.3%, R^2 提高了 0.04。以上数据显示各个海域的提升效果不同, 南海精度提升效果最明显, 东海次之, 黄海精度提升效果最低。

(4) 局部地形分析

选择西沙群岛和琉球群岛局部及其邻近海域, 分别代表大型珊瑚礁发育的浅海复杂地形海域, 以及地形起伏大的深浅海过渡海域, 对融合前后的 DBMs 进行局部细节对比分析, 以及地形剖面分析。局部细节对比结果如图 12 和图 13 所示, 其中地形细节和异常值等特征用黑色虚线框标出。实验结果表明, 在西沙群岛海域, 融合后的 DBM 与 SRTM15_V2.5.5 和 GEBCO_2022 结果十分接近, 水深梯度分布类似, 海平面以上的珊瑚礁大小和位置一致(如图 12 黑色虚线框

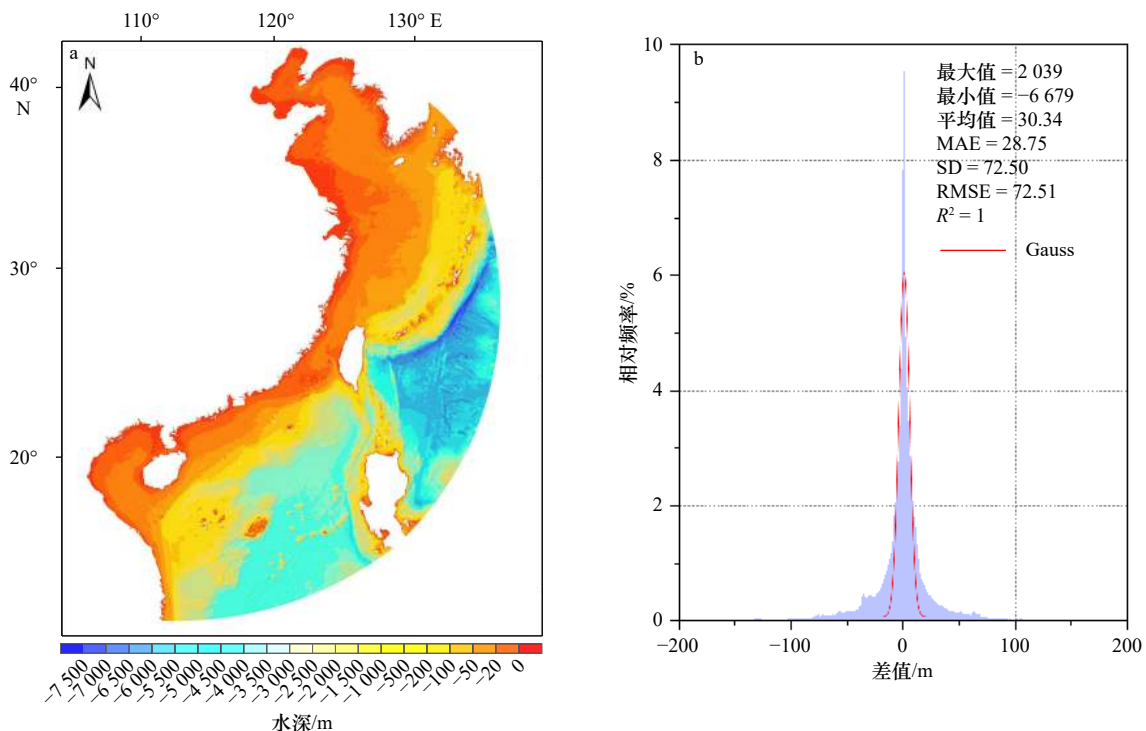


图 10 融合结果

Fig. 10 Fusion results

a. 融合模型可视化; b. 融合模型整体精度评估

a. Fusion model visualization; b. overall accuracy evaluation of fusion model

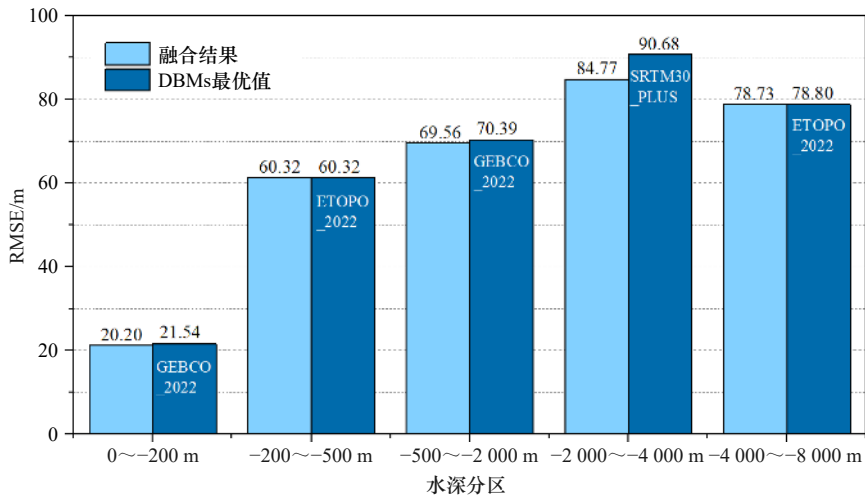


图 11 不同深度融合结果对比
Fig. 11 Comparison of fusion results at different depths

表 4 不同海域融合前后精度对比

Table 4 Accuracy comparison before and after fusion of different sea areas

地理分区		精度/m					R^2	
		最大值	最小值	平均值	MAE	SD		RMSE
黄海	融合前	795.88	-66.64	0.18	1.33	9.19	9.22	0.99
	融合后	675.91	-92.17	0.11	1.27	7.59	7.59	0.99
南海	融合前	949.08	-948.11	0.09	31.34	86.42	86.42	0.93
	融合后	3 601.89	-1 056.83	1.07	20.88	65.20	65.21	0.98
东海	融合前	1 180.18	-949.14	-1.40	26.94	67.02	67.04	0.89
	融合后	1 196.48	-1 522.43	-0.56	24.77	61.46	61.46	0.93

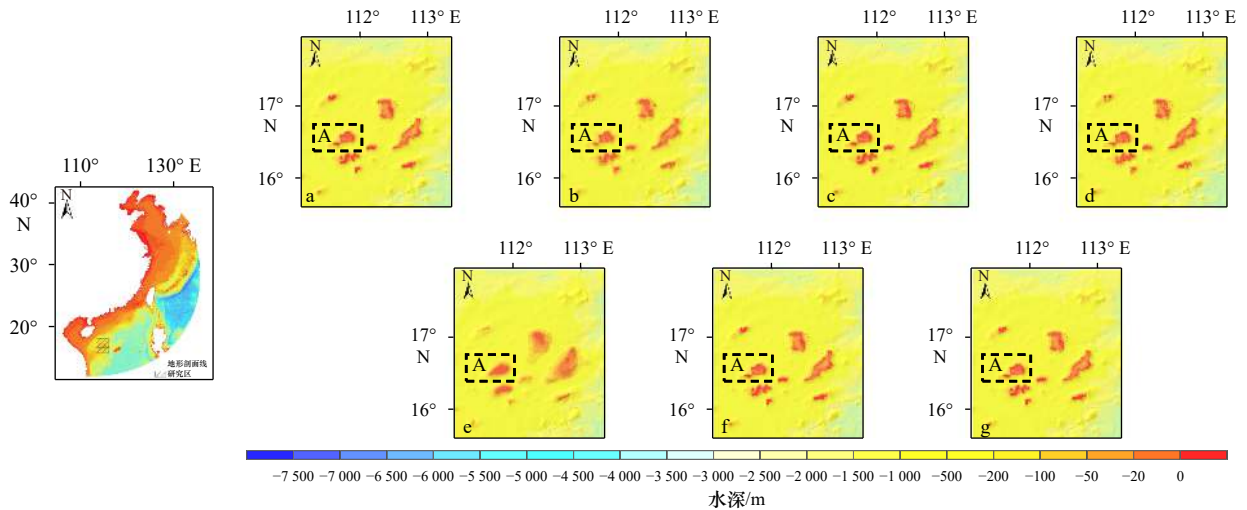


图 12 西沙群岛结果验证
Fig. 12 The result verification of Xisha Islands

a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS; c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022; g. 融合模型
a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS; c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022; g. Fusion model

A), 这也验证了 SRTM15_V2.5.5 和 GEBCO_2022 的原始实测数据来源相似。在地形起伏较大的琉球群岛海域, ETOPO_2022 与 GEBCO_2022 保留了深海与浅海过渡区域的更多细节, 而 ETOPO_2022 在深海区

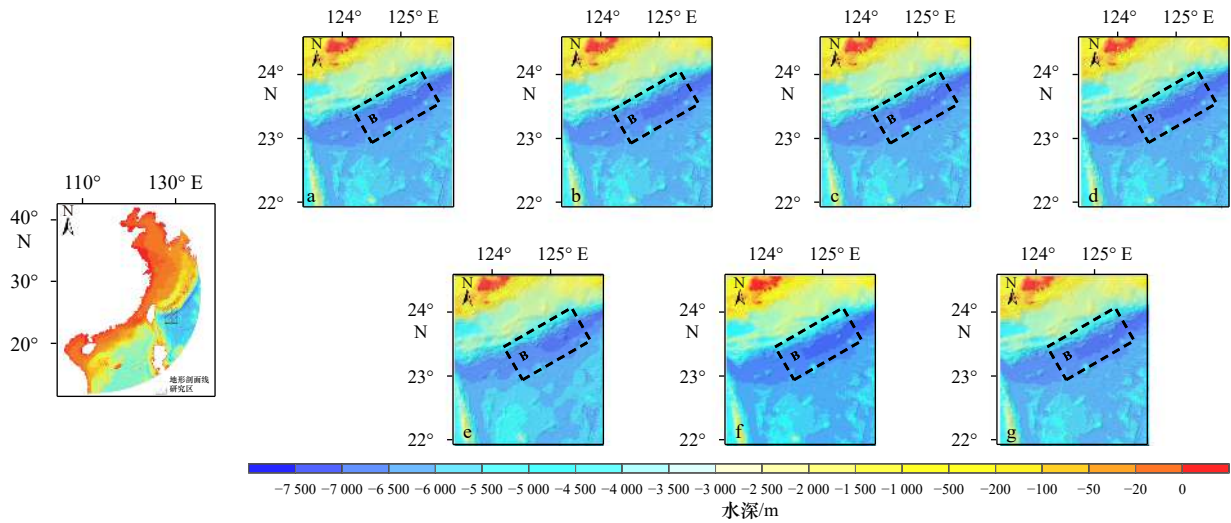


图 13 琉球群岛结果验证

Fig. 13 The result verification of Ryukyu Islands

a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS; c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022; g. 融合模型

a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS; c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022; g. Fusion model

域整体深度大于其他模型(如图 13 黑色虚线框 B)。整体来看,GEBCO_2022、ETOPO_2022 与融合后模型地形细节较丰富;DTU10 模型轮廓相对更为圆滑,虽然整体地形与其余模型类似,但水深细节丢失严重,分辨率不足的劣势凸显;TOPO_25.1 整体水深梯度与其余 DBMs 接近,但分辨率过低,使得地形细节模糊,尤其在在水深变化剧烈处出现大量异常值和明显噪声。

进一步由西向东、由北向南设置 1 000 个剖面点,绘制的西沙群岛及琉球群岛局部地形剖面如图 14 和图 15 所示。实验结果表明,DBMs 整体剖面相差不大,但细节存在差异。其中 GEBCO_2022、SRTM15_V2.5.5、ETOPO_2022 与融合模型在细节以及整体地

形变化上最为接近且地形细节清晰。DTU10 剖面过渡圆滑,但地形细节丢失严重。

5 结论

本文提出一种基于水深分区的加权融合重建框架,利用全球测深数据和全球公开的 6 种 DBMs 模型,实现了中国近海高精度无缝水深模型的更新和优化,得出以下主要结论:

(1)从多个维度对全球公开的 6 种 DBMs 模型进行可靠性和适用性分析,分析结果表明 GEBCO_2022、ETOPO_2022 和 SRTM30_PLUS 精度最优,但 ETOPO_2022 的整体水深大于其余模型。

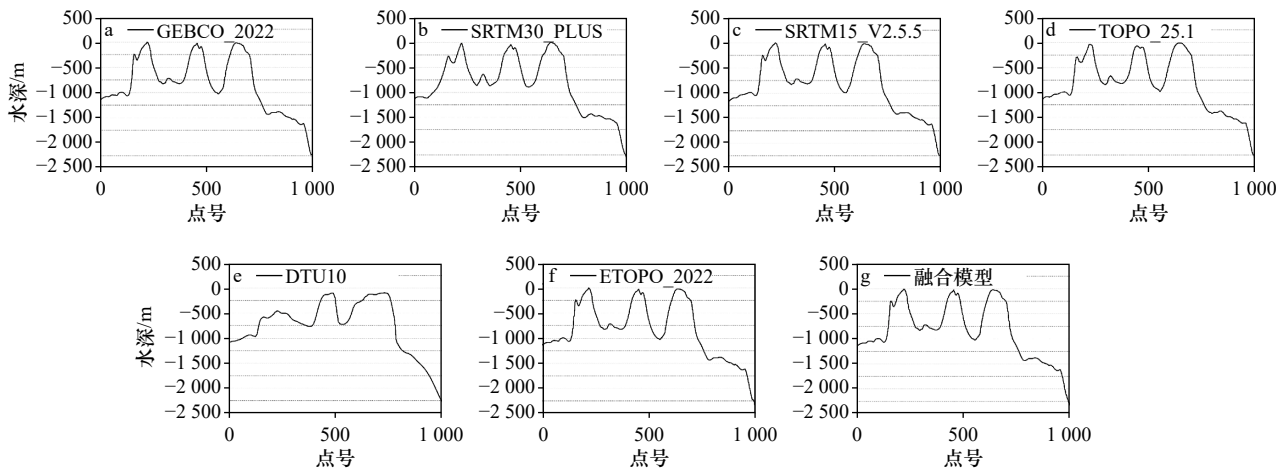


图 14 西沙群岛局部剖面

Fig. 14 Local section of Xisha Islands

a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS; c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022; g. 融合模型

a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS; c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022; g. Fusion model

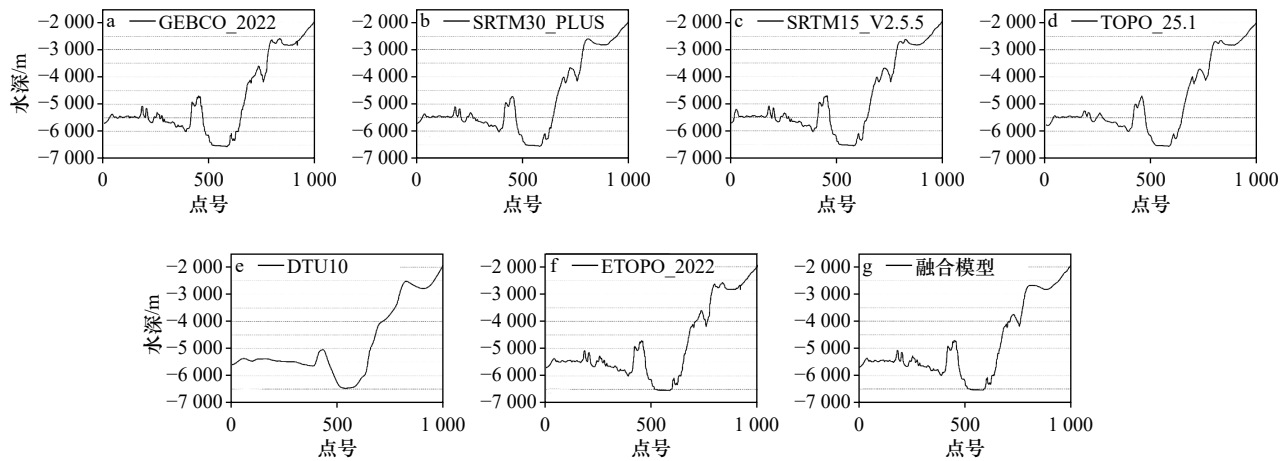


图 15 琉球群岛局部剖面

Fig. 15 Local section of Ryukyu Islands

a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS; c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022; g. 融合模型
a. GEBCO_2022; b. SRTM30_PLUS; c. SRTM15_V2.5.5; d. TOPO_25.1; e. DTU10; f. ETOPO_2022; g. Fusion model

(2)构建的中国近海 15"分辨率高精度无缝水深模型,其精度指标优于原始 DBMs 产品,与 SRTM30_PLUS、GEBCO_2022、SRTM15_V2.5.5 和 ETOPO_2022 相比, RMSE 分别降低了 27%、14%、14% 和 13%,地

形细节也得到保留,地形表达更加真实丰富。

(3)基于水深分区的加权融合方法的可行性得到验证,可用于多数据集大规模海底地形的融合重建和及时更新。

参考文献:

- [1] Sandwell D T, Müller R D, Smith W H F, et al. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure[J]. *Science*, 2014, 346(6205): 65–67.
- [2] 吴园涛, 段晓男, 沈刚, 等. 强化我国海洋领域国家战略科技力量的思考与建议 [J]. *地球科学进展*, 2021, 36(4): 413–420.
Wu Yuantao, Duan Xiaonan, Shen Gang, et al. Thoughts and suggestions on strengthening the national strategic scientific and technological forces in the marine field of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(4): 413–420.
- [3] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 359–365.
Zhang Jihong, Fang Jianguang, Tang Qisheng. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 359–365.
- [4] 陈义兰, 唐秋华, 刘晓瑜, 等. 多源水深数据融合的近海数字水深模型构建 [J]. *海洋科学进展*, 2021, 39(3): 461–469.
Chen Yilan, Tang Qiuhua, Liu Xiaoyu, et al. Construction of offshore digital bathymetric model based on multi-source bathymetric data fusion[J]. *Advances in Marine Science*, 2021, 39(3): 461–469.
- [5] Ruan Xiaoguang, Cheng Liang, Chu Sensen, et al. A new digital bathymetric model of the South China Sea based on the subregional fusion of seven global seafloor topography products[J]. *Geomorphology*, 2020, 370: 107403.
- [6] 董箭, 彭认灿, 张立华, 等. 滚动球变换的数字水深模型多尺度表达 [J]. *地球信息科学学报*, 2012, 14(6): 704–711.
Dong Jian, Peng Rencan, Zhang Lihua, et al. Multi-scale representation of digital depth model based on rolling ball transform[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2012, 14(6): 704–711.
- [7] 阳凡林, 沈瑞杰, 梅赛, 等. 联合重力异常和重力垂直梯度异常数据反演皇帝山海域海底地形 [J]. *海洋学报*, 2022, 44(12): 126–135.
Yang Fanlin, Shen Ruijie, Mei Sai, et al. Inversion of seafloor topography in Emperor Seamount sea area by combined gravity anomalies and vertical gravity gradient anomalies data[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(12): 126–135.
- [8] Weatherall P, Marks K M, Jakobsson M, et al. A new digital bathymetric model of the world's oceans[J]. *Earth and Space Science*, 2015, 2(8): 331–345.
- [9] Becker J J, Sandwell D T, Smith W H F, et al. Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS[J]. *Marine Geodesy*, 2009, 32(4): 355–371.
- [10] Fan Diao, Li Shanshan, Feng Jinkai, et al. A new global bathymetry model: STO_IEU2020[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(22): 5744.
- [11] Leon J X, Phinn S R, Hamylton S, et al. Filling the 'white ribbon' – a multisource seamless digital elevation model for Lizard Island, northern Great Barrier Reef[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(18): 6337–6354.
- [12] Tozer B, Sandwell D T, Smith W H F, et al. Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+[J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(10): 1847–1864.

- [13] 刘洋, 吴自银, 赵荻能, 等. MF 多源测深数据融合方法及大洋水深模型构建 [J]. *测绘学报*, 2019, 48(9): 1171–1181.
Liu Yang, Wu Ziyin, Zhao Dineng, et al. The MF method for multi-source bathymetric data fusion and ocean bathymetric model construction[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(9): 1171–1181.
- [14] Okolie C J, Smit J L. A systematic review and *meta*-analysis of digital elevation model (DEM) fusion: pre-processing, methods and applications[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 188: 1–29.
- [15] 岳林蔚, 沈焕锋, 袁强强, 等. 基于深度置信网络的多源 DEM 点面融合模型 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2021, 46(7): 1090–1097.
Yue Linwei, Shen Huanfeng, Yuan Qiangqiang, et al. A multi-source DEM point-surface fusion model based on deep belief network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 1090–1097.
- [16] Guan Liyi, Hu Jun, Pan Hongbo, et al. Fusion of public DEMs based on sparse representation and adaptive regularization variation model[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 169: 125–134.
- [17] Wessel P. Tools for analyzing intersecting tracks: the x2sys package[J]. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(3): 348–354.
- [18] Tunalioglu N, Ocalan T, Dogan A H. Precise point positioning with GNSS raw measurements from an Android smartphone in marine environment monitoring[J]. *Marine Geodesy*, 2022, 45(3): 274–294.

Digital bathymetric model fusion of offshore waters around China's coastline based on global bathymetry data

Ruan Xiaoguang^{1,2}, Zhan Zhaojie¹, Yan Zhaojin³, Tan Qiuying⁴, Guo Meijing⁵, Yang Yang¹

(1. College of Geomatics, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 2. Nansun Innovation Institute, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 3. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Zhejiang Highway Technicians College, Hangzhou 311300, China; 5. The Academy of Digital China, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Digital bathymetric models (DBMs) are important basic geographic information data in the fields of offshore engineering construction, resource development, environmental protection and so on. The existing global public DBMs products such as GEBCO (The General Bathymetric Chart of the Oceans), SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission) and ETOPO (Earth Topography) have different data types, data sources and product accuracy in different sea areas. In order to reconstruct China's offshore bathymetric model using global bathymetric data and DBMs products, this paper proposed a weighted fusion reconstruction framework based on bathymetric partition. Firstly, the reliability and applicability of six commonly used DBMs products (GEBCO_2022, SRTM30_PLUS, SRTM15_V2.5.5, TOPO_25.1, DTU10, ETOPO_2022) were compared and analyzed in five dimensions (overall accuracy, different water depths, route profiles, geographical partitions, local details). Then, considering the bathymetric and topographic characteristics, the study area was segmented and partitioned, and the optimal DBMs products in the partition were selected, and the optimal weighted fusion was carried out with the minimum error as the constraint. Finally, the fusion results were processed by measured value recovery, smooth filtering and other post-processing to form a high-precision seamless bathymetric model with 15" resolution in offshore waters around China's coastline. The results showed that the RMSE of the fusion results was reduced by 27%, 14%, 14% and 13% compared with SRTM30_PLUS, GEBCO_2022, SRTM15_V2.5.5 and ETOPO_2022, and the details of the topography were also retained. The feasibility of the fusion framework was proved, which could provide a reference for the fusion reconstruction and timely updating of large-scale seabed topography from multiple datasets.

Key words: digital bathymetric model; multi-source data fusion; bathymetry; seabed topography; China's coastline