

LIU Qiankun, CHEN Zhaoyu, XU Ke. Global High-resolution Marine Gravity Field Model Fused from Altimetry-derived Gravity and Shipborne Gravity (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, 46(3): 850–858. CSTR:32142.14.cjss.2025–0138. DOI:10.11728/cjss2026.03.2025–0138

数据论文

卫星测高重力与船测重力协同融合的全球 高分辨率海洋重力场模型

刘乾坤¹ 陈兆钰^{1,2} 许可¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 海洋重力场是地球系统的重要物理场, 船测重力与卫星测高重力是其高分辨率建模的主要数据源, 然而, 船测重力数据的空间覆盖在全球范围内稀疏且不均匀, 单一测高重力模型在特定区域往往存在精度局限或覆盖不全的问题. 本文利用西太平洋海域 (120°E–170°E, 0°–50°N) JAMSTEC 高密度船测重力数据, 基于国际上两大测高重力场系列模型的新版本 DTU21 和 SIOv32.1, 建立重力模型误差与 SRTM15v2.4 水深的对应关系, 通过对两个模型进行加权融合, 并对极区进行特殊处理, 生成全球 1'×1' 网格海洋重力异常模型 FUSION_V1.0. 该模型包含经度、纬度和重力异常变量, 覆盖全球海洋 (90°S–90°N, 180°W–180°E), 采用最为简单通用的地理坐标系 (即等经纬度投影), 以 NetCDF 格式存储, 支持主流科研软件读取. 本数据集可为海底地形反演、海洋地球物理研究和空间科学应用提供高质量基础数据.

关键词 海洋重力场, 卫星测高, 船测重力, 多源融合, 重力异常, 水深, 全球网格

中图分类号 P228, P223

数据库 (集) 基本信息

数据库(集)名称	卫星测高重力与船测重力协同融合的全球高分辨率海洋重力场模型(FUSION_V1.0)
数据通信作者	许可 (xuke@mirslab.cn), 刘乾坤 (liuqiankun@nssc.ac.cn)
数据作者	刘乾坤, 陈兆钰, 许可
数据空间范围	纬度90°S–90°N, 经度180°W–180°E
数据分辨率	1' × 1' 网格
数据量	1.65 GByte
数据格式	*. NetCDF
数据库(集)访问网址	https://doi.org/10.57760/sciencedb.space.02951
基金项目	中国科学院国家空间科学中心青年创新课题项目 (E3 PD40016 S)
数据库(集)组成	模型数据集由一个NetCDF文件组成, 包含三个变量, 其中lon表示经度; lat表示纬度; grav表示二维重力异常网格, 单位为mGal

2025-08-01 收到原稿, 2026-02-24 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Global High-resolution Marine Gravity Field Model Fused from Altimetry-derived Gravity and Shipborne Gravity

LIU Qiankun¹ CHEN Zhaoyu^{1,2} XU Ke¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The marine gravity field is a crucial physical field of the Earth system, with shipborne and satellite altimetry-derived gravity data serving as the primary sources for its high-resolution modeling. However, shipborne gravity data is sparsely and unevenly distributed globally, while single altimetry-derived gravity models exhibit accuracy limitations or incomplete coverage in specific regions. This study utilized high-density shipborne gravity data from the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) in the western Pacific Ocean (120°E–170°E, 0°–50°N). Based on the latest versions of two major global altimetry-derived gravity field models, DTU21 and SIOv32.1, it establishes correlations between the gravity model errors verified by shipborne gravity and water depths from SRTM15v2.4 model. Through weighted fusion and special processing for polar regions, a global 1'×1' gridded marine gravity anomaly model, FUSION_V1.0, was generated. This model includes longitude, latitude, and gravity anomaly variables, covering the global ocean (90°S–90°N, 180°W–180°E) and adopting the simplest and most widely used geographic coordinate system (*i.e.*, equiangular projection), stored in NetCDF format for compatibility with mainstream scientific software. This dataset can provide high-quality foundational data for seafloor topography recovery, marine geophysical research, and related space science applications.

Key words Marine gravity field, Satellite altimetry, Ship gravity, Multi-source fusion, Gravity anomaly, Water depth, Global grid

Database/Dataset Profile

Title	Global High-Resolution Marine Gravity Field Model Fused from Altimetry-Derived Gravity and Shipborne Gravity (FUSION_V1.0)
Data Corresponding Author	XU Ke (xuke@mirslab.cn), LIU Qiankun (liuqiankun@nssc.ac.cn)
Data Author (s)	LIU Qiankun, CHEN Zhaoyu, XU Ke
Spatial Range	This model is a 2D grid for global ocean gravity anomalies, covering latitude from 90°S to 90°N and longitude from 180°W to 180°E
Data Spatial Resolution	1' × 1' grid
Data Volume	1.65 GByte
Data Format	*, NetCDF
Database/Dataset URL	https://doi.org/10.57760/sciencedb.space.02951
Source (s) of Funding	Youth Innovation Project of National Space Science Center of Chinese Academy of Sciences (E3 PD40016 S) that support the generation of this database /dataset
Dataset/Database Composition	This dataset consists of a single NetCDF file containing three variables: the variable lon represents longitude; the variable lat represents latitude; and the variable grav represents a two-dimensional gravity anomaly grid in milligals

0 引言

海洋重力场是地球系统的重要物理场,在海底地形反演、水下匹配导航、板块构造研究、海底火山研究、海底资源勘探等方面都具有重要的应用价值^[1-4].传统船测重力数据精度高但其覆盖全球范围稀疏且极不均匀,部分海域几乎实现了高分辨率测绘的完整覆盖,而在某些海域(例如南太平洋)仍存在大面积未测绘的空白区域,难以满足当前全球高分辨率海洋重力场建模的迫切需求^[5].卫星高度计基于其快速的全球覆盖能力,已成为全球高分辨率海洋重力场建模的主要数据源.在基于卫星高度计反演的全球海洋重力场模型中,斯克里普斯海洋研究所(SIO)和丹麦技术大学(DTU)构建的海洋重力场系列模型最具代表性,两类系列模型虽能实现全球覆盖,但单一模型在特定区域往往存在精度局限或覆盖不全的问题^[6,7].

EGM2008模型是美国国家地理空间情报局发布的最高为2159阶次的地球重力场模型(5'×5'网格分辨率),至今仍是国际上工程与科研的核心参考模型,其海洋重力场集成了DTU系列和SIO系列模型的早期版本,即距海岸线195 km以内DNSC07数据为主;195~280 km为过渡区;280 km以外远洋区采用SIOv18.1数据^[8].与EGM2008模型基于海岸线距离的分区拼接方法不同,本团队在前期研究中提出了一种基于水深的全球海洋重力场模型融合方法,无需人工设定分区边界值,利用局部高精度船载重力数据建立测高重力模型误差与水深的定量关系,旨在生成一套兼具高精度与全球无缝覆盖特性的重力场模型,为相关领域研究提供更可靠的数据支撑^[9-11].

1 数据与处理方法

1.1 数据集介绍

1.1.1 JAMSTEC 船测重力数据

日本国立海洋研究开发机构(JAMSTEC)通过其DARWIN(Data and Sample Research System for Whole Cruise Information)数据系统,系统性地公开了其科考船从20世纪90年代持续至今在全球海洋获取的船测重力数据^{*}.JAMSTEC公开的船测

重力数据主要来自JAMSTEC组织实施的科学考察航次,在重点研究海域(例如日本周边海域)会形成高精度、高密度的数据集.官方技术文档显示,各航线搭载的船载重力仪(例如KSS系列或类似型号)标称精度通常优于 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$,沿航迹的实际采样极短(典型值为100~200 m).此外,JAMSTEC发布的数据均经过规范化的预处理,包括粗差剔除、仪器线性漂移校正、厄特沃什改正以及海面大气压校正等关键步骤,部分航次数据还会通过与已知绝对重力点的比对进行进一步校准.JAMSTEC船测重力数据采用统一标准的先进设备与严格质量控制,因此其数据内部一致性较好,被国际学术界广泛视为基准数据,常被用于验证卫星重力模型^[12].

1.1.2 SRTM15+ v2.4 水深数据

SRTM15+是由美国斯克里普斯海洋研究所发布的15"分辨率的全球数字地形模型,该模型海洋部分通过将卫星测高重力异常反演得到的水深作为背景场,在此基础上同化了海量的船载多波束与单波束测深数据,提供了覆盖全球(90°S—90°N, 180°W—180°E)海洋和陆地的连续高程信息^[13].版本v2.4于2021年发布,增加了大量新的船测观测数据,并利用IBCAO V4水深模型填补了北纬80°以上的极区海域,从而显著改善了高纬度地区和船测数据覆盖区的精度.其数据源时间跨度较大,整合了历史上的船测数据以及最新的观测成果,代表了截至当时对海底地形的最新认知.SRTM15+ v2.4是当前国际上应用广泛、质量受到公认的海底地形模型之一,可以从斯克里普斯海洋研究所的官方网站上获取^{**}.

1.1.3 DTU21 测高重力场数据

DTU系列全球重力场模型由丹麦技术大学研制发布,该系列模型通过系统融合多代卫星测高数据(包括CryoSat-2, Sentinel-3 A/B, Jason系列等),并结合EGM2008全球重力模型进行数据融合,实现了真正意义上的全球无缝覆盖.其技术核心在于深度处理并融合了CryoSat-2卫星的SAR(合成孔径雷达)与SARin(合成孔径雷达干涉)模式数据.DTU系列模型通过融合Cryosat-2等高倾角卫星数据,将重力场反演范围扩展至传统模型难以覆盖的高纬度海冰边缘区(北至88°N),显著改善了格陵兰和南极

* <https://www.godac.jamstec.go.jp/darwin/>

** <https://topex.ucsd.edu/pub/srtm15/>

周边冰缘海域的数据覆盖。对于永久冰盖内陆区, 该系列采用 EGM2008 进行数据填补, 以确保全球范围的完整覆盖^[14]。此外, 该系列模型通过精细的海洋动力地形信号移除与区域性潮汐校正, 有效抑制了长波长误差。DTU21 作为该系列的最新版本, 延续了上述技术优势, 代表了当前基于多源数据融合的全球重力场建模前沿, 目前该数据集尚未正式对外公开。

1.1.4 SIOv32.1 测高重力场数据

SIOv32.1 全球海洋重力场模型由美国斯克里普斯海洋研究所 (SIO) 于 2022 年发布, 被国际学术界广泛视为当前分辨率最高、噪声控制最优的模型之一。该版本在继承前期成果的基础上, 通过融合新增的卫星周期数据, 并采用多项创新处理技术以提升数据质量: 采用波长更短 (30 km) 的有效波高平滑滤波器, 结合最优海况偏差校准, 显著抑制了短波长海洋噪声; 应用 3 km 陆地掩膜技术, 有效削弱了近岸波形污染与边缘效应, 提升了沿海地区的精度; 对多源卫星数据实施了统一的波形重跟踪处理, 提高了海面斜率计算的可靠性^[15]。需要特别指出的是, SIOv32.1 的覆盖范围严格限定于开放海洋及冰缘区, 不包括格陵兰和南极大陆的永久冰盖内部。这是由其海洋优先的生成策略决定的, 旨在保证在可反演海域内模型的高质量与一致性。该数据集是海洋地球物理研究的重要数据源, 可在线公开获取^{*}。

1.2 处理方法

参照已有的研究成果^[11], 利用 JAMSTEC 的局部高密度船测重力数据建立卫星测高重力模型 DTU21 和 SIOv32.1 的误差与 SRTM15v2.4 水深的对应关系, 构建全球高分辨率重力场融合模型 FUSION_V1.0。其数据处理流程如图 1 所示, 包括 5 个步骤, 分别是典型海域水深分段、模型误差-水深关系建立、加权融合因子计算、多源数据全球融合和极地地区特殊处理。

步骤 1: 典型海域水深分段

西太平洋局部海域 (120°E–170°E, 0°–50°N) 是海洋重力场研究的理想区域, 具备以下典型特征: 涵盖大陆架、海沟、海山链等构造, 水深范围从浅海延伸至马里亚纳海沟, 提供了全水深覆盖的天然实验场; 复杂的地貌导致重力场空间变异性强, 适用于模型训练与精度验证。此外, 日本周边海域分布有密集

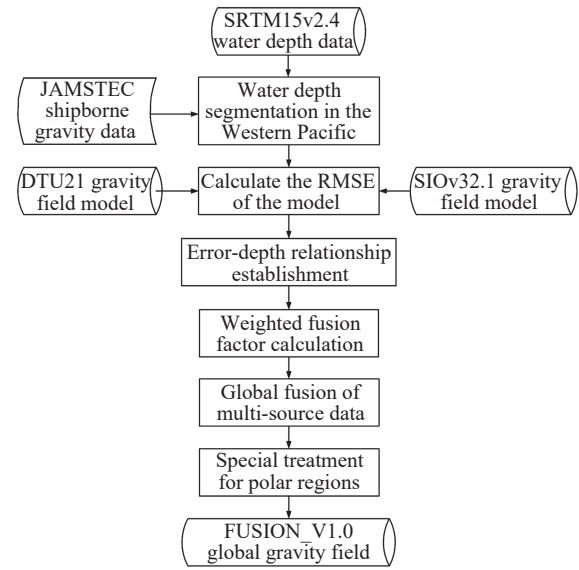


图 1 全球重力场融合模型 FUSION_V1.0 构建流程

Fig. 1 Flow chart of the construction of the global gravity field fusion model FUSION_V1.0

的 JAMSTEC 船测重力数据, 包括 636 条经过质量控制的航线, 为高精度重力场建模提供可靠基准。

以覆盖全水深的西太平洋海域作为训练区域, 将 SRTM15 v2.4 高分辨率地形模型在该海域的水深数据按 100 m 为步长进行分段, 并统计该训练区域内不同水深分段区间的 JAMSTEC 船测重力数据, 有

$$S_{\text{DEPTH},j} \ni \Delta g_{\text{SHIP},i}, i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M.$$

其中, M 为水深分段数目, N 为在第 j 段水深区间的船测重力点数。

步骤 2: 误差 - 水深关系建立

以经过质量控制的 JAMSTEC 船测重力数据为真值, 分别在不同水深分段区间计算两个测高海洋重力场的均方根误差, 有

$$R_{\text{SIO}32,j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta g_{\text{SIO}32,i} - \Delta g_{\text{SHIP},i})^2}{N}}, i = 1, 2, \dots, N.$$

$$R_{\text{DTU}21,j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta g_{\text{DTU}21,i} - \Delta g_{\text{SHIP},i})^2}{N}}, i = 1, 2, \dots, N.$$

式中, j 表示水深分段, i 表示在第 j 段水深区间的船测重力点。汇总两个模型在不同水深分段区间的误差, 建立两个测高重力场模型误差与水深的对应关系。

* https://topex.ucsd.edu/pub/global_grav_1_min/

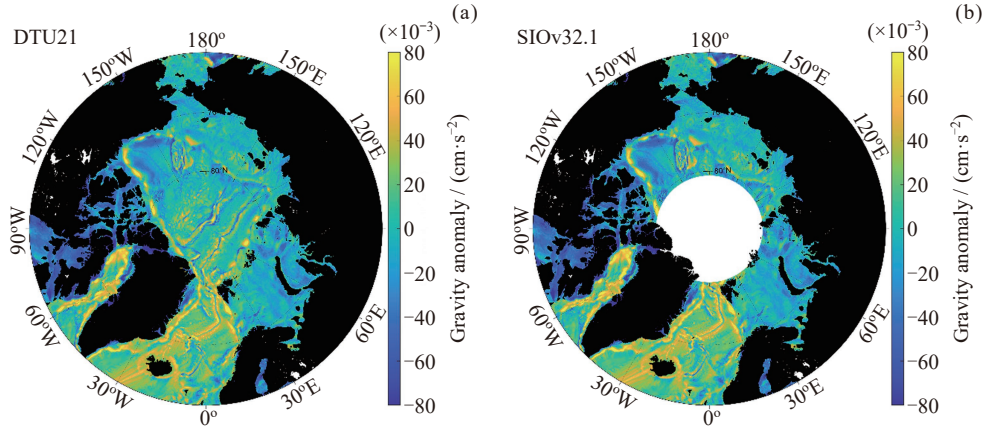


图2 DTU21重力场和SIOv32.1重力场数据在北极区域的覆盖情况

Fig. 2 Coverage of DTU21 gravity field and SIOv32.1 gravity field data in the Arctic region

步骤3: 加权融合因子计算

根据全球范围内的 SRTM15v2.4 水深信息, 利用测高重力场误差与水深的对应关系预测两个全球测高重力场模型每个网格点处各自对应的误差, 然后分别计算两个测高重力场模型在不同水深段的加权融合因子, 有

$$P_{\text{SIO32},j} = \frac{R_{\text{DTU21},j}^2}{R_{\text{SIO32},j}^2 + R_{\text{DTU21},j}^2},$$

$$P_{\text{DTU21},j} = \frac{R_{\text{SIO32},j}^2}{R_{\text{SIO32},j}^2 + R_{\text{DTU21},j}^2}.$$

步骤4: 多源数据全球融合

基于全球网格点的 SRTM15 v2.4 水深信息, 通过每个水深段对应的加权因子将两个测高重力场模型加权融合, 计算全球范围内每个网格点的重力值

$$\Delta g_{\text{FUSION,grid}} = P_{\text{SIO32},j} \cdot \Delta g_{\text{SIO32,grid}} + P_{\text{DTU21},j} \cdot \Delta g_{\text{DTU21,grid}}.$$

步骤5: 极地区域特殊处理

以北极区域为例 (见图2), DTU21 重力场数据在高纬极地区域完全覆盖, 而 SIOv32.1 重力场数据覆盖最大纬度仅到 80° , 在高纬极地区域存在数据空白. 因此, 在高纬度极地海域, 完全采用 DTU21 重力数据. 在极地区域 (南北纬 80° 以上) 的数据处理中, 这里对 DTU21 数据实施了以下简要的质量控制流程: 首先, 进行数据有效性检查, 以确保 DTU21 数据在极区网格点上无缺失值或无效值; 然后, 依据全球重力场的物理特征和极区已知的地球物理模型, 设定重力异常值的合理范围 ($-200 \times 10^{-3} \sim +200 \times 10^{-3}$

$\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$), 剔除明显超出此范围的异常值.

因此, 对于南北纬 80° 以上极地区域内每个网格点的重力值计算, 不论水深分布, 统一将权重设定为

$$P_{\text{SIO32}} = 0,$$

$$P_{\text{DTU21}} = 1.$$

北极区域融合权重分布如图3所示, 80°N 以下区域 DTU21 重力场数据和 SIOv32.1 重力场数据加权融合; 在 80°N 以上区域 DTU21 重力场数据权重为 1, SIOv32.1 重力场数据权重为 0. 可得

$$\text{GRAV}^{\text{FUSION}}|_{\geq 80} = \text{GRAV}^{\text{DTU21}}.$$

最终, 构建得到全球完全覆盖的高分辨率全球重力场融合模型 FUSION_V1.0.

2 数据样本描述

全球重力场融合模型 FUSION_V1.0 以 NetCDF-3/CDM 文件类型存储, 如图4所示. 该模型包含三个变量, 图4中 lon 表示经度; lat 表示纬度; grav 表示二维重力异常网格, 单位为 mGal ($1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$).

作为全球范围的数据集, 模型采用最为简单通用的地理坐标系 (即等经纬度投影), 将全球数据投影于规则的经纬度方格 (见图5). 截取变量 grav 的部分二维重力异常网格数据, 如图6所示, 覆盖南北纬 90° , 经度 $0^\circ - 360^\circ$, 且经纬度间隔均为 0.01666667° , 即 $1' \times 1'$ 分辨率网格.

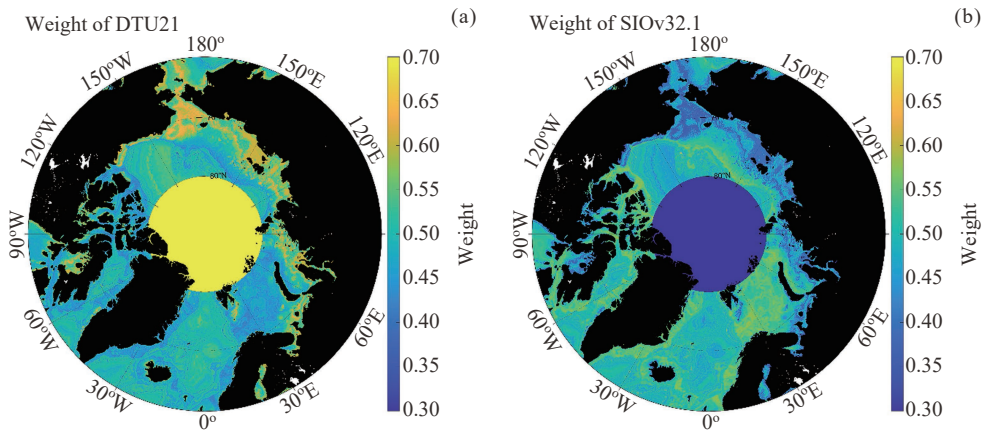


图 3 DTU21 重力场和 SIOv32.1 重力场数据在北极区域的融合权重分布

Fig. 3 Distribution of the fusion weights of DTU21 and SIOv32.1 gravity field data in the Arctic region

Name	Long Name	Type
 FUSION_V1.0.nc	FUSION_V1.0.nc	Local File
 grav	Gravity anomaly	Geo2D
 lat	Latitude	1D
 lon	Longitude	1D

图 4 全球重力场融合模型 FUSION_V1.0 的数据结构

Fig. 4 Data structure of the global gravity field fusion model FUSION_V1.0

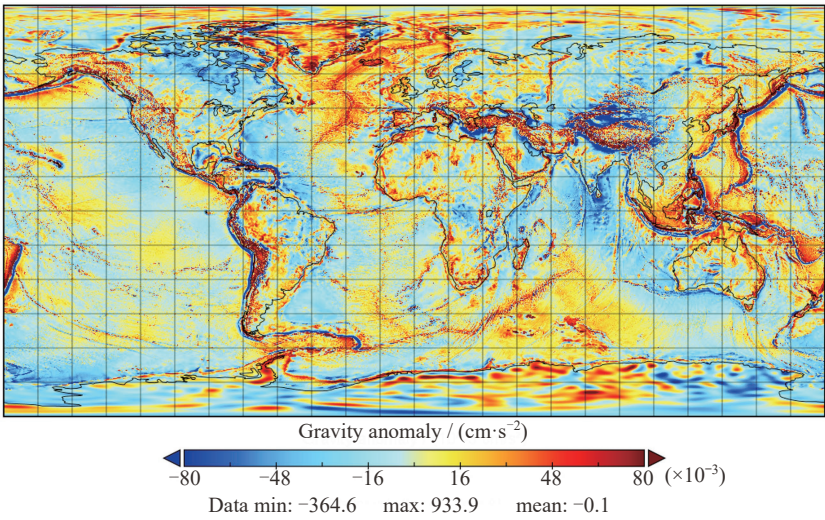


图 5 全球重力场融合模型 FUSION_V1.0 的二维重力异常网格

Fig. 5 2D gravity anomaly mesh of the global gravity field fusion model FUSION_V1.0

3 数据质量控制与评估

3.1 NCEI 船测重力质量控制

为确保重力场模型验证的独立性与稳健性, 本研

究选取美国国家海洋和大气管理局下属的国家环境信息中心 (National Centers for Environmental Information, NCEI) 汇编的全球船测重力数据作为验证集^{*}. 该数据集整合了来自美国海军、斯克里普斯海

^{*} <https://www.ncei.noaa.gov/maps/geophysics/>

Variable: grav, Gravity anomaly / Units: cm/s ²										
Y Axis: Latitude (° N)	X Axis: Longitude (° E)									
	0. 0	0. 01666667	0. 03333333	0. 05	0. 06666667	0. 08333333	0. 1	0. 11666667	0. 13333333	0. 15
	-90. 0	-0. 03266	-0. 03266	-0. 03266	-0. 03266	-0. 03266	-0. 03266	-0. 03266	-0. 03266	-0. 03266
	-89. 98333	-0. 03267	-0. 03267	-0. 03267	-0. 03267	-0. 03267	-0. 03267	-0. 03267	-0. 03267	-0. 03267
	-89. 96667	-0. 03270	-0. 03270	-0. 03270	-0. 03270	-0. 03269	-0. 03269	-0. 03269	-0. 03269	-0. 03269
	-89. 95	-0. 03276	-0. 03276	-0. 03276	-0. 03276	-0. 03276	-0. 03276	-0. 03276	-0. 03276	-0. 03276
	-89. 93333	-0. 03286	-0. 03286	-0. 03286	-0. 03286	-0. 03286	-0. 03286	-0. 03286	-0. 03286	-0. 03286
	-89. 91667	-0. 03298	-0. 03298	-0. 03299	-0. 03299	-0. 03299	-0. 03299	-0. 03299	-0. 03299	-0. 03299
	-89. 9	-0. 03313	-0. 03313	-0. 03313	-0. 03314	-0. 03314	-0. 03314	-0. 03314	-0. 03314	-0. 03314
	-89. 88333	-0. 03329	-0. 03329	-0. 03329	-0. 03330	-0. 03330	-0. 03330	-0. 03330	-0. 03330	-0. 03330
-89. 86667	-0. 03346	-0. 03346	-0. 03346	-0. 03346	-0. 03346	-0. 03346	-0. 03346	-0. 03346	-0. 03347	-0. 03347
-89. 85	-0. 03362	-0. 03363	-0. 03363	-0. 03363	-0. 03363	-0. 03363	-0. 03363	-0. 03363	-0. 03363	-0. 03363
-89. 83333	-0. 03380	-0. 03380	-0. 03380	-0. 03380	-0. 03380	-0. 03380	-0. 03380	-0. 03380	-0. 03380	-0. 03381
-89. 81667	-0. 03397	-0. 03397	-0. 03397	-0. 03397	-0. 03398	-0. 03398	-0. 03398	-0. 03398	-0. 03398	-0. 03398
-89. 8	-0. 03414	-0. 03414	-0. 03414	-0. 03414	-0. 03414	-0. 03414	-0. 03414	-0. 03414	-0. 03414	-0. 03414
-89. 78333	-0. 03429	-0. 03429	-0. 03429	-0. 03429	-0. 03429	-0. 03429	-0. 03429	-0. 03429	-0. 03429	-0. 03429
-89. 76667	-0. 03441	-0. 03441	-0. 03441	-0. 03441	-0. 03441	-0. 03441	-0. 03441	-0. 03441	-0. 03441	-0. 03441
-89. 75	-0. 03452	-0. 03452	-0. 03452	-0. 03452	-0. 03452	-0. 03452	-0. 03452	-0. 03452	-0. 03452	-0. 03452
-89. 73333	-0. 03466	-0. 03466	-0. 03466	-0. 03466	-0. 03466	-0. 03466	-0. 03466	-0. 03466	-0. 03466	-0. 03466
-89. 71667	-0. 03482	-0. 03482	-0. 03482	-0. 03482	-0. 03482	-0. 03482	-0. 03482	-0. 03482	-0. 03482	-0. 03482
-89. 7	-0. 03502	-0. 03502	-0. 03502	-0. 03502	-0. 03502	-0. 03502	-0. 03502	-0. 03502	-0. 03502	-0. 03502
-89. 68333	-0. 03527	-0. 03527	-0. 03527	-0. 03527	-0. 03527	-0. 03527	-0. 03527	-0. 03527	-0. 03527	-0. 03527
-89. 66667	-0. 03555	-0. 03555	-0. 03555	-0. 03555	-0. 03555	-0. 03555	-0. 03555	-0. 03555	-0. 03555	-0. 03555
-89. 65	-0. 03585	-0. 03585	-0. 03585	-0. 03585	-0. 03585	-0. 03585	-0. 03585	-0. 03585	-0. 03585	-0. 03585
-89. 63333	-0. 03618	-0. 03618	-0. 03618	-0. 03618	-0. 03618	-0. 03618	-0. 03618	-0. 03618	-0. 03618	-0. 03618
-89. 61667	-0. 03651	-0. 03652	-0. 03652	-0. 03652	-0. 03652	-0. 03652	-0. 03652	-0. 03652	-0. 03652	-0. 03652
-89. 6	-0. 03686	-0. 03686	-0. 03686	-0. 03686	-0. 03686	-0. 03686	-0. 03686	-0. 03686	-0. 03687	-0. 03687
-89. 58333	-0. 03722	-0. 03722	-0. 03722	-0. 03722	-0. 03722	-0. 03722	-0. 03722	-0. 03723	-0. 03723	-0. 03723
-89. 56667	-0. 03759	-0. 03759	-0. 03759	-0. 03759	-0. 03759	-0. 03759	-0. 03759	-0. 03759	-0. 03759	-0. 03759
-89. 55	-0. 03795	-0. 03795	-0. 03795	-0. 03795	-0. 03795	-0. 03795	-0. 03795	-0. 03795	-0. 03795	-0. 03795
-89. 53333	-0. 03827	-0. 03827	-0. 03827	-0. 03828	-0. 03828	-0. 03828	-0. 03828	-0. 03828	-0. 03828	-0. 03828
-89. 51667	-0. 03857	-0. 03857	-0. 03857	-0. 03857	-0. 03857	-0. 03857	-0. 03857	-0. 03858	-0. 03858	-0. 03858
-89. 5	-0. 03887	-0. 03887	-0. 03887	-0. 03887	-0. 03887	-0. 03887	-0. 03887	-0. 03887	-0. 03887	-0. 03887
-89. 48333	-0. 03918	-0. 03918	-0. 03919	-0. 03919	-0. 03919	-0. 03919	-0. 03919	-0. 03919	-0. 03919	-0. 03919
-89. 46667	-0. 03954	-0. 03954	-0. 03954	-0. 03954	-0. 03954	-0. 03954	-0. 03955	-0. 03955	-0. 03955	-0. 03955

图 6 全球重力场融合模型 FUSION_V1.0 的 grav 样本示例

Fig. 6 Sample example of grav of the global gravity field fusion model FUSION_V1.0

洋研究所、伍兹霍尔海洋研究所等多机构的多时期多平台船测重力数据, 涵盖西太平洋以外海域, 与本研究核心区的 JAMSTEC 数据构成独立测量关系, 适用于模型的跨海域评估。

NCEI 数据因其来源、观测年代、仪器及处理标准的多样性, 内部不同航次间可能存在系统性偏差。为提升数据一致性, 在验证前, 依据文献 [10] 所述方法对数据实施了严格的质量控制流程, 以剔除粗差并抑制系统误差, 确保验证结果的可靠性。

3.2 中国南海 NCEI 船测验证结果

中国南海 (105°E—125°E, 5°N—25°N) 属于西太平洋边缘海, 具有复杂的地形地貌特征, 包括大陆架、大陆坡、深海盆地及众多海山。其重力场信号受浅水地形、沉积层与地壳结构的多重影响, 是检验模型在复杂陆缘海域解析能力的理想区域。此外, 该海域 NCEI 船测数据覆盖密集, 有助于进行高精度验证。

中国南海区域 NCEI 船测重力验证精度统计如表 1 所示, FUSION_V1.0 的 RMS (3.29 mGal) 优

于 DTU21 (3.44 mGal) 和 SIOv32 (3.51 mGal), 相较于参与融合的 DTU21 和 SIOv32 海洋重力场, 全球重力场融合模型 FUSION_V1.0 精度更高。

3.3 夏威夷群岛海域 NCEI 船测验证结果

夏威夷群岛海域 (150°W—170°W, 10°N—30°N) 位于中太平洋开阔洋区, 以典型的洋岛火山链 (夏威夷—皇帝海山链) 著称。该区域重力场特征主要由大型海山、断裂带及深海平原的岩石圈均衡响应所主导, 是评估模型在开阔大洋与海山构造背景下重力场恢复能力的代表性区域。

夏威夷群岛区域 NCEI 船测重力验证精度统计如表 2 所示, FUSION_V1.0 的 RMS (2.16 mGal) 优于 DTU21 (2.30 mGal) 和 SIOv32 (2.30 mGal), 相较于参与融合的 DTU21 和 SIOv32 海洋重力场, 全球重力场融合模型 FUSION_V1.0 精度更高。

研究选取中国南海与夏威夷群岛海域两个具有典型性与对比性的验证海域, 通过在这两个具有显著差异的海域进行验证, 综合评估重力场模型 FUSION_V1.0 在不同海洋地质与地形环境下的普适性与精度提升。

表 1 中国南海区域 NCEI 船测重力验证精度统计值 ($\times 10^{-3}$, 单位: $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)

Table 1 Statistics of NCEI ship gravity verification values in the South China Sea region ($\times 10^{-3}$, Unit: $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)

Model	max	min	mean	STD	RMS
DTU21	14.74	-15.91	0.02	3.44	3.44
SIO V32	25.55	-41.03	0.24	3.50	3.51
FUSION_V1.0	17.24	-26.00	0.13	3.29	3.29

表 2 夏威夷群岛区域 NCEI 船测重力验证精度统计值 ($\times 10^{-3}$, 单位: $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)

Table 2 Statistics of NCEI ship gravity verification values over the Hawaiian Islands ($\times 10^{-3}$, Unit: $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)

Model	max	min	mean	STD	RMS
DTU21	12.48	-13.84	0.01	2.30	2.30
SIO V32	11.63	-11.29	-0.03	2.30	2.30
FUSION_V1.0	11.20	-10.99	-0.01	2.16	2.16

4 数据价值

本数据集 (FUSION_V1.0) 相比国际权威模型 EGM2008 (分辨率约 5') 及当前主流的单一卫星重力模型, 具有如下优势.

(1) 高分辨率与高精度. 可提供 $1'\times 1'$ 的高分辨率网格, 并通过自适应融合机制, 在中国南海与夏威夷群岛的验证中, 其精度均优于作为输入的 DTU21 与 SIOv32.1 模型.

(2) 全球无缝覆盖. 有效整合了 DTU21 的极区覆盖能力与 SIOv32.1 在开阔海洋的高精度优势, 实现了包括高纬度地区在内的全球覆盖.

(3) 方法创新性强. 提出的基于误差-水深关系的融合方法, 克服了传统分区拼接的缺点, 仅依赖局部船测数据即可实现全球范围的优化融合, 减少了对全球高密度船测数据的依赖.

(4) 应用前景广阔. 可为高精度海底地形反演、水下导航、海洋地球物理及空间科学等领域提供可靠的数据基础, 对推动中国自主全球重力场模型建设具有重要意义.

5 数据使用方法与建议

本数据集文件 (FUSION_V1.0.nc) 可采用通用科学计算软件 (例如 GMT, Python/xarray 库, Matlab) 进行读取、可视化和分析. 数据采用地理坐标参考系, 便于直接与其他全球地理数据进行集成应用.

用户可根据具体研究需求, 进一步进行网格插值、梯度计算等深加工处理.

致谢 船测重力数据由日本国立海洋研究开发机构 JAMSTEC 和美国国家环境信息中心 NCEI 公开发布, SIOv32.1 重力场数据和 SRTM15 系列模型由美国斯克里普斯海洋研究所发布, DTU21 重力场数据由丹麦科技大学 O.Andersen 教授提供.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] HWANG C, CHANG E T Y. Seafloor secrets revealed[J]. *Science*, 2014, **346**(6205): 32-33
- [2] SUN Zhongmiao, GUAN Bin, ZHAI Zhenhe, *et al.* Research progress of ocean satellite altimetry and its recovery of global marine gravity field and seafloor topography model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, **51**(6): 923-934 (孙中苗, 管斌, 翟振和, 等. 海洋卫星测高及其反演全球海洋重力场和海底地形模型研究进展 [J]. *测绘学报*, 2022, **51**(6): 923-934)
- [3] GARCIA E S M, SANDWELL D T, BASSETT D. Outer trench slope flexure and faulting at Pacific basin subduction zones[J]. *Geophysical Journal International*, 2019, **218**(1): 708-728
- [4] ZHENG Wei, FU Tengda, LI Zhaowei, *et al.* Progress of undersea gravity matching navigation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, **22**(18): 7721-7734 (郑伟, 付腾达, 李钊伟, 等. 潜器水下重力匹配导航研究进展 [J]. *科学技术与工程*, 2022, **22**(18): 7721-7734)
- [5] MAYER L, JAKOBSSON M, ALLEN G, *et al.* The Nippon Foundation—GEBCO seabed 2030 project: the quest to see the world's oceans completely mapped by 2030[J].

- Geosciences*, 2018, **8**(2): 63
- [6] XU Ke, JIANG Maofei. Advance in ocean satellite radar altimetry technology[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 1036-1057 (许可, 蒋茂飞. 海洋卫星雷达测高技术进展 [J]. *空间科学学报*, 2023, **43**(6): 1036-1057)
- [7] LIU Qiankun. Inversion of Ocean Gravity Field Based on HY-2A Radar Altimeter Data[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021 (刘乾坤. 基于 HY-2A 卫星雷达高度计数据的海洋重力场反演研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021)
- [8] PAVLIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, *et al.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, **118**(B4): B04406
- [9] LIU Q K, CHEN Z Y, XU K. Marine gravity field model fusion method based on water depth: a case study of the South China sea[C]//2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Athens: IEEE, 2024: 6031-6033
- [10] CHEN Z Y, LIU Q K, XU K, *et al.* Weighted fusion method of marine gravity field model based on water depth segmentation[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(21): 4107
- [11] CHEN Zhaoyu, XU Ke, LIU Qiankun, *et al.* Global ocean gravity field model fusion system and method based on water depth: CN, 202410392766.2[P]. 2024-07-09 (陈兆钰, 许可, 刘乾坤, 等. 一种基于水深的全球海洋重力场模型融合系统及方法: 中国, 202410392766.2[P]. 2024-07-09)
- [12] LI Y, ZHOU J C, LI J B, *et al.* Global marine gravity from 27 cycles of SWOT satellite data: accuracy and spatial resolution evaluation[J]. *Journal of Geodesy*, 2025, **99**(6): 51
- [13] 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
- [14] ANDERSEN O B, KNUDSEN P. The DTU17 global marine gravity field: first validation results[C]//Proceedings of the International Review Workshop on Satellite Altimetry Cal/Val Activities and Applications on Fiducial Reference Measurements for Altimetry. Cham: Springer, 2019: 83-87
- [15] SANDWELL D T, HARPER H, TOZER B, *et al.* Gravity field recovery from geodetic altimeter missions[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(2): 1059-1072

作者简介



刘乾坤 (通信作者) 男, 博士, 1995 年 8 月出生于河南省项城市, 现为中国科学院国家空间科学中心项目高级工程师, 主要研究方向为卫星测高定量处理与应用、海洋重力场和海洋地形反演与建模等。
E-mail: liuqiankun@nssc.ac.cn



许可 (通信作者) 男, 1967 年 3 月出生于辽宁省盖州市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员、博士生导师, 主要研究方向为卫星雷达高度计系统技术、合成孔径雷达高度计系统技术、先进星载主动微波定量遥感探测技术、微波遥感信息处理与应用等。
E-mail: xuke@mirslab.cn