引文格式:张菲菲,王皓,张义蜜,等.西太平洋海域卫星测高重力数据精度分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(1):30-41.DOI:10.13203/j.whugis20220429

Citation:ZHANG Feifei,WANG Hao,ZHANG Yimi,et al.Accuracy Analysis of Satellite Altimetry Gravity Data in the Western Pacific Area[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(1):30-41.DOI:10.13203/j.whugis20220429

西太平洋海域卫星测高重力数据精度分析

张菲菲[1,2,3] 王 皓[1] 张义蜜[1] 韩 波[2] 王万银[1,3,4]

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,山东 青岛,266071

3 海洋油气勘探国家工程研究中心,北京,100028

4 中国科学院海洋地质与环境重点实验室,山东 青岛,266071

摘 要:近年来,海域卫星测高重力数据在大地测量、海域区域构造、海域资源调查、国防安全等方面得到了广泛应用。为评估最新版本卫星测高重力数据在深海区的数据精度,选择西太平洋海域不同来源、不同版本的卫星测高重力数据(SS V24.1、SS V29.1、DTU10、DTU15、GETECH),利用1:200 000船载重力数据对卫星测高重力数据开展精度评估分析。分析结果表明,5种卫星测高重力数据与船载重力数据高度线性相关,两者之间均存在系统差,船载重力与卫星测高重力数据之间系统差在-8.0×10^{-5}~-7.5×10^{-5} m/s^{2}之间,其中SS V29.1卫星测高重力数据精度优于其他卫星测高重力数据,标准差为1.51×10^{-5} m/s^2。此外,利用船载重力数据与卫星测高重力数据之间线性相关的特点,引入消除两者之间系统差的一元线性回归分析方法;同时分析了不同来源卫星测高重力数据的噪声分布特征,采用最小曲率方法对卫星测高重力数据进行噪声压制处理,提高了卫星测高重力数据精度。研究结果表明,一元线性回归分析方法能够消除系统差,且最小曲率噪声压制方法能有效地压制船载重力数据和卫星测高重力数据的动态噪声,提高数据精度。两种方法简单实用,计算精度高,可推广应用至全海域使用,并可用于类似的数据精度分析中,具有广阔的推广应用前景。

关键词:卫星测高重力数据;精度分析;船载重力数据;线性回归;最小曲率;西太平洋海域

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-02-12

DOI:10.13203/j.whugis20220429 **文章编号**:1671-8860(2025)01-0030-12

Accuracy Analysis of Satellite Altimetry Gravity Data in the Western Pacific Area

ZHANG Feifei[1,2,3] *WANG Hao*[1] *ZHANG Yimi*[1] *HAN Bo*[2] *WANG Wanyin*[1,3,4]

1 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

3 National Engineering Research Center of Offshore Oil and Gas Exploration, Beijing 100028, China

4 Key Laboratory of Marine Geology & Environment, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: **Objective**: Since the 1970s, the advent of satellite altimetry has provided an effective database for determining the marine gravity field, effectively filling the gaps of shipborne gravity data. In recent years, the accuracy of satellite altimetry gravity data has improved significantly with the continuous improvement of satellite altimetry techniques. In order to evaluate the quality of the latest satellite altimetry gravity data in deep sea area, the download satellite altimetry gravity data in versions SS V24.1, SS V29.1, DTU10, DUT15, GETECH are comparative analyzed with the shipborne gravity data with the scale of 1∶200 000 in the Western Pacific Area. **Methods**: The accuracies of five different versions of satellite altimetry gravity data are externally checked by using shipborne gravity line-type data and the corresponding grid data separately. The correlation coefficient, mean deviation, root mean square error and standard deviation between every satellite altimetry gravity data and the shipborne gravity data are calculated to

基金项目:中国地质调查局项目(DD20191003);中海石油(中国)有限公司北京研究中心项目(220226220101)。

第一作者:张菲菲,博士,副研究员,主要从事海域重、磁数据处理及解释应用研究。ffeizhang@126.com

通信作者:王万银,博士,教授。wwy7902@chd.edu.cn

compare and analyze. Based on comparative analysis results, the linear regression method is used to remove the system deviation between the satellite altimetry gravity data and the shipborne gravity data, and the minimum curvature filtering method is used to suppress the noise in the satellite altimetry gravity data to improve the data accuracy. **Results:** The results show that: (1) Five versions of satellite altimetry gravity data are highly linearly correlated with shipborne gravity data, but there are system deviation between them. The accuracies of SS V29.1, V24.1 and DTU15 are high, and the standard deviation between them and shipborne gravity data are 1.51×10^{-5} m/s^2, 1.67×10^{-5} m/s^2 and 1.66×10^{-5} m/s^2 respectively, which is better than the comparison results obtained by previous scholars. (2) The linear regression method can help to figure out the relationship between the satellite altimetry gravity data and the shipborne gravity data, which can eliminate system deviation between the satellite altimetry gravity data and shipborne gravity data. After regression calculation, the average difference beteween the satellite altimetry gravity and the shipborne gravity data decreased to 0, and the root mean square error is greatly reduced, ranging from 1.50×10^{-5} m/s^2 to 2.20×10^{-5} m/s^2.(3) The minimum curvature filtering method can effectively suppress the noise of shipborne gravity data and altimetry gravity data, and make the distribution features of satellite altimetry gravity data more clear and improve the accuracy of satellite altimetry gravity data . After noise suppression, the root mean square error and standard deviation are equal, ranging from 0.97×10^{-5} m/s^2 to 1.48×10^{-5} m/s^2, among which the standard deviation between SS V29.1 and shipborne gravity data is the smallest, 0.97×10^{-5} m/s^2. **Conclusions:** According to the comparative analysis, the accuracy of the latest five versions of satellite altimetry gravity data are better than their former versions and can meet the needs of marine gravity research on scales around 1∶500 000 to 1∶1 000 000. The linear regression method and minimum curvature filtering method can be used efficiently and easily in improving the accuracy analysis of satellite altimetry gravity data in the Western Pacific area, which can lead to better applications of the satellite altimetry gravity data and deserve to be promoted.

Key words: satellite altimetric gravity data; accuracy analysis; shipborne gravity data; linear regression; the minimum curvature; the Western Pacific area

海洋重力场作为海洋地球物理的基础信息,是海洋大地测量、海洋区域构造、海洋矿产资源勘探等学科的重要研究手段。由于船载重力测量存在成本高、周期长、覆盖区域有限等缺点,海域面积性重力勘探工作进度缓慢,尤其是深海大洋区,船载重力数据稀疏、覆盖面积有限,严重制约了人类对深海大洋区的研究。20世纪70年代以来,卫星测高技术的出现有效弥补了船载重力测量手段的不足,为确定海洋重力场提供了有效的数据源[1-5]。空间技术和理论的发展使得卫星测高技术不断改进和完善,卫星定轨精度大幅度提高,海洋重力场的精度也随之提高[6-9]。目前应用比较广泛的卫星测高重力数据集有美国加利福尼亚大学圣迭戈分校斯克利普斯海洋研究所(Scripps Institution of Oceanography, SIO)计算发布的SS系列(含水深数据)[10-15]、丹麦科技大学(Danmarks Tekniske Universitet, DTU)与国家空间局发布的DNSC08GRA系列、DTU系列(含水深数据)[16-18]以及英国GETECH公司的相应商业数据产品[19-20]。

国外学者对不同系列卫星测高重力数据的精度开展了相应的研究。文献[16]利用321 400个船载重力数据与不同时期卫星测高重力数据进行了精度比对,统计结果表明,2000年左右解算得到的卫星测高重力数据(SS V15.1等)与船载重力数据之间的均方根误差为5×10^{-5} m/s^2,DNSC08GRA及SS V18.1卫星测高重力数据与船载重力数据之间的均方根误差小于4×10^{-5} m/s^2,精度提高了20%以上。文献[13]对SS V21版本卫星测高重力数据精度进行了详细分析,SS V21版本卫星测高重力数据的精度是SS V18版本卫星测高重力数据的1.25倍,在纬度小于72°范围内SS V21卫星测高重力数据精度优于1.7×10^{-5} m/s^2,高纬度地区精度略低,约为2×10^{-5}~3×10^{-5} m/s^2。中国学者对卫星测高重力数据精度也进行了一系列的对比分析[21-25],文献[21]利用南黄海海域1:100万船载重力数据对卫星测高重力数据精度进行了分析,通过剖面的对比指出现代卫星测高重力数据(数据版本未说明)与船载重力数据的均方根误差在4×10^{-5} m/s^{2}以内,总

精度可以达到3×10^{-5} m/s^2,基本可以满足1:100万比例尺面积性海洋重力工作的需要。文献[23]对南海地区3个航次重力数据与不同版本卫星测高重力数据进行了对比,计算结果表明,在南海地区SS V18.1和DNSC08GRA数据精度接近,优于SS V16.1卫星测高重力数据,与船载重力数据对比的标准差均小于4×10^{-5} m/s^2。文献[24]利用美国国家地球物理数据中心公布的南海海域3条船载重力测线数据对最新发布的SS V28.1、SS V29.1、DTU15和DTU17卫星测高海洋重力场模型数据进行了外符合精度检核,结果表明4种重力模型在南海海域精度大致在1.5×10^{-5}~6×10^{-5} m/s^{2}之间。

由于以往的对比工作一般采用小比例尺(<1:100万)或2002年以前的船载重力数据,无法满足新版本卫星测高重力数据的精度对比需求,且以往的船载重力数据对比工作多集中在近海地区,如南黄海、南海及墨西哥湾等,卫星测高重力数据的精度分析结果无法直接用于开阔的深海区,因此,在深海区最新版本卫星测高重力数据的精度如何还需做进一步对比分析。前人对于卫星测高重力数据精度的研究多集中在精度对比和分析,数据精度提高方面的工作较少,如何利用精度对比结果提高卫星测高重力数据精度也需要进一步研究。

本文选择西太平洋海域菲律宾海盆附近海区为研究区,以SS V24.1、SS V29.1、DTU10、DTU15及GETECH公司发布的卫星测高重力数据作为研究对象,依据研究区内1:200 000船载重力数据对卫星测高重力数据进行精度评估,寻求提高数据精度的解决办法,以期为新版本卫星测高重力数据的后续应用(如精细构造研究、重力匹配导航等)提供参考。

1 研究区与数据

本文研究区位于西太平洋海域,周围分布西菲律宾海盆、帕劳海脊、帕里西维拉海盆等构造单元。研究区范围如图1中红框所示,位于帕劳海脊与菲律宾海盆中央扩张中心相连区域,为地形开阔的深海区,水深变化范围2 000~6 500 m。

本文收集了位于研究区范围内的船载重力数据,数据采集时间为2018年,使用的采集设备为KSS31型海洋重力仪,测量比例尺为1:200 000,主测线间距2 km,联络测线间距10 km,数据精度优于$\pm1\times10^{-5}$ m/s^2。船载重力数据依据新版海洋地质调查规范进行了预处理,包括零点漂移校正、厄特沃斯校正、正常场校正、测网平差等处理,重力基本网采用2000国家重力基本网。

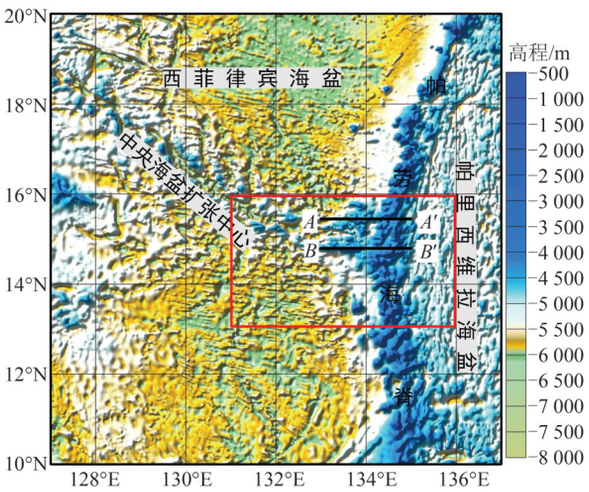


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the Study Area

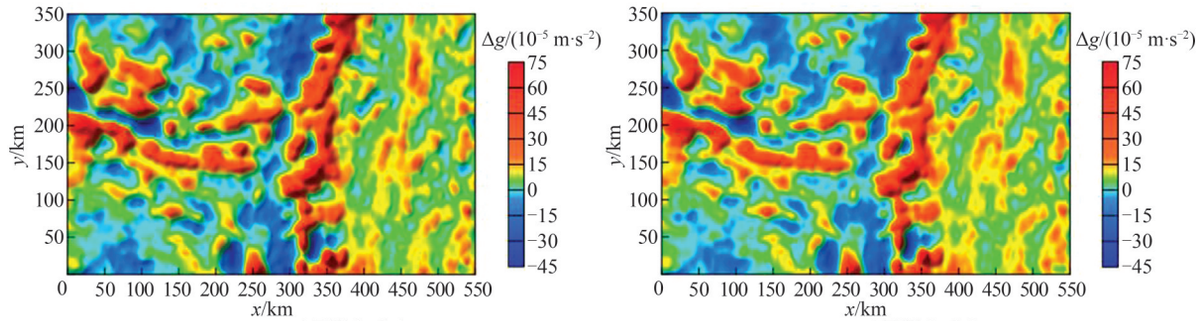
本文收集到3种不同来源、5个版本的卫星测高重力数据,分别为:(1)SIO发布的SS V24.1和SS V29.1版本卫星测高重力数据(见图2),数据网度为1′×1′,采用WGS84坐标系,数据精度为$\pm1\times10^{-5}$~$\pm6\times10^{-5}$ m/s^2;(2)DTU发布的DTU10和DTU15版本卫星测高重力数据(见图3),数据网度为1′×1′,采用WGS84坐标系,数据精度为$\pm1\times10^{-5}$~$\pm6\times10^{-5}$ m/s^2;(3)GETECH卫星测高重力数据,数据网度为1.2′×1.2′,采用WGS84坐标系,数据精度为$\pm1\times10^{-5}$~$\pm6\times10^{-5}$ m/s^2(图4)。

2 数据处理与研究方法

2.1 船载重力数据噪声压制处理

收集得到的船载重力数据为测线散点数据,检查发现部分测线数据存在数据抖动现象(图5),为测量过程中产生的高频动态噪声,需要对其进行动态噪声压制处理。本次采用最小曲率方法对船载重力数据进行噪声压制处理。

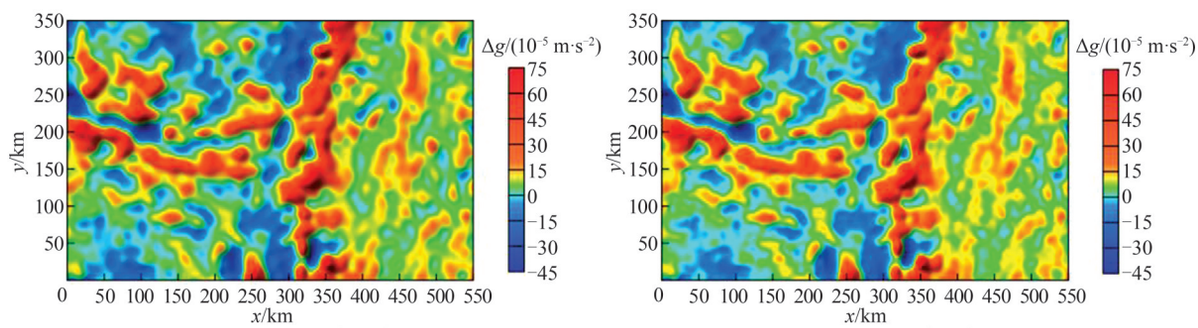
最小曲率方法是一种空间域处理方法,在离散数据网格化[26-29]、位场数据扩边和补空[30]、位场数据分离[31-33]等方面得到了广泛应用。该方法的优点是计算精度高,计算速度快且符合位场数据的特征。文献[32-33]推导了最小曲率有限差分方程的显式(单步长和叠加步长显式迭代格式)和隐式差分迭代格式(单步长和叠加步长隐式迭代格式),并利用傅里叶频谱分析理论研究了最



(a) SS V24.1卫星测高重力　　(b) SS V29.1卫星测高重力

图 2　SS 系列卫星测高重力异常图

Fig. 2　Satellite Altimetry Gravity Anomaly Maps of SS



(a) DTU10卫星测高重力　　(b) DTU15卫星测高重力

图 3　DTU 系列卫星测高重力异常图

Fig. 3　Satellite Altimetry Gravity Anomaly Maps of DTU

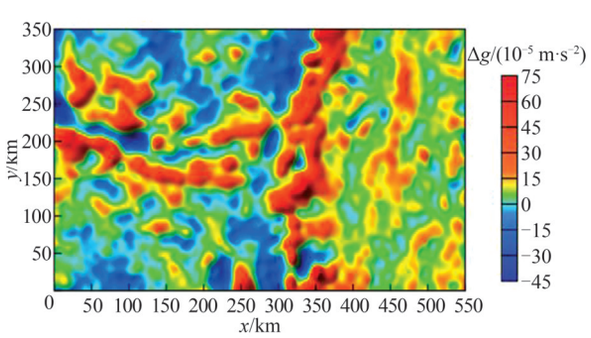


图 4　GETECH 系列卫星测高重力异常图

Fig. 4　Satellite Altimetry Gravity Anomaly Maps of GETECH

小曲率显式和隐式差分迭代格式的收敛性(显式迭代格式部分收敛,隐式迭代格式均收敛),为最小曲率噪声压制方法提供理论支撑。本次采用最小曲率叠加步长隐式迭代格式对船载重力数据进行动态噪声压制。

叠加步长隐式迭代格式表示为[32]:

$$u_{(L)}^{(k)}(j)=\frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L}u_{(l)}^{(k)}(j)=\frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L}\{-\frac{1}{6}[u_{(l)}^{(k)}(j-2l)-4u_{(l)}^{(k)}(j-l)-4u_{(l)}^{(k-1)}(j+l)+u_{(l)}^{(k-1)}(j+2l)]\} \tag{1}$$

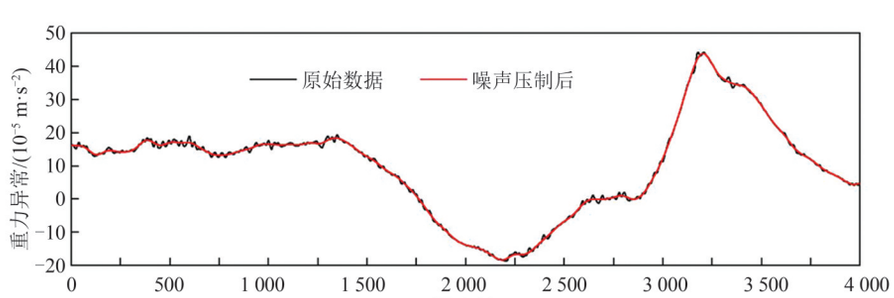


图 5　噪声压制前后船载重力数据曲线对比图

Fig. 5　Comparison of Shipborne Gravity Data Curves Before and After Noise Suppression

式中,$j=1,2,\cdots,J$,为点号;$k=1,2,\cdots,K$,为迭代次数,K为最大迭代次数;$l=1,2,\cdots,L$,为叠加步长,L为最大叠加步长;$u_{(l)}^{(k)}(j)$表示j点处迭代步长为l的第k次迭代结果。

叠加步长隐式迭代格式滤波因子表达式为[32]:

$$H_2^{(1)}(f,L)=\frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L}H_1^{(1)}(f,L)=\frac{1}{L}\left\{\frac{A(6-A)+B^2+i2B(3-A)}{(6-A)^2+B^2}\right\} \quad (2)$$

式中,$A=4\cos(2\pi f\cdot l\cdot\Delta_x)-\cos(2\pi f\cdot 2l\cdot\Delta_x)$;$B=4\sin(2\pi f\cdot l\cdot\Delta_x)-\sin(2\pi f\cdot 2l\cdot\Delta_x)$;$H_2^{(1)}(f,L)$表示最大步长为$L$时完成式(1)1次叠加步长原位迭代的频率响应。文献[32-33]从理论上证明了叠加步长隐式迭代格式滤波因子具有较好的噪声压制效果。

图5为船载重力测线数据进行动态噪声压制前后的曲线对比图。如图5所示,原始数据重力曲线存在数据抖动情况,噪声毛刺比较多;噪声压制后重力曲线光滑,数据抖动得到很好的改善。动态噪声压制后数据与原始数据之间平均误差为0.000 010 96×10^{-5} m/s^2,均方误差为0.043×10^{-5} m/s^2,最大限度保留了原始数据的有效信息,提高了船载重力数据的精度。

2.2 数据网格化处理

不同版本卫星测高重力数据存在网格间距、网格节点不同的问题。SS系列和DTU系列卫星测高重力数据的网格间距为1′(0.016 666 67°),GETECH卫星测高重力数据的网格间距为1.2′(0.02°)。SS系列和DTU系列卫星测高重力数据的网格间距均为1′,但是不同版本数据的网格节点位置不同,例如对于点位(132°E,14.6°N),SS系列中该点位坐标为(132.008 333 33,14.608 333 33),而DTU系列中该点位坐标为(132.000 000 00,14.600 000 00)。船载重力数据与卫星测高重力数据亦存在数据点位不同的问题,无法直接进行数据对比分析,需要进行两种方式的处理:

1)以船载重力数据测点位置为准,对不同版本卫星测高重力数据进行插值计算,得到每条测线对应的卫星测高重力数据,对测线数据进行对比。

2)对船载重力数据和卫星测高重力数据进行网格化处理,得到等网格间距数据,进行面积性网格化数据对比。本次网格化处理方法采用克里金网格化方法,网格间距采用2 km,网格搜索半径采用10 km。

2.3 数据精度分析基本原理

卫星测高重力数据精度分析通常采用船载重力数据进行外部检核[21,24-25,34-35],通过对剖面或平面网格化数据进行平均差、均方根误差、标准差等结果的统计、分析,得出卫星测高重力数据的精度。卫星测高重力数据精度的评估与船载重力数据精度密切相关,在前人的研究中,卫星测高重力数据精度为3×10^{-5}~10×10^{-5} m/s^2,海岸带5 km以内浅水区数据精度较差,5 km以外数据精度较好[21];开阔的深海区数据精度优于地形复杂的陆架、陆坡区。由于深海区实测船载重力数据比较少,前人对深海区卫星测高重力数据精度对比较少,尤其是与大比例尺面积性数据的对比较少。本文利用西太平洋海域1∶200 000船载重力数据对5种不同版本卫星测高重力数据的精度进行了外部检核。

为方便讨论数据精度问题,本文使用平均差(mean deviation, MD)E_{MD}、均方根(root mean square, RMS)E_{RMS}以及标准差(standard deviation, STD)E_{STD}[36-38]衡量数据精度,使用相关系数r_{xy}来衡量2组数据之间的相关性。假设数据个数为n,两组数据分别用x_i和y_i表示,则计算公式分别为:

$$E_{\mathrm{MD}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i-y_i \quad (3)$$

$$E_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$E_{\mathrm{STD}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i-E_{\mathrm{md}})^2}{n}} \quad (5)$$

$$r_{xy}=\frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx}\times l_{yy}}} \quad (6)$$

式中,$l_{xy}=\sum_{i=1}^{m}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})$;$l_{xx}=\sum_{i=1}^{m}(x_i-\bar{x})^2$;$l_{yy}=\sum_{i=1}^{m}(y_i-\bar{y})^2$;$\bar{x}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}x_i$;$\bar{y}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}y_i$。

通常选择RMS或STD作为外部检核精度评价的指标,其值越小,表明卫星测高重力数据与船载重力数据越接近。相关系数r_{xy}表征两个函数系列的相互关联程度,其取值范围为$-1\leqslant r_{xy}\leqslant 1$,如果$|r_{xy}|=1$,则$x$和$y$为线性相关,通常情况下,$|r_{xy}|$介于0.7~1.0之间,则$x$和$y$高度相关。

3 卫星测高重力数据精度分析

为分析卫星测高重力数据精度,利用研究区

内大比例尺船载重力数据对3种来源、5个版本的卫星测高重力数据进行外部检核及对比分析。外部检核分析包括两部分内容:

1)测线数据对比。使用插值计算得到同测线的卫星测高重力数据和船载重力数据并进行对比,统计得到所有测线的对比结果。本文给出了研究区内南、北2条测线的对比结果,测线位置见图1,北部为AA'测线,南部为BB'测线,图6为同测线的卫星测高重力与船载重力数据曲线对比图,测线数据外部检核结果见表1。

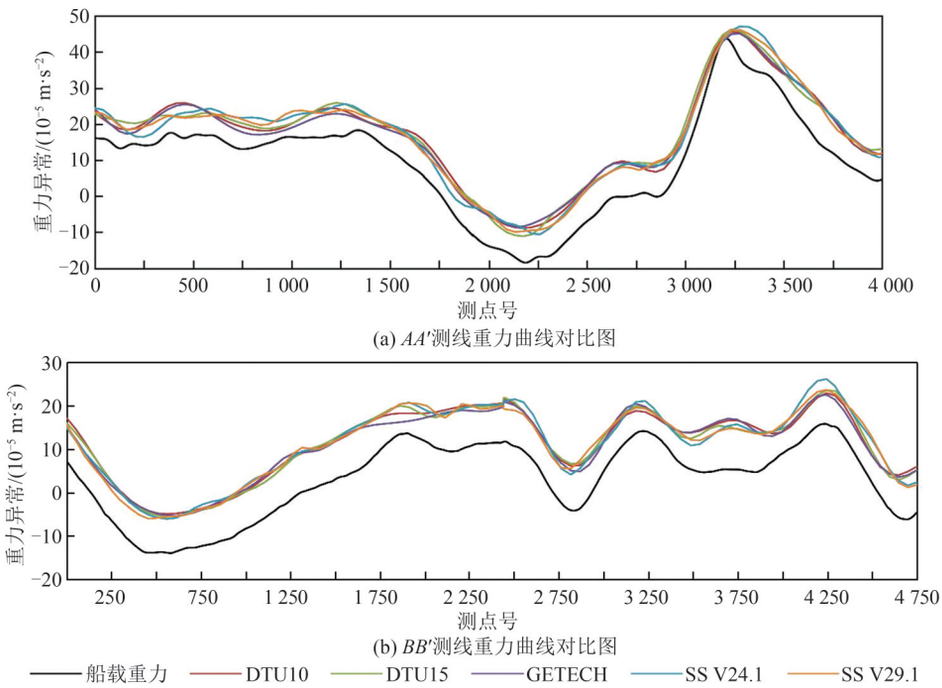


图6　卫星测高重力数据与船载重力数据对比图

Fig. 6　Comparison Between Satellite Altimetry Gravity and Shipborne Gravity Data Curves

表1　卫星测高重力与船载测线数据精度分析结果

/(10^{-5} m·s^{-2})

Table 1　Accuracy Analysis Results Between Satellite Altimetry Gravity Data and Shipborne Gravity Line Data

/(10^{-5} m·s^{-2})

测线	误差项	数据来源				
		SS V24.1	SS V29.1	DTU10	DTU15	GETECH
AA'测线	E_{MD}	−8.51	−8.18	−8.40	−8.36	−8.06
	E_{RMS}	8.62	8.28	8.56	8.46	8.26
	E_{STD}	1.32	1.28	1.70	1.30	1.78
BB'测线	E_{MD}	−7.14	−7.06	−7.18	−7.38	−6.85
	E_{RMS}	7.43	7.27	7.50	7.60	7.27
	E_{STD}	2.04	1.72	2.17	1.82	2.42
所有测线	E_{MD}	−7.91	−7.82	−8.05	−8.02	−7.70
	E_{RMS}	8.07	7.96	8.35	8.21	8.02
	E_{STD}	1.61	1.46	2.26	1.78	2.28

2)网格化数据对比。对网格化处理后的卫星测高重力数据和船载重力数据进行对比,分析卫星测高重力数据在面积范围内的数据精度。通过计算不同来源、不同版本卫星测高重力数据与船载重力数据之间的MD、RMS以及STD,对卫星测高重力数据进行外部检核,结果见表2,并通过两者之间的散点图(图7)和相关系数分析其相关性。

表2　卫星测高重力与船载重力网格数据精度分析结果

Table 2　Accuracy Analysis Results Between Satellite Altimetry Gravity Data and Shipborne Gravity Grid Data

数据源	r_{xy}	E_{MD}/(10^{-5} m·s^{-2})	E_{RMS}/(10^{-5} m·s^{-2})	E_{STD}/(10^{-5} m·s^{-2})
SS V24.1	0.984 28	−7.93	8.11	1.67
SS V29.1	0.992 37	−7.80	7.94	1.51
DTU10	0.983 67	−7.94	8.22	2.12
DTU15	0.990 56	−7.91	8.08	1.66
GETECH	0.984 28	7.81	−7.52	2.10

图6显示,卫星测高重力数据与船载重力数据变化趋势一致,但卫星测高重力数据相对光滑且异常值偏大,两者之间存在系统差异。根据表1中对比结果可知,GETHCH与船载重力数据之间系统差最小,MD为-7.70×10^{-5} m/s^2,SS V29.1、SS V24.1和DUT15与船载重力数据之间

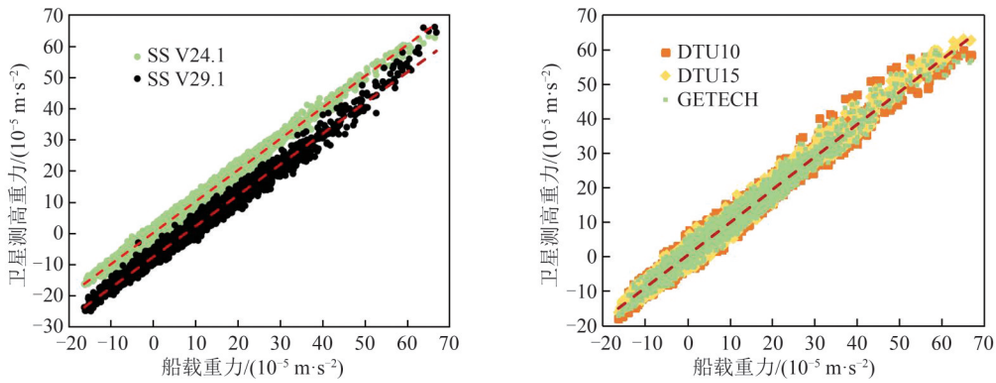


图7 卫星测高重力数据与船载重力数据散点图

Fig. 7 Scatter Diagram of Satellite Altimetry Gravity Data and Shipborne Gravity Data

的STD较小,分别为1.46×10^{-5} m/s²、1.61×10^{-5} m/s²和1.78×10^{-5} m/s²,精度相对较高;DTU10和GETECH与船载重力数据之间STD较大,部分区域重力曲线形态差别略大。

由图7及表2中相关系数可以得出,卫星测高重力数据与船载重力数据为高度线性相关关系。表2中的MD在-8.0×10^{-5}~-7.5×10^{-5} m/s²之间,说明卫星测高重力数据与船载重力数据之间存在系统差,其中GETECH卫星测高重力数据与船载重力数据之间的系统偏差最小。受系统差影响,卫星测高重力数据与船载重力数据之间的RMS较大。STD消除了系统差的影响,计算结果更能反映数据的真实精度,其计算结果表明SS V29.1、SS V24.1和DTU15卫星测高重力数据的精度相对较高,与船载重力数据的STD分别为1.51×10^{-5} m/s²,1.67×10^{-5} m/s²和1.66×10^{-5} m/s²,该结果优于Sandwell等[13]在墨西哥湾地区的精度比对结果;GETECH与DTU10的精度相当,STD分别为2.10×10^{-5}和2.12×10^{-5} m/s²。对比表1和表2,网格化数据对比结果与测线对比结果相近。因此,认为新版本的卫星测高重力数据的精度优于以往版本,尤其是SS V29.1、SS V24.1和DTU15卫星测高重力数据,精度提高到1.50×10^{-5} m/s²左右,优于以往学者的对比结果。

4 卫星测高重力数据精度提高方法

4.1 利用一元线性回归方法提高数据精度

根据§3.2对比结果可知,卫星测高重力数据与船载重力数据之间存在系统差,进行定量反演解释时会引入较大误差从而影响反演结果。根据两者之间的高度线性相关性,本文引入一元线性回归方法,通过建立不同版本卫星测高重力数据与船载重力数据之间的一元线性回归关系式,对卫星测高重力数据进行回归计算,消除与船载重力数据之间的系统差。

线性回归模型是回归分析中最基础、最简单的回归模型,被广泛应用于各种数据的统计、预测及分析[39-41],该方法计算简单,不受人为因素干扰,在地球物理数据的应用和解释过程中发挥了极大的作用[42]。

假设x为自变量,y为因变量,两者高度线性相关,那么可以用一个直线方程拟合它们之间的线性关系,该直线方程被称为估计回归方程,一般表示为:

$$E(y_j)=ax_j+b \tag{7}$$

回归分析的目的是确定待定系数a和b的具体值,从而确定估计回归方程的具体形式。通常采用最小二乘方法获得待定系数。

利用船载重力数据,对SS V24.1、SS V29.1、DTU10、DTU15及GETECH卫星测高重力数据进行回归分析,建立了卫星测高重力数据与船载重力数据之间的一元线性回归关系式:

$$\begin{cases}\Delta g'_{\mathrm{SS24.1}}=0.975\,4\times\Delta g_{\mathrm{SS24.1}}-7.63\\ \Delta g'_{\mathrm{SS29.1}}=0.987\,1\times\Delta g_{\mathrm{SS29.1}}-7.64\\ \Delta g'_{\mathrm{GETECH}}=1.021\,7\times\Delta g_{\mathrm{GETECH}}-7.76\\ \Delta g'_{\mathrm{DTU10}}=1.012\,9\times\Delta g_{\mathrm{DTU10}}-8.08\\ \Delta g'_{\mathrm{DTU15}}=1.014\,8\times\Delta g_{\mathrm{DTU15}}-8.08\end{cases} \tag{8}$$

使用式(8)对卫星测高重力数据进行了回归计算,并与船载重力数据进行精度对比,图8为归算后卫星测高重力与船载重力曲线对比图,表3为归算后测线对比结果,表4为归算后网格化数据对比结果。经回归计算后,卫星测高重力与船载重力变化趋势及幅值趋于一致,MD趋于0,RMS大幅度降低,数值介于1.50×10^{-5}~2.20×10^{-5} m/s²之间,但是回归计算后卫星测高重力与

船载重力之间的标准差变化不大。这说明回归分析法可以很好地消除卫星测高重力数据与船载重力数据之间的系统差,但是对卫星测高重力数据的精度改善不理想。

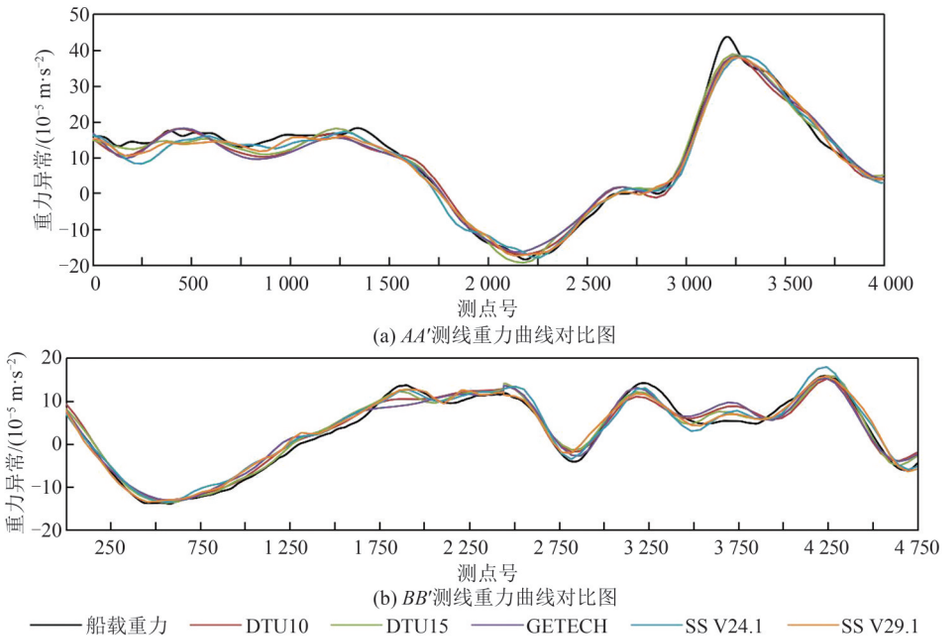


图 8　归算后卫星测高重力数据与船载测线数据对比图

Fig. 8　Comparison Diagram of Satellite Altimetry Gravity Data After Regression Calculation and Shipborne Gravity Line Data Curves

表 3　归算后卫星测高重力与船载测线数据精度分析结果/(10^{-5} m·s^{-2})

Table 3　Accuracy Analysis Results Between Satellite Altimetry Gravity Data After Regression Calculation and Shipborne Gravity Line Data/(10^{-5} m·s^{-2})

测线名	偏差项	数据源				
		SS V24.1	SS V29.1	DTU10	DTU15	GETECH
AA′测线	E_{MD}	0.61	0.41	0.46	0.44	0.53
	E_{RMS}	1.48	1.36	1.72	1.35	1.81
	E_{STD}	1.35	1.30	1.66	1.28	1.73
BB′测线	E_{MD}	0.89	0.79	0.68	0.45	0.56
	E_{RMS}	2.28	1.94	2.20	1.80	2.37
	E_{STD}	2.10	1.78	2.10	1.74	2.30
所有测线	E_{MD}	0.000 063	0.000 062	−0.000 081	−0.000 115	0.000 031
	E_{RMS}	1.69	1.53	2.32	1.79	2.35
	E_{STD}	1.69	1.51	2.32	1.79	2.35

表 4　归算后卫星测高重力与船载重力网格数据精度分析结果/(10^{-5} m·s^{-2})

Table 4　Accuracy Analysis Results Between Satellite Altimetry Gravity Data After Regression Calculation and Shipborne Gravity Grid Data/(10^{-5} m·s^{-2})

数据源	船载重力数据范围	归算前数据范围	归算后数据范围	E_{MD}	E_{RMS}	E_{STD}
SS V24.1		−16.56～64.40	−23.78～55.19	−0.000 60	1.66	1.66
SS V29.1		−16.28～66.91	−23.708～58.41	0.000 56	1.51	1.51
DTU10	−24.95～66.10	−18.02～59.79	−26.332～52.48	−0.000 38	2.20	2.20
DTU15		−16.08～63.19	−24.401～56.04	−0.000 28	1.68	1.68
GETECH		−17.16～59.67	−25.297～53.20	−0.000 29	2.16	2.16

4.2 利用最小曲率噪声压制方法提高数据精度

卫星测高重力数据受卫星轨道扰动、地球大气层对流、观测手段缺陷等因素的影响,所获取的数据存在噪声,在卫星测高数据反演重力数据过程中,通过滤波技术去除了大部分的噪声数据,但反演得到的卫星测高重力数据中依然会有部分噪声存在,这些会影响卫星测高重力数据的精度和后续应用。要得到更高精度的卫星测高重力数据,必须利用有效方法对其进行噪声压制。本文采用最小曲率方法对卫星测高重力数据进行噪声压制处理。

本次选取3种不同来源的卫星测高重力数据(SS V29.1、DTU15和GETECH)进行噪声压制处理,分析不同来源数据的噪声分布特征及精度。图9(a)、图9(c)和图9(e)为使用最小曲率方法提取得到的噪声数据分布情况,对比可知SS V29.1卫星测高重力数据噪声呈现明显的南北向条带状,其分布特征与卫星轨道有关,而DTU15卫星测高重力和GETECH卫星测高重力数据噪声以北东向和北西向为主,噪声分布与研究区内构造方向一致。经噪声压制后,卫星测高重力数据中的高频噪声被去除,原始有效异常信息得到了最大程度保留,局部异常刻画更加清晰(图9(b)、9(d)、9(f))。

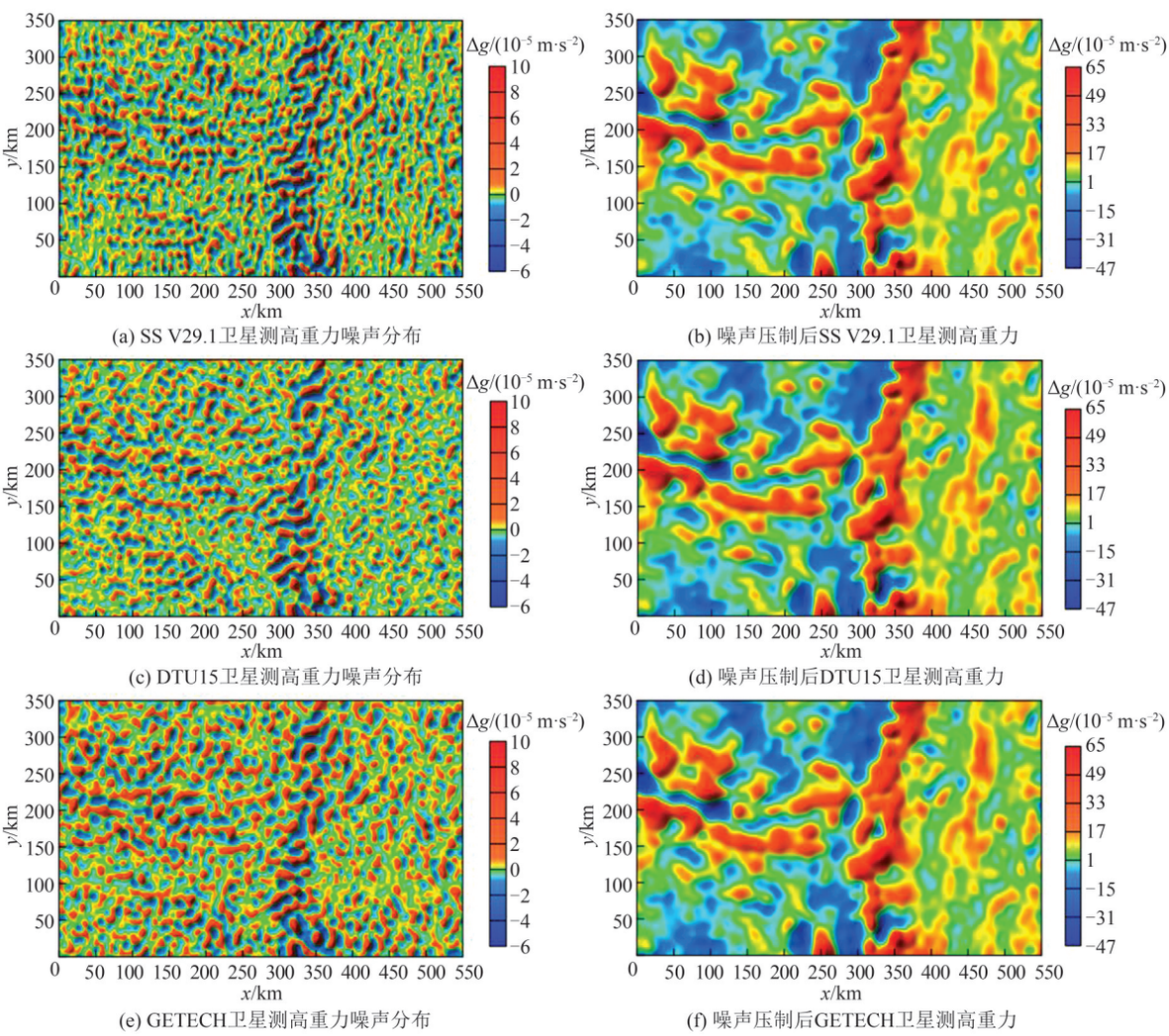


图9 卫星测高重力噪声分布及噪声压制后卫星测高重力异常图

Fig. 9 Noise Distribution Maps and Satellite Altimeter Gravity Maps After Noise Suppression

将噪声压制前后卫星测高重力数据与船载重力数据进行了精度对比。由计算结果(表5)可知,3种卫星测高重力数据与船载重力数据的RMS和STD较回归计算结果有所下降,计算结果介于0.97×10^{-5}~1.48×10^{-5} m/s^{2}之间,这说明最小曲率噪声压制方法有效提高了卫星测高重力数据的精度。

对比噪声压制后数据精度分析结果,认为SS V29.1卫星测高重力数据精度更高,经回归计算和噪声压制后,与船载重力数据之间的MD下降为$-0.000\ 69\times10^{-5}$ m/s^2,STD下降为0.97×10^{-5} m/s^2。

表5　噪声压制前后卫星测高重力与船载重力网格数据精度分析结果/(10^{-5} m·s^{-2})

Table 5　Accuracy Analysis Results Between Satellite Altimetry Gravity Data Before and After Noise Suppression and the Shipborne Gravity Grid Data/(10^{-5} m·s^{-2})

数据源	噪声处理	E_{MD}	E_{RMS}	E_{STD}
SS V29.1	噪声压制前	0.000 56	1.51	1.51
	噪声压制后	−0.000 69	0.97	0.97
DTU15	噪声压制前	−0.000 28	1.68	1.68
	噪声压制后	−0.000 16	1.12	1.12
GETECH	噪声压制前	−0.000 29	2.16	2.16
	噪声压制后	−0.000 25	1.48	1.48

5　结　语

卫星测高重力技术的发展为获得全球范围内高精度重力数据提供了基础,评估不同地区卫星测高重力数据的精度,研究提高卫星重力数据精度的方法,均为卫星重力数据的应用奠定了基础。本文选取最新发布的3种不同来源、5种不同版本的卫星测高重力数据,利用西太平洋海域的1:200 000船载重力数据对卫星测高重力数据精度进行了外部检核。采用一元线性回归方法和最小曲率方法分别对卫星测高重力数据进行了归算和噪声压制。结果表明两项措施都能够很好地提高卫星测高重力数据精度。通过研究,主要得到以下3点认识:

1)新一代卫星测高重力数据精度优于以往的数据。船载重力数据和5个版本的卫星测高重力数据与高度线性相关且存在系统差,平均差MD在-8.0×10^{-5}～-7.5×10^{-5} m/s^{2}之间,STD介于1.5×10^{-5}～2.1×10^{-5} m/s^{2}之间。精度分析结果表明,SS V29.1、DTU15、SS V24.1版本卫星测高重力数据的精度相对高,优于DTU10和GETECH数据的精度。

2)采用一元线性回归方法建立了卫星测高重力数据与船载重力数据之间的回归关系式,通过回归计算可以很好地消除卫星测高重力数据与船载重力数据之间的系统差,归算后卫星测高重力数据与船载重力数据之间的MD趋于0。该方法简单、高效且计算精度可靠,建立的回归关系式可推广应用到相邻海域,为卫星测高重力数据在西太平洋海域应用提供了参考。

3)最小曲率方法能够有效压制船载重力数据的动态误差和卫星测高重力异常的噪声异常,最大程度保留原始数据的重力场信息。通过噪声特征对比得出:SS V29.1卫星测高重力数据噪声与卫星轨道有关,多以近南北向为主;DTU15卫星测高重力及GETECH卫星测高重力数据噪声与区域内构造走向相关,以北东向和北西向为主。经噪声压制处理后,卫星测高重力数据精度得到了极大的提高,其中SS V29.1卫星测高重力数据与船载重力数据之间标准差最小,为0.97×10^{-5} m/s^2。建议使用卫星测高重力数据时需对其进行噪声压制,减少噪声对数据处理转换及反演解释的影响。

参　考　文　献

[1] 金翔龙,高金耀. 西太平洋卫星测高重力场与地球动力学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1):1-6.
JIN Xianglong, GAO Jinyao. The Satellite Altimetry Gravity Field and the Geodynamic Feature in the West Pacific[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(1):1-6.

[2] 晁定波, 姚运生, 李建成, 等. 南海海盆测高重力异常特征及构造解释[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(4): 343-347.
CHAO Dingbo, YAO Yunsheng, LI Jiancheng, et al. Interpretaion on the Tectonics and Characteristics of Altimeter-Derived Gravity Anomalies in the South China Sea[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(4): 343-347.

[3] 戴勤奋,周良勇,魏合龙. 南黄海卫星重力场及构造演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 67-71.
DAI Qinfeng, ZHOU Liangyong, WEI Helong. Satellite Gravity Field and Tectonic Evolution of the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(4): 67-71.

[4] 许惠平, 刘万崧, 周云轩, 等. 卫星测高重力资料及其在南海莺-琼盆地中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(3): 368-371.
XU Huiping, LIU Wansong, ZHOU Yunxuan, et al. Altimetry Gravity and Its Applications in South China Sea[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33(3): 368-371.

[5] 纪晓琳, 王万银, 杜向东, 等. 利用重磁资料研究西非中南段含盐盆地构造区划[J]. 地球物理学报, 2019, 62(4): 1502-1514.
JI Xiaolin, WANG Wanyin, DU Xiangdong, et al. Tectonic Division by Gravity and Magnetic Data of Salt-Bearing Basins, South-Central Section of West Africa[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(4): 1502-1514.

[6] 赵齐乐,施闯,柳响林,等. 重力卫星的星载GPS精密定轨[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2008,33(8):810-814.
ZHAO Qile, SHI Chuang, LIU Xianglin, et al. Determination of Precise Orbit Using Onboard GPS Data for Gravity Modeling Oriented Satellites[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8): 810-814.

[7] 宁津生,王正涛,超能芳. 国际新一代卫星重力探测计划研究现状与进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2016,41(1):1-8.
NING Jinsheng, WANG Zhengtao, CHAO Nengfang. Research Status and Progress in International Next-Generation Satellite Gravity Measurement Missions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 1-8.

[8] 孙杨,姜效典,王燚,等. 卫星测高反演重力场在西太平洋海域的应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2017,47(6):87-94.
SUN Yang, JIANG Xiaodian, WANG Yi, et al. Application of Gravity Inversion from Satellite Altimeter Data in the West Pacific[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(6):87-94.

[9] 罗志才,钟波,周浩,等. 利用卫星重力测量确定地球重力场模型的进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1713-1727.
LUO Zhicai, ZHONG Bo, ZHOU Hao, et al. Progress in Determining the Earth's Gravity Field Model by Satellite Gravimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10):1713-1727.

[10] SANDWELL D T, SMITH W H F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS1 Satellite Altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B5):10039-10054.

[11] SANDWELL D T, SMITH W H F. Retracking ESR-1 Altimeter Waveforms for Optimal Gravity Field Recovery[J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 163(1):79-89.

[12] SANDWELL D T, SMITH W H F. Global Marine Gravity from Retracked Geosat and ERS-1 Altimetry: Ridge Segmentation Versus Spreading Rate[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114(B1):B01411.

[13] SANDWELL D T, GARICIA E, SOOFI K, et al. Toward 1 mGal Global Marine Gravity from CryoSat-2, Envisat, and Jason-1[J]. *The Leading Edge*, 2013, 32(8):892-899.

[14] SANDWELL D T, MULLER R D, SMITH W H F, et al. New Global Marine Gravity Model from GryoSat-2 and Jason-1 Reveals Buried Tectonic Structure[J]. *Science*, 2014, 346(6205):65-67.

[15] Scripps Institute of Oceanography. Global Gravity (1-minute Grid), 2014[EB/OL]. (2016-01-01)[2022-01-01]. https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi.

[16] ANDERSEN O B, KUNDSEN P. The Role of Satellite Altimetry in Gravity Field Modelling in Coastal Areas[J]. *Physics and Chemistry of the Earth Part A Solid Eaarth and Geodesy*, 2000, 25(1):17-24.

[17] ANDERSEN O B, KNUDSEN P, BERRY P A M. The DNSC08GRA Global Marine Gravity Field from Double Retracked Satellite[J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(3):191-199.

[18] DTU Space. GRAVSOFT ASC Ⅱ gzip, 2014[EB/OL]. (2016-01-01)[2022-01-01]. http://www.space.dtu.dk/english/Research/Scientific_data_and_models/downloaddata.

[19] FAIRHEAD J D, GREEN C M, ODEGARD M E. Satellite-Derived Gravity Having Animpact on Marine Exploration[J]. *The Leading Edge*, 2001, 20:873-876.

[20] 杨金玉,田振兴,韩波,等. 国内外重力异常编图进展及重力异常计算方法改进[J]. 地球物理学进展,2015,30(3):1070-1077.
YANG Jinyu, TIAN Zhenxing, HAN Bo, et al. Progress of Gravity Anomaly Calculation, Correction and Map Compilation[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(3):1070-1077.

[21] 张明华,张家强. 现代卫星测高重力异常分辨能力分析及在海洋资源调查中的应用[J]. 物探与化探,2005,29(4):295-298.
ZHANG Minghua, ZHANG Jiaqiang. Resolution of Modern Satellite Altimetric Gravity Anomaly and Its Application to Marine Geological Survey[J]. *Geophysical and Geochemical exploration*, 2005, 29(4):295-298.

[22] 罗佳,姜卫平,汪海洪,等. 中国区域SST卫星重力场模型精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2006,31(3):199-202.
LUO Jia, JIANG Weiping, WANG Haihong, et al. Precision Analysis of SST Gravity Field Model in China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(3):199-202.

[23] 杨金玉,张训华,张菲菲,等. 应用多种来源重力异常编制中国海陆及邻区空间重力异常图及重力场解读[J]. 地球物理学报,2014,57(12):3920-3931.
YANG Jinyu, ZHANG Xunhua, ZHANG Feifei, et al. Preparation of the Free-Air Gravity Anomaly

Map in the Land and Seas of China and Adjacent Areas Using Multi-source Gravity Data and Interpretation of the Gravity Field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(12):3920-3931.

[24] 范雕,李姗姗,孟书宇,等. 几种卫星测高海洋重力场模型精度比较分析[J]. 海洋测绘, 2021, 41(5):1-5.
FAN Diao, LI Shanshan, MENG Shuyu, et al. Comparing and Analyzing the Accuracy of Several Satellite Altimetry Maring Gravity Field Models[J]. *Hydrographic surveying and Charting*, 2021, 41(5):1-5.

[25] 王虎彪,柯小平,武凛,等. 西太平洋海域卫星测高重力异常反演与精度评估[J]. 海洋测绘, 2017, 37(6):1-4.
WANG Hubiao, KE Xiaoping, WU Lin, et al. Gravity Anomaly and Its Accuracy Assessment from Multi-source Altimetry Data in the Western Pacific Area[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2017, 37(6):1-4.

[26] BRIGGS I. Machine Contouring Using Minimum Curvature[J]. *Geophysics*, 1974, 39(1):39-48.

[27] SWAIN C J. A Fortran Ⅳ Program for Interpolating Irregularly Spaced Data Using the Difference Equations for Minimum Curvature[J]. *Computer and Geoscience*, 1976(1): 231-240.

[28] SMITH W H F, WESSEL P. Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension[J]. *Geophysics*, 1990, 55(3):293-305.

[29] 王万银,邱之云. 一种稳定的位场数据最小曲率网格化方法研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(6): 2003-2010.
WANG Wanyin, QIU Zhiyun. The Research to a Stable Minimum Curvature Gridding Method in Potential Field Data Processing[J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(6):2003-2010.

[30] 王万银,邱之云,刘金兰,等. 位场数据处理中的最小曲率扩边和补空方法研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(4):1327-1338.
WANG Wanyin, QIU Zhiyun, LIU Jinlan, et al. The Research to the Extending Edge and Interpolation Based on the Minimum Curvature Method in Potential Field Data Processing[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(4):1327-1338.

[31] MICKUS K L, AIKEN C L V, KENNEDY W D. Regional-Residual Gravity Anomaly Separation Using the Minimum-Curvature Technique[J]. *Geophysics*, 1991, 56(2):279-283.

[32] 纪晓琳,王万银,邱之云. 最小曲率位场分离方法研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3):1042-1058.
JI Xiaolin, WANG Wanyin, QIU Zhiyun. The Research to the Minimum Curvature Technique for Potential Field Data Separation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3):1042-1058.

[33] 纪晓琳,王万银,邱之云. 最小曲率位场分离方法参数选择试验研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(4):1441-1452.
JI Xiaolin, WANG Wanyin, QIU Zhiyun. Parameter Choose Experimental Research to the Minimum Curvature Technique Potential Field Data Separation Method[J]. *Progress in Geophysic*, 2019, 34(4): 1441-1452.

[34] 王莉娟. 多源卫星高度计中国近海及其邻域重力异常反演与精度检验[D]. 青岛:中国石油大学, 2012.
WANG Lijuan. The Inversion of the Gravity Anomalies and the Assessment of Its Accuracy Based on Multi-satellite Altimeter Data in China Sea and Its Vicinity [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2012.

[35] KEATING P, PINET N. Comparison of Surface and Ship Bome Gravity Data with Satellite-Altimeter Gravity Data in Hudson Bay[J]. *The Leading Edge*, 2013, 32(4):450-458.

[36] 黄谟涛,邓凯亮,欧阳永忠,等. 海空重力测量及应用技术研究若干进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1635-1650.
HUANG Motao, DENG Kailiang, OUYANG Yongzhong, et al. Development and Study in Marine and Airborne Gravimetry and Its Application [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1635-1650.

[37] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京:高等教育出版社, 1979.
Writing Group of *Mathematical Directory*. Mathematical Directory[M]. Beijing: Higher Education Press, 1979.

[38] 於宗俦,鲁林成. 测量平差基础[M]. 北京:测绘出版社, 1983.
YU Zongchou, LU Lincheng. Foundation of Measurement Adjustment[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1983.

[39] 郑德如. 回归分析和相关分析[M]. 上海:上海人民出版社, 1984.
ZHENG Deru. Regression Analysis and Correlation Analysis[M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1984.

[40] 罗孝宽,郭绍雍. 应用地球物理教程:重力、磁法

(下转第52页)