

基于海洋观测与再分析数据的海底地形估算

杨诚诚^{1,2}, 王传印^{2*}, 王久珂^{2,3}, 杨清华^{2,4}

(1. 中山大学海洋科学学院, 广东 珠海 519082; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000; 3. 中山大学人工智能学院, 广东 珠海 519082; 4. 中山大学大气科学学院, 广东 珠海 519082)

摘 要: 准确估算全球海底地形是海洋科学中的重要问题,也是经典难题。针对这一难题,从海洋动力学基础理论出发,提出了一条估算海底地形的新思路,即给定海面高度和海底压强,利用海水静力平衡关系高精度地估算海底地形。依据这个思路利用卫星海面高度和站位海底压强记录仪等观测数据对个别观测站位进行验证,同时利用再分析数据中的海面高度和海底压强在全球海域进行验证。结果显示,估算的海底地形误差明显小于卫星高度计和数字高程模型等传统观测手段的误差,表明上述思路具有较高的可靠性。

关键词: 海面高度;海底压强;海底地形;海底深度

中图分类号: P737.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)01-0038-10

0 引言

海底地形是物理海洋学、海洋生物学、海洋化学、海洋地质学等关注的重点^[1]。具体而言,海底地形通过深刻影响海洋环流形态^[2]进而影响地球气候^[3-5];海底地形的演变会改变局地生物多样性和区域食物资源的可持续性^[6-7];不准确的海底地形会增大海水体积估算误差,并进一步影响气候模式对海洋储碳能力模拟的准确性^[8-9];海底地形能揭示海底重要的地质历史活动^[10],在板块构造理论中扮演着重要角色^[11]。此外,在海啸传播建模^[12-13]、海洋基础设施建设(如搭建海上钻井平台、铺设海底电缆、开凿海底隧道)、船舶巡航规划^[14]等实际应用中也离不开准确的海底地形。

如何精准获取全球海底地形数据一直是海洋科学和技术的焦点问题。目前,海底地形观测主要依托船载回声测深仪、卫星高度计和数字高程模型^[15]等开展。船载回声测深仪利用安装在船底的换能器向海底发射声波,声波到达海底后反射回海

面,由回声测深仪接收反射声波,最后,通过声波发射和接收的时间间隔估算海底深度^[16-17]。船载观测的精度很高,误差约为海底深度的0.5%。但是,受限于点一线的观测方式,船载观测的空间覆盖率较低,目前只覆盖了全球约15%的海域^[18],难以给出完整的全球海底地形分布。卫星高度计则可以弥补上述问题。卫星高度计测量海底地形的原理为海底地形的起伏会造成重力加速度的变化^[19-20],一般而言,海底山脉会引起较大的重力加速度(见图1),相应地,山脉对海水的引力较大,从而吸引更多的海水,导致山脉上方的海平面向外膨胀凸出;而海底峡谷则会引起较小的重力加速度,相应地,峡谷对海水的引力较小,从而吸引的海水较少,导致峡谷上方的海平面向内收缩凹陷。因此,平均海面高度的变化可反映海底地形的起伏,从而可利用卫星高度计测量的海平面高度估算海底地形。这种方法能够给出全球海底地形的分布,但主要缺陷包括:①只能捕捉空间尺度相对较大海域的海底地形。卫星高度计只能检测到大于30微弧度的海面

收稿日期: 2023-11-21。

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)资助项目(SML2022SP401、SML2021SP201、SML2023SP217);广东省自然资源厅广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(粤自然资[2022]18号);中山大学中央高校基本科研业务费专项资金(23xkjc019)。

作者简介: 杨诚诚(1996-),男,博士在读,主要从事物理海洋学研究。E-mail: yangchch28@mail2.sysu.edu.cn

*通信作者: 王传印(1990-),男,副研究员,博士,主要从事物理海洋学研究。E-mail: wangchuanyin@sml-zhuhai.cn

倾斜(1 微弧度表示在水平 1 km 范围内,海面高度变化 1 mm);②海面起伏与海底地形之间的量化关系建立在经验基础之上,因此存在较大的测量误差^[21]。卫星高度计的测量误差在深海为 ± 150 m,在海岸线和大陆隆之间的海域达到 ± 180 m^[22]。SMITH 等基于卫星测高技术进行了深入探索^[20,23-24],通过构建数字高程模型将船载回声测深数据和卫星高度计测深数据相结合,成功绘制了全球海底地形图^[25]。数字高程模型数据在有船载观测的海域精度较高,而在缺乏船载观测的海域误差很大。目前,地球地形(Earth Topography, ETOPO)和海洋总测深图(General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO)计划^[26-27]分别提供了覆盖全球范围的高质量海底地形(测深)数据集,两者都通过融合多源的多样化数据构建了全球地形模型,数据源包括卫星数据、测深数据以及其他海洋和陆地测量数据;进一步地,通过使用先进的机器学习算法对数据进行校正和平滑,从而提供一系列连续且覆盖全球的海洋测深数据集。具体来说,ETOPO 的最新数据集 ETOPO2022 已经将空间分辨率提升至 15" (约 0.5 km),这标志着其地形数据的精确度和细节程度达到了新的高度。同样,GEBCO 最新发布的 GEBCO_2023 全球海洋模型也提供了 15" 间隔的网格数据,进一步提升了全球海洋地形数据的质量和可用性。尽管如此,这些模型仍受限于稀疏的深度测量观测,对海底地形的精细结构捕捉能力有限,尤其在海山等复杂地形区域,其误差可达 $\pm 50 \sim 200$ m^[28]。虽然这些数据集提供了全球范围内的海底地形信息,但在需要高分辨率和精确深度信息的

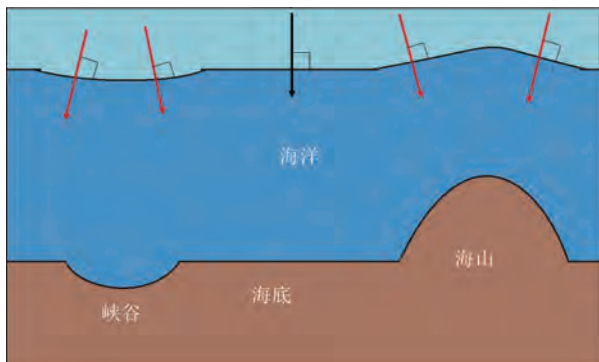


图1 海底地形影响海表面高度原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of how the oceanic bottom topography affects sea surface height

应用中,其稀疏性和误差可能会降低其有效性和可靠性。

鉴于此,亟需继续发展全球海底地形的高精度观测或估算方法。本文将从海洋动力学基础理论出发,利用海水静力平衡关系,提出基于海面高度和海底压强估算海底地形的的方法,并利用海底压强的站点观测和再分析数据检验该方法的可靠性。

1 海底地形估算方法与研究数据

1.1 海底地形估算方法

海水在垂向基本处于静力平衡状态,即重力和压强梯度力平衡:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 表示海水密度; p 表示压强; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$,表示重力加速度。对式(1)进行垂向积分,得:

$$\int_{z_B}^{z_S} dp = p_S - p_B = - \int_{z_B}^{z_S} \rho g dz = -g \int_{z_B}^{z_S} \rho dz \quad (2)$$

式中: p_S 和 p_B 分别代表海面压强和海底压强; z_B 和 z_S 分别表示海底深度和海面高度。因为:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{z_S - z_B} \int_{z_B}^{z_S} \rho dz \quad (3)$$

即 $\bar{\rho}$ 表示水柱垂向平均密度,所以式(2)可简化为:

$$p_S - p_B = \bar{\rho} g (z_B - z_S) \quad (4)$$

整理式(4)可得海底地形估算的一般表达式:

$$z_B = z_S + \frac{p_S - p_B}{\bar{\rho} g} \quad (5)$$

即给定海面高度 z_S 和海底压强 p_B (海面压强 p_S 一般取为一个标准大气压),可以方便地计算出海底地形 z_B 。由于具备坚实的物理基础,由式(5)可以算出高精度的海底地形数据,我们在后文的检验部分也将证实这一点。

1.2 研究数据

1.2.1 海底压强记录仪数据

海底压强记录仪(Bottom Pressure Recorder)数据来自平均海平面永久服务中心(Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL, 网址: https://psmsl.org/data/bottom_pressure/)。海底压强记录仪是一种放置在海底、用于测量水柱重量对海底产生

的压力的仪器。该数据包含了站位观测的海底压强、站位的地理坐标、站位海底深度等,这些数据经过了严格的质量控制和校准。本文使用的海底压强记录仪主要集中在太平洋、大西洋和赤道印度

洋,具体位置分布见图2。由于该套数据包含了海底压强数据和站位深度数据,可用于检验式(5)的可靠性,具体检验结果见2.1节。

图3a展示了一个记录仪(编号:43413_0910,位

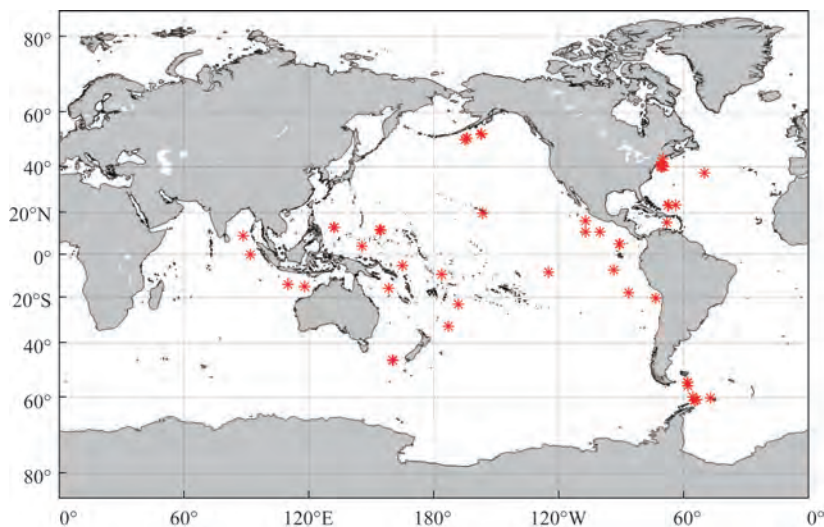


图2 海底压强记录仪位置

Fig.2 Distribution of the ocean bottom pressure recorders

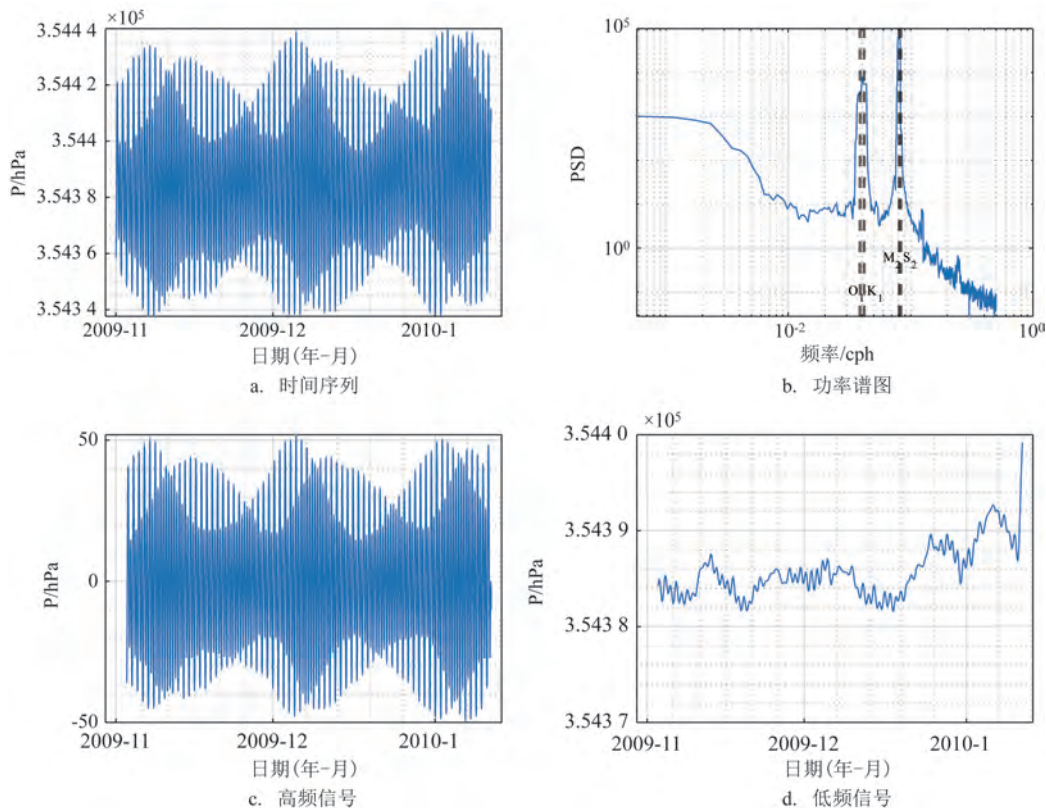


图3 记录仪观测的海底压强时间序列及对应的功率谱图和高/低频信号

Fig.3 Observed time series of the ocean bottom pressure, and its power spectra the high-frequency / low-frequency signal from a certain recorder

置: $\sim 100^\circ\text{W}$, $\sim 11^\circ\text{N}$, 布放位置海底深度: 3 560 m) 观测海底压强的逐小时序列, 图 3b 为该时间序列的功率谱, 图 3c、3d 分别展示了该时间序列的高频部分和低频部分, 高通滤波和低通滤波的截止周期为 2 天。在观测期间, 海底压强呈现显著的多周期变化特征, 即曲线颜色最深的地方表示压强变化最快, 对应半日潮(主要为 M_2 和 S_2 分潮); 曲线颜色较浅的地方表示压强变化较慢, 对应全日潮(主要为 K_1 和 O_1 分潮); 此外, 从图中还可以发现存在亚惯性频率的大、中尺度运动。总体而言, 海底压强记录仪很好地捕捉了潮汐、中尺度运动等处于静力平衡的动力过程。为了与第 1.2.3 节海面高度逐天数据保持一致, 后文均采用低通滤波后的海底压强数据。

1.2.2 海水密度产品

气候态海水密度产品来自世界海洋图集 (World Ocean Atlas)^[29], 数据下载网址为 <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-atlas-2018/>。该数据产品包括全球海洋温度、盐度、氧气、磷酸盐、硅酸盐和硝酸盐等, 由世界海洋数据库 (World Ocean Database, WOD) 的剖面数据 (包括来源于全球各地的海洋观测站点、船只、浮标、潜标以及卫星观测等多种手段收集的海洋数据) 经客观分析生成, 其中海水密度由温度、盐度、压强计算得到。在该数据集中, 多年平均的海水密度场的水平空间分

辨率为 0.25° , 垂向共分 102 层, 垂向分辨率随深度变化不等 (见图 4), 表层分辨率最高 (约为 5 m), 中、深层 (最深处超过 5500 m) 的垂向分辨率逐渐加大 (约为 10 m、25 m、100 m)。密度采用多年平均客观分析数据, 并与海底压强记录仪数据一起用于式 (5) 的站位检验。

图 5 展示了海表密度的全球分布。在表层大洋, 海水密度与温度和盐度有关。整体而言, 表层大洋的密度场沿纬向呈带状分布, 即在东—西方向上量值的差异变化相对较小, 南—北方向上相对显著。赤道地区的表层海水密度最小, 约为 $1\,021\text{ kg/m}^3$ 。从

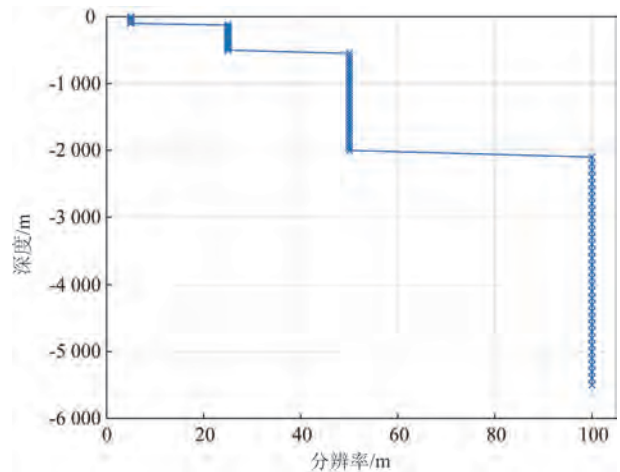


图4 WOA2018数据的垂向分辨率

Fig.4 The vertical resolution of the WOA2018 data

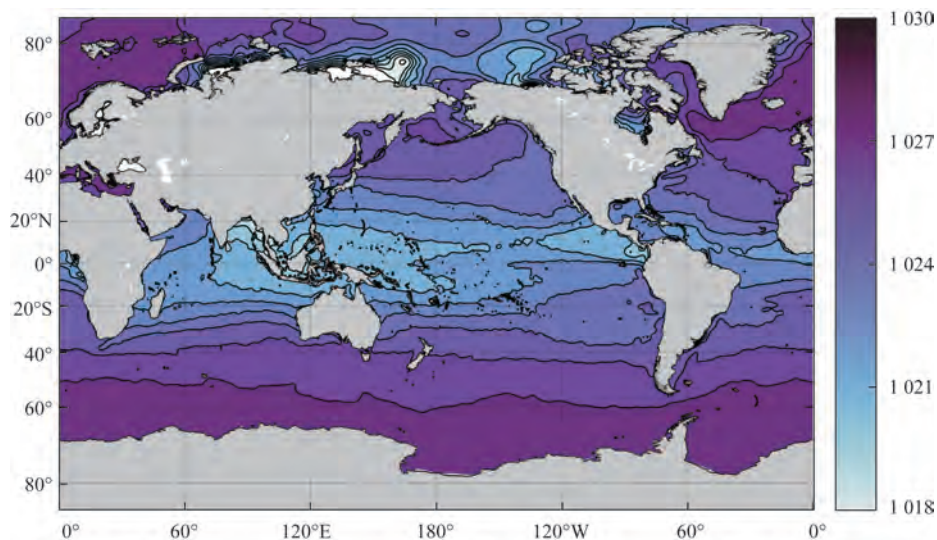


图5 WOA2018全球海表密度(单位: kg/m^3)

Fig.5 The sea surface density from the WOA2018 data (unit: kg/m^3)

赤道向两极,密度开始逐渐增大。副热带海域的海水密度增大至 $1\,023\sim 1\,025\text{ kg/m}^3$ 。北半球副极地地区的海水密度存在极大值,约为 $1\,026\sim 1\,028\text{ kg/m}^3$,随着纬度升高,密度略有下降;南半球有所不同,表层海水密度一直随着纬度的升高而升高,在南极海域附近达到最大,约为 $1\,029\text{ kg/m}^3$ 。此外,受到热盐环流的影响,大西洋和太平洋的盐度存在差异,因此导致北大西洋高纬度地区的表面密度高于同纬度太平洋地区^[30]。

1.2.3 海面高度资料

海面高度数据来自法国海洋卫星存档中心 (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic, AVISO) 提供的动力地形 (网址: <https://www.aviso.altimetry.fr/>)。该数据融合了多个卫星高度计任务,包括 TOPEX/Poseidon、Jason 系列等,可提供高精度的全球海面动力地形。本文使用两种动力地形数据:一种是全球平均动力地形,该数据为 1993—2012 年卫星观测的动力地形平均值,其水平空间分辨率为 $1/8^\circ$;另一种是卫星观测逐日动力地形,其水平空间分辨率为 $1/4^\circ$ 。本文将使用该海面高度数据、海底压强记录仪数据和海水密度数据检验式(5)的有效性。

图 6 展示了全球海洋平均动力地形。从图中可以看出,赤道地区的海平面明显高于大地水准面,从赤道向两极,海面高度整体呈降低趋势,两极的海平面均低于大地水准面,其中南极附近的海平面最低。在全球范围内,最高动力地形位于副热带北

太平洋,比副热带大西洋的最高动力地形高出约 $70\sim 80\text{ mm}$ 。最低动力地形则环绕南极洲,位于南极绕极流以南。北大西洋和北太平洋副极地地区的动力地形相对较低。通过动力地形的等值线可以观察到,各大洋中存在明显的大尺度环流,包括太平洋和大西洋副热带流涡、南印度洋副热带流涡、北太平洋和北大西洋副极地流涡等。黑潮、墨西哥湾流、南极绕极流等典型强海流现象也清晰可见^[30]。

1.2.4 ECCO2 数据

由美国国家航空航天局发展的模式同化数据 (Estimating the Circulation and Climate of the Ocean Phase II, ECCO2, 网址: <https://www.ecco-group.org/>) 包含了完整的海底压强、海底地形、海面高度、海面压强和海水密度的模式输出资料,是检验本文方法的适用数据。ECCO2 数据的水平分辨率为 0.5° ,垂向包含 50 层,垂向分辨率随深度的增大而增大。

图 7 展示了 1993 年 1 月的 ECCO2 海底压强、海面高度、海表密度和海面压强。海底压强最大的区域主要位于太平洋、大西洋以及印度洋洋盆;相比之下,北冰洋、南极附近地区海底压强较小。海面高度从赤道到两极呈下降趋势,其中南极附近海域的海面高度比北极更低,这与观测资料十分接近,此外, ECCO2 海面高度还清晰勾勒出了大尺度环流的形态,如太平洋副热带流涡等。海表密度沿纬向呈带状分布,从赤道向两极逐渐增大,这与观测资料十分接近。海面压强呈现出典型的气压带轮廓,包括赤道低压、副热带高压、副极地低压、极地高压等。

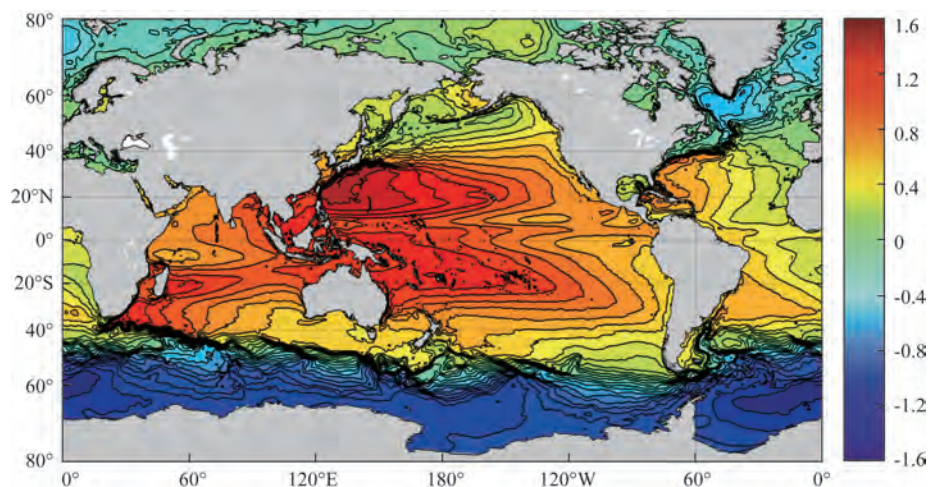


图 6 全球平均动力地形(单位:m)

Fig.6 The global mean dynamic topography (unit: m)

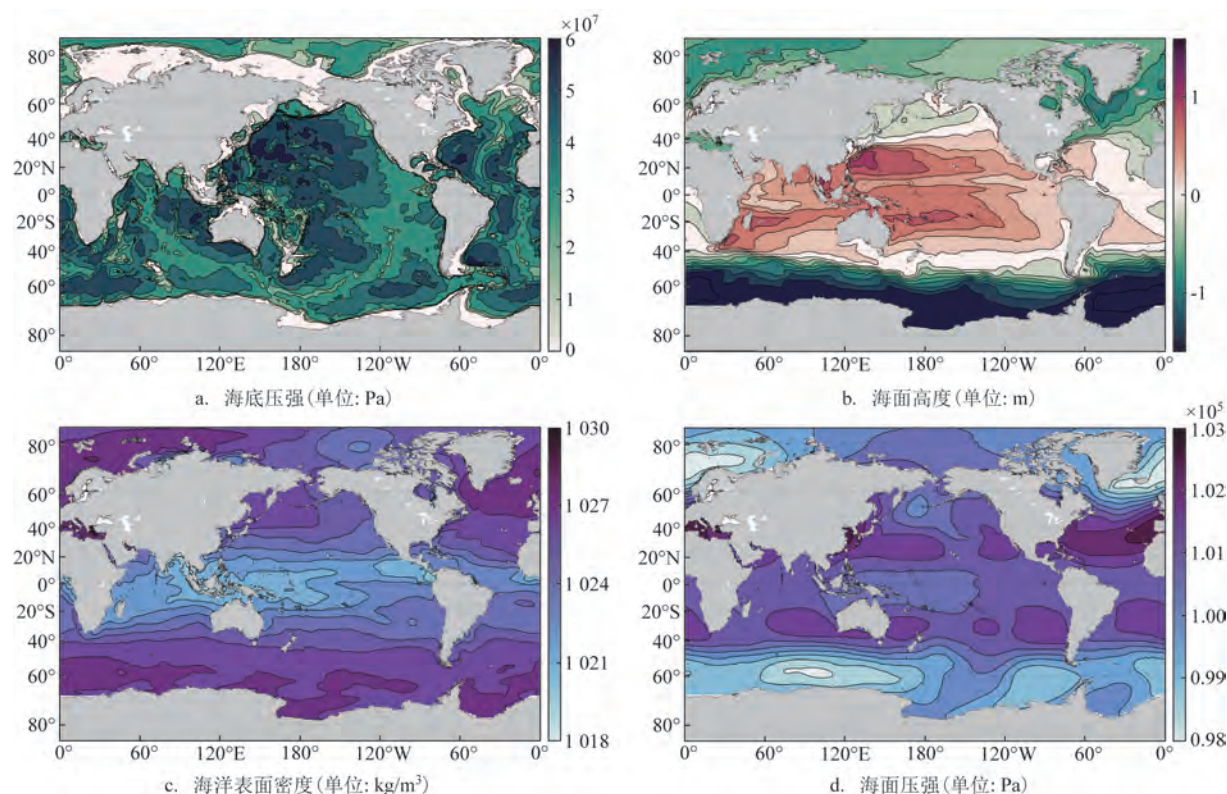


图7 ECCO2海洋变量

Fig.7 The oceanic variables from the ECCO2 data

2 海底地形估算结果与检验

2.1 站位观测计算检验

本节利用海底压强记录仪站位数据对海底地形估算方法即式(5)进行检验。 z_s 和 p_b 参数可分别通过AVISO海面高度观测和压强记录仪获得,垂向平均海水密度 $\bar{\rho}$ 通过WOA2018数据获得。站位检验的基本思路如下:首先通过站点记录仪观测的海底压强时间序列、卫星海面高度时间序列和WOA2018海水密度估算海底深度并得到时间序列,将其与记录仪观测的标准深度对比;然后利用该站点的时域平均海底压强、时域海面高度和海水密度估算海底深度,将该深度与记录仪观测的标准深度进行对比;最后用时域平均变量(包括海底压强和海面高度)在所有站位估算海底地形。通过上述一系列步骤全面检验式(5)的适用性。

图8为基于一个海底压强记录仪(记录仪编号:46402_9900,位置:165.0°W,50.5°N)估算的逐日海

底深度。从中可以明显看出,基于1999年10月—2000年8月的数据估算的海底深度仅为4 916.8~4 917.1 m,最大与最小估算值之差不足0.3 m。与该站点的真实海底深度(~4 918 m)相比,相对误差约为-0.02%,远小于卫星高度计和数字高程模型等传统观测手段的误差。需要进一步强调的是,新方法的误差同样远小于高精度的船载观测所产生的误差。考虑到观测的不确定性,本文提出的海底地形估算方法有望利用高精度、高分辨率的观测资料获得高精度海底地形资料。利用该站点的时域平均海面高度和海底压强估算的海底深度为~4 916.95 m,绝对误差和相对误差分别为-1.05 m和-0.021 3%,远小于3种传统观测手段记录的误差。上述结果验证了估算方法的可靠性,同时也说明可使用时域平均海底压强和海面高度估算每个站点的海底深度。

接下来利用各站点的平均海底压强和海面高度估算全球159个海底压强记录仪站位的海底深度。图9为压强记录仪布放位置的海底深度与估算

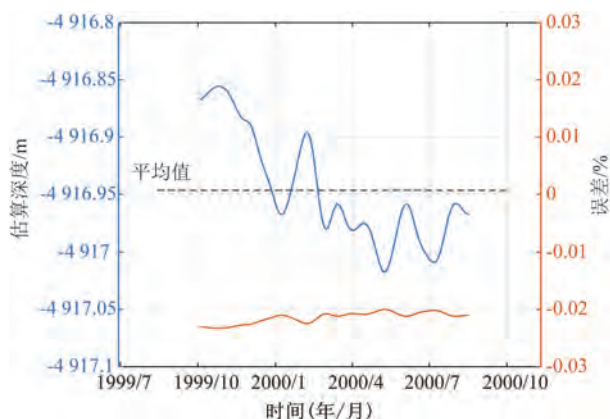


图8 基于一个海底压强记录仪数据估算的海底深度

Fig.8 The oceanic bottom depth derived from observations of a recorder

海底深度的对比。定性地看,所有蓝圈(每个蓝圈对应一个站点)都在斜率为1的 $Y=X$ 直线附近,不存在明显的离群值和系统性误差,这说明式(5)估算的海底深度与观测值匹配良好。定量地看,仅有5个站点的估算误差较大,为12%~14%,这些站点主要分布在南美洲南部的南大洋海域(60°W , 60°S 附近),且海底深度都较浅($\sim 1\,000\text{ m}$),这些误差可能是由于海面压强的不确定性导致;其他站点的估算误差为 $\pm 0.1\%\sim 6\%$,远小于卫星高度计和数字高程模型等手段产生的误差。

2.2 全球海域计算检验

全球海洋再分析数据ECCO2包含了完整的海面高度、海面压强、海水密度、海底压强和海底深度,为式(5)在全球海域的检验提供了重要的支撑。检验的基本思路为:首先选取一个站点的海面高度、海面压强、海水密度、海底压强时间序列来估算海底深度,将其与ECCO2真实海底深度进行对比;然后利用该站点上述变量时域平均值估算海底地形,将估算深度与ECCO2真实深度进行对比;最后在所有网格点估算单一时刻的全球海底地形,并与ECCO2真实深度进行比较。通过上述一系列步骤检验式(5)在全球海域的可靠性。

为统一起见,从ECCO2数据中选取与图8相同的站点。图10展示了该站点(165.0°W , 50.5°N)的估算深度。从中可以清楚地看出,基于1992—2018年的数据估算的海底深度仅在 $4\,779.0\sim 4\,779.6\text{ m}$

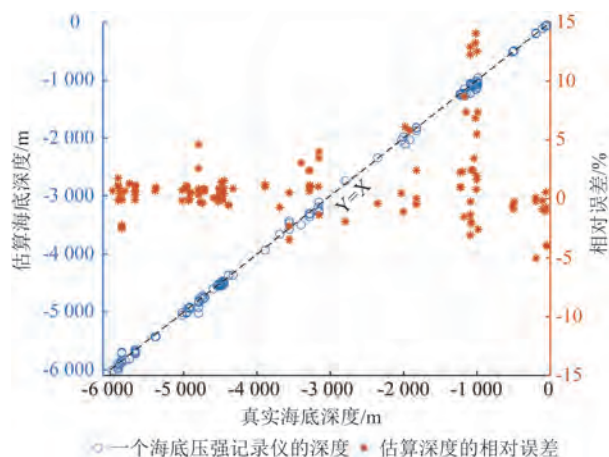


图9 观测海底深度与估算海底深度

Fig.9 The comparison of the observed and estimated depths

间小幅度变化,最大与最小估算深度之差不足 0.6 m ,这在一定程度上证明了式(5)的可行性。与该站点ECCO2真实海底深度($\sim 4\,834\text{ m}$)相比,相对误差在 -1.13% 附近变化,远小于卫星高度计和数字高程模型等观测手段产生的误差。利用时域平均变量估算的海底深度为 $\sim 4\,779.25\text{ m}$,其绝对误差和相对误差分别为 -54.75 m 和 -1.1326% ,仍远小于卫星高度计和数字高程模型等观测手段带来的误差。此外,长期稳定的海底深度估算也说明了采用单一时刻ECCO2数据在全球海域检验方法中的可靠性。

图11a为ECCO2模拟的全球海底地形,图11b则展示了基于1993年1月的ECCO2数据估算的海底地形。定性地看,两者表现出高度的一致性,特别地,海底地形估算方法很好地再现了大西洋、印

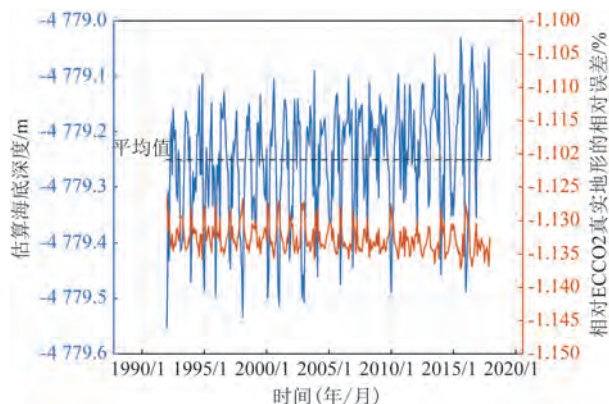


图10 ECCO2站点海底深度

Fig.10 The oceanic bottom depth from the ECCO2 data

度洋和太平洋中脊等典型海底地形。为定量对比,将图 11b 中的海底深度除以图 11a 中的海底深度得到深度比率。整体而言,几乎所有海域的深度比率为 ~ 1 ,这表明基于模式结果估算的海底地形与 ECCO2 模式的海底地形非常一致;具体而言,全球海域超过 99.3% 的网格点的深度比率为 $0.99 \sim 1.01$,但是东西伯利亚海和喀拉海(150°E , 70°N 附近)等海域的深度比率较大,说明该方法在这些海域表现出高估。图 12 以更形象、更直观的方式对比了 ECCO2 模式地形与估算地形。整体来看,对深水区域估算深度的相对误差不超过 1.5% (见图 12a),小于卫星高度计和数字高程模型等观测手段引起

的误差,接近高精度的船载观测误差;而浅水区域(深度 $< 80\text{ m}$),部分网格点的估算海底深度大于 ECCO2 模式海底地形(见图 12b),相对误差逐渐从深水区域的 1% 左右逐渐增加到了浅层区域的 2% \sim 5%。这些误差有可能是由模式输出的不确定性导致的。尽管如此,估算深度的误差仍明显小于卫星高度计和数字高程模型等观测手段的误差。

综上,海底压强记录仪在个别站位的检验结果以及 ECCO2 数据在全球海域的检验结果都表明,本文提出的海底地形估算方法即式(5)具有良好的可靠性和广泛的适用性。

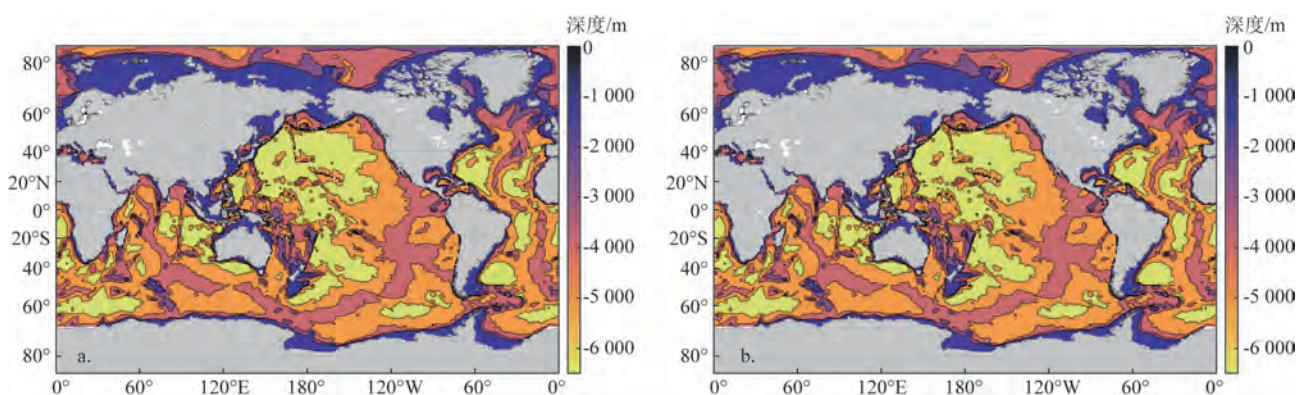


图 11 ECCO2 真实海底深度(a)以及基于 ECCO2 数据估算的海底深度(b)

Fig.11 The ECCO2 real depth and estimated depth based on the ECCO2 data

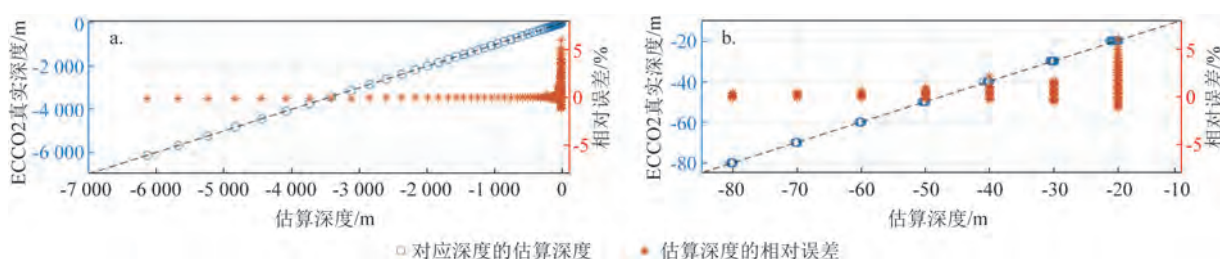


图 12 ECCO2 真实海底深度与估算海底深度的对比(a)以及在浅水区域的放大(b)

Fig.12 The comparison of the ECCO2 real depth and estimated depth (a), and the enlargement in the shallow region (b)

3 结论

本文借助海水静力平衡关系,提出了利用海面高度和海底压强估算海底地形的办法,并使用海底压强记录仪、海面高度等观测数据和全球海洋再分析数据 ECCO2 对该方法的可靠性进行了检验。利

用海底压强记录仪在个别站位的检验初步确认了新方法的可行性;利用 ECCO2 数据在全球海域的检验更全面地证实了新方法的可靠性。将来随着海面高度(通过卫星高度计观测)和海底压强(通过重力卫星观测)数据水平分辨率的提高,本文提出的方法有望在全球范围内给出高精度、高分辨率的海

底地形信息。

参考文献:

- [1] 赵建虎, 欧阳永忠, 王爱学. 海底地形测量技术现状及发展趋势[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1786-1794.
ZHAO J H, OUYANG Y Z, WANG A X. Status and development tendency for seafloor terrain measurement technology[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1786-1794.
- [2] GILLE S T, METZGER E J, TOKMAKIAN R. Seafloor topography and ocean circulation[J]. Oceanography, 2004, 17(1): 47-54.
- [3] GILLE S T. Mean sea surface height of the Antarctic Circumpolar Current from Geosat data: method and application[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1994, 99(C9): 18255-18273.
- [4] MORROW R, CHURCH J, COLEMAN R, et al. Eddy momentum flux and its contribution to the Southern Ocean momentum balance[J]. Nature, 1992, 357(6378): 482-484.
- [5] SANDWELL D T, ZHANG B H. Global mesoscale variability from the Geosat Exact Repeat Mission: correlation with ocean depth[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1989, 94(C12): 17971-17984.
- [6] KOSLOW J A. Seamounts and the ecology of deep-sea fisheries[J]. American Scientist, 1997, 85(2): 168-176.
- [7] PITCHER T J, MORATO T, HART P J B, et al. Seamounts: ecology, fisheries & conservation[M]. Oxford: Blackwell, 2007.
- [8] CHARETTE M A, SMITH W H F. The volume of Earth's ocean[J]. Oceanography, 2010, 23(2): 112-114.
- [9] STOCKER T F. The ocean as a component of the climate system[J]. International Geophysics, 2013, 103: 3-30.
- [10] HAXBY W F, KARNER G D, LABRECQUE J L, et al. Digital images of combined oceanic and continental data sets and their use in tectonic studies[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1983, 64(52): 995-1004.
- [11] HOCHMUTH K, GOHL K, UENZELMANN-NEBEN G. Playing jigsaw with Large Igneous Provinces—a plate tectonic reconstruction of Ontong Java Nui, West Pacific[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, 16(11): 3789-3807.
- [12] AN C, SEPÚLVEDA I, LIU P L F. Tsunami source and its validation of the 2014 Iquique, Chile, earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(11): 3988-3994.
- [13] SEPÚLVEDA I, LIU P L F, GRIGORIU M. Probabilistic tsunami hazard assessment in South China Sea with consideration of uncertain earthquake characteristics[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019, 124(1): 658-688.
- [14] SMITH W H F. Seafloor tectonic fabric from satellite altimetry[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1998, 26(1): 697-738.
- [15] Altimetric Bathymetry[EB/OL]. <https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/Isa/AltBathy/>.
- [16] 王怡之. 超声检测技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
WANG Y Z. Ultrasonic detection technology[M]. Beijing: People's Transportation Press, 2001.
- [17] 华乐荪. 水运工程中的声学测量技术[C]//交通水运工程科技情报网. 海洋水声学和勘察新技术论文选辑. 北京: 交通水运工程科技情报网, 1998.
HUA L S. Acoustic measurement technology in water transport engineering[C]//Transportation Water Transport Engineering Science and Technology Information Network. Selected Papers on Marine Hydroacoustics and Surveying New Technologies. Beijing: Transportation Water Transport Engineering Science and Technology Information Network, 1998.
- [18] WÖLFL A C, SNAITH H, AMIREBRAHIMI S, et al. Seafloor mapping—the challenge of a truly global ocean bathymetry[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 283.
- [19] DIXON T H, NARAGHI M, MCNUTT M K, et al. Bathymetric prediction from SEASAT altimeter data[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1983, 88(C3): 1563-1571.
- [20] SMITH W H F, SANDWELL D T. Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1994, 99(B11): 21803-21824.
- [21] SMITH W H F, SANDWELL D T. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings[J]. Science, 1997, 277(5334): 1956-1962.
- [22] SANDWELL D T, SMITH W H F. Bathymetric estimation[J]. International Geophysics, 2001, 69: 441-457.
- [23] VRDOLJAK L, BAŠIĆ T. Bathymetry estimation from satellite altimeter-derived gravity data[M]//BAŠIĆ T. Satellite Altimetry - Theory, Applications and Recent Advances. IntechOpen, 2023.
- [24] FORD P G, PETTENGILL G H. Venus topography and kilometer-scale slopes[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 1992, 97(E8): 13103-13114.
- [25] 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.
- [26] National Centers for Environmental Information. ETOPO 2022 15 arc-second global relief model[EB/OL]. NOAA National Centers for Environmental Information. [2023-11-21]. <https://doi.org/10.25921/fd45-gt74>.
- [27] GEBCO Compilation Group. The GEBCO_2023 Grid[EB/OL]. [2023-11-21]. https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2023/.
- [28] GARCIA H E, BOYER T P, BARANOVA O K, et al. World Ocean Atlas 2018: product documentation[EB/OL]. [2023-11-21]. <https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2020-04/woa18documentation.pdf>.
- [29] SEOANE L, RAMILLIEN G, BEIRENS B, et al. Regional

seafloor topography by extended Kalman filtering of marine gravity data without ship-track information[J]. Remote Sensing, 2022, 14(1): 169.

[30] TALLEY L D, PICKARD G L, EMERY W J, et al. Descriptive physical oceanography: an introduction[M]. 6th ed. New York: Academic Press, 2011.

Inferring the ocean topography based on oceanic observation and reanalysis data

YANG Chengcheng^{1,2}, WANG Chuanyin^{2*}, WANG Jiuke^{2,3}, YANG Qinghua^{2,4}

(1. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China; 3. School of artificial intelligence, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 4. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Accurately estimating the global seafloor topography is an important issue and a classic challenge in marine science. To tackle this problem, this study proposes a new approach for estimating the seafloor topography based on fundamental theories of ocean dynamics. Given sea surface height and ocean bottom pressure, the hydrostatic equilibrium relationship is utilized to effectively provide high-precision estimation of the seafloor topography. This paper validates the above approach at individual observation sites using satellite observations of sea surface height and records from bottom pressure recorders, and also in the global ocean using sea surface height and ocean bottom pressure from reanalysis datasets. The results show that the estimated seafloor topography errors are significantly smaller than those from traditional methods such as satellite altimetry and digital elevation models, indicating the high reliability of the proposed approach.

Key words: sea surface height; ocean bottom pressure; ocean topography; depth