

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.06.001

文章编号:1672-3767(2020)06-0001-09

引用格式:赵俐红,庞贝贝,凌子龙,等.基于改进的 FA2BOUG 法研究北极美亚海盆区域的布格重力异常特征[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(6):1-9.

ZHAO Lihong, PANG Beibei, LING Zilong, et al. Calculation of Bouguer gravity anomaly in the Arctic Amerasia Basin based on improved FA2BOUG method[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(6): 1-9.

基于改进的 FA2BOUG 法研究北极美亚海盆区域的布格重力异常特征

赵俐红^{1,2}, 庞贝贝¹, 凌子龙¹, 马媛媛¹, 曲彦丞¹

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要:为获得更为精确的北极美亚海盆区域的布格重力异常特征,利用最新发布的全球空间重力异常数据、水深数据和沉积层厚度数据,采用改进的 FA2BOUG 法计算了该区的布格重力异常值。计算过程中考虑到沉积物效应,进行了等效地形转换,让其替换 FA2BOUG 法中的原始水深数据进行完全布格校正(Bullard A、B 和 C)。结果显示,北极美亚海盆的布格重力异常介于 $150 \times 10^{-5} \sim 400 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间,深海地区数值较大,且由深海地区逐渐向海岸带附近逐渐变小,而海岭地区主要在 $200 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 左右变化。

关键词:北极;美亚海盆;布格重力异常;Parker;FA2BOUG

中图分类号:P312.1

文献标志码:A

Calculation of Bouguer gravity anomaly in the Arctic Amerasia Basin based on improved FA2BOUG method

ZHAO Lihong^{1,2}, PANG Beibei¹, LING Zilong¹, MA Yuanyuan¹, QU Yancheng¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National

Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266237, China)

Abstract: In order to obtain more accurate Bouguer gravity anomaly characteristics in the Amerasia Basin, an improved FA2BOUG method is adopted in this study to calculate the Bouguer gravity anomaly in this area by using the latest published free-air gravity anomaly data, bathymetric data, and sediment thickness data. Considering the sedimentary effect during the calculation, an equivalent terrain transformation was performed to replace the original bathymetric data in the FA2BOUG method with a complete Bouguer correction (Bullard A, B and C). The results show that the Bouguer gravity anomaly in Amerasia Basin ranges from 150×10^{-5} to $400 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$. The value in the deep sea area is larger and it gradually decreases from the deep sea area to the coast, whereas the value in the ridge areas varies around $200 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$.

收稿日期:2019-08-03

基金项目:国家自然科学基金项目(41676039)

作者简介:赵俐红(1976—),女,浙江诸暨人,副教授,主要从事岩石圈动力学、海洋地球物理和构造地质等方面的研究。

E-mail: skd992826@sdu.edu.cn

庞贝贝(1994—),女,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事地球动力学方面的研究.E-mail: berryppbb@163.com

Key words: Arctic; Amerasia Basin; Bouguer gravity anomaly; Parker; FA2BOUG

北冰洋以罗蒙诺索夫海岭(Lomonosov Ridge)为界,分为欧亚海盆(Eurasia Basin)和美亚海盆(Amerasia Basin)。欧亚海盆是北极地区地质年龄最小的海盆,具有明显的磁异常、重力异常特征,其构造演化历史较为清晰。与欧亚海盆不同,美亚海盆地质年龄大、面积广,并且由于缺乏可靠的地质地球物理资料,在认识其构造演化历史等方面存在很大争议^[1]。美亚海盆的主要海岭、海盆(如阿尔法-门捷列夫海岭(Alpha-Mendelev Ridge)和波德沃德尼科夫海盆(Podvodnikov Basin)的岩石圈性质、年龄和成因仍存在很大争议。

迄今为止,北极地区仍是多个国际科学研究计划的关键地区,有关该地区的研究不仅具有深远的政治意义,而且在海洋、冰川、气候、地质等领域亦具有重要的科学意义。1998年,Grantz等^[2]根据重力数据推断加拿大海盆存在一个古洋中脊。2007年,俄罗斯在北极地质大断面的调查研究中,证实了门捷列夫海岭属于减薄的陆壳^[3]。2012年北极潜艇科学项目(Submarine Arctic Science Program)在加科尔洋中脊(Gakkel Ridge)、罗蒙诺索夫海岭、楚科奇边缘地(Chukchi Borderland)获得了大量的多波束地形、声呐等数据,这些数据都对研究北冰洋的地质与构造演化具有重要意义^[4]。

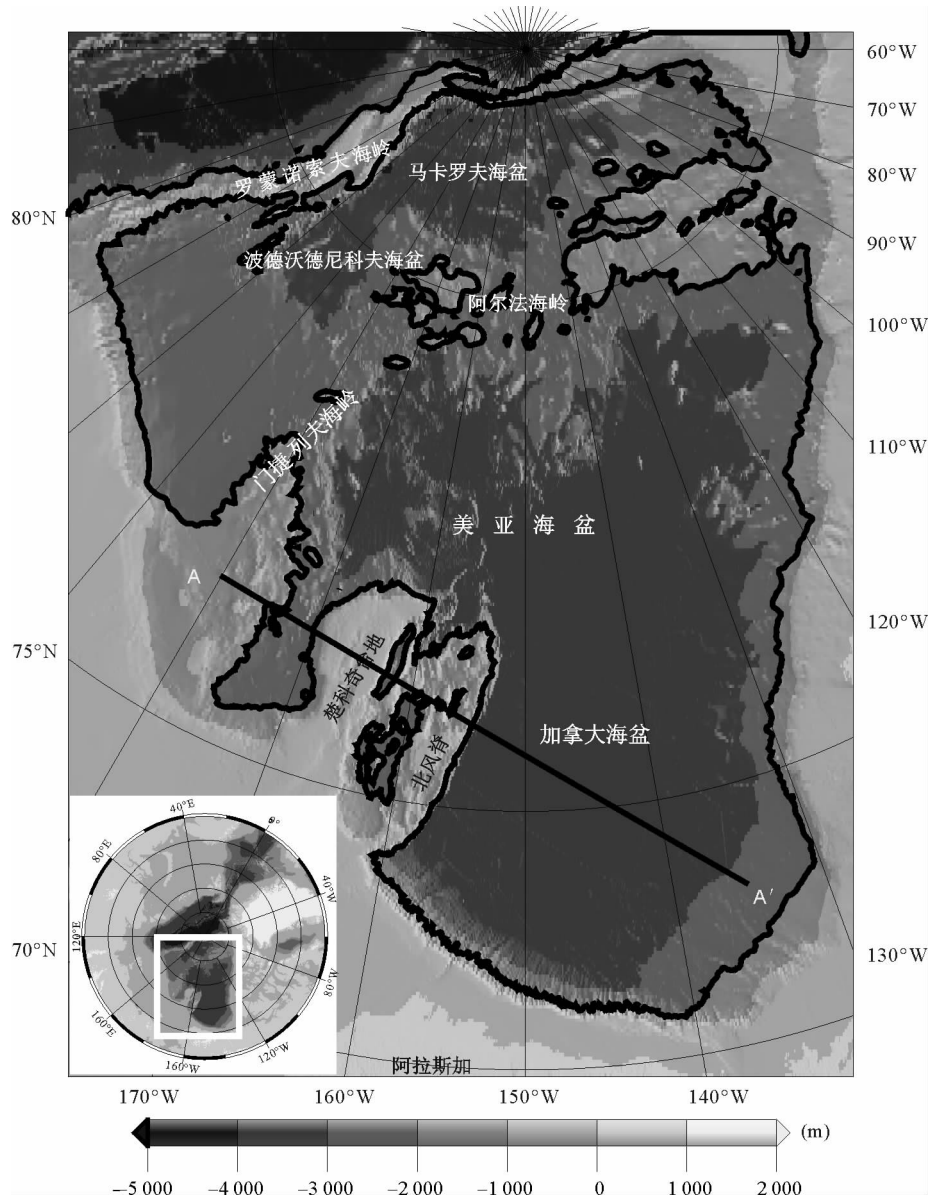
布格重力异常包含了地壳内各种偏离正常密度分布的地质构造的影响,也包括了地壳下界面起伏而在横向上相对于上地幔质量的巨大亏损(山区)或盈余(海洋)的影响,对于研究地壳结构具有重要作用。海洋布格重力异常的校正工作主要包含中间层(海水)校正以及地形校正。Parker^[5]在1973年通过在位场界面正演计算中引入快速傅里叶变换,极大地缩短了计算所用的时间,消除了较早的传统方法用公式逐点进行计算而忽略临近地形影响的缺点^[6]。Parker^[5]法在计算重力异常时,需要使用一个平均地形值,导致其在地形变化较大的区域存在偏差。Fullea等^[7]在2008年提出了FA2BOUG法,该方法逐点计算研究区的布格重力异常值,不需要使用平均地形值,在计算每一点过程中,考虑到研究区其他点对该点的重力影响,消除了忽略临近地形影响的缺点。但这一方法缺陷是在计算过程中不能很好地消除沉积物的影响^[8]。为解决这一问题,本文将沉积物转化为等质量的岩石得到等效地形,利用等效地形计算布格重力异常。

1 数据来源

研究区为北极美亚海盆地区,即 $105^{\circ}\text{E}\sim 50^{\circ}\text{W}$, $65^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ (图1)。水深数据采用的是全球海陆地形数据库(General bathymetric chart of oceans, GEBCO)海底2030项目发布的2019年最新全球水深网格数据^[9],采样间隔是15弧秒。空间重力异常数据(Free air Gravity Anomalies, FAA)使用的是世界重力模型2012(World Gravity Model 2012, WGM2012模型)^[10],采样间隔为2弧分(图2)。沉积层厚度数据使用新的全球5弧分总沉积厚度网格——全球沉积物(Global Sediment, GlobeSed)^[11](图3)。为减少由于曲线坐标的平面处理而产生的误差,使用极地立体投影,即将所有的数据集均投射到笛卡尔坐标系中,投影中心设定为 150°W 、 90°N 。

2 研究区概况

美亚海盆包含阿尔法-门捷列夫海岭、加拿大海盆(Canada Basin)、马卡罗夫海盆(Makarov Basin)以及波德沃德尼科夫海盆(图1)。加拿大海盆位于美亚海盆的南部,长约1 500 km,宽1 100 km,是北冰洋面积最大的海盆^[12],海盆底部为平坦的加拿大深海平原,大部分海域水深在3 000~3 500 m;加拿大海盆中央有一条明显的南北向的“反S”型的空间重力负异常带^[13],其重力异常值明显低于两侧。加拿大海盆北部为阿尔法-门捷列夫海岭,西部为楚科奇边缘地,东南方向与加拿大北极群岛的大陆边缘接壤,西南方向为阿拉斯加北极区域;加拿大海盆沉积厚度从楚科奇边缘地向阿拉斯加边缘增加,厚度最大处超过15 km^[14]。马卡罗夫海盆和波德沃德尼科夫海盆被罗蒙诺索夫海岭和阿尔法-门捷列夫海岭所包围,波德沃德尼科夫海盆毗邻东西伯利亚边缘的水深达2 800 m,马卡罗夫海盆水深约为4 000 m^[15]。阿尔法-门捷列夫海岭从西部的弗兰格尔岛起,延伸到埃尔斯米尔岛,总长约1 700 km,宽200~700 km,总面积70万km²,水深约2 000 m。

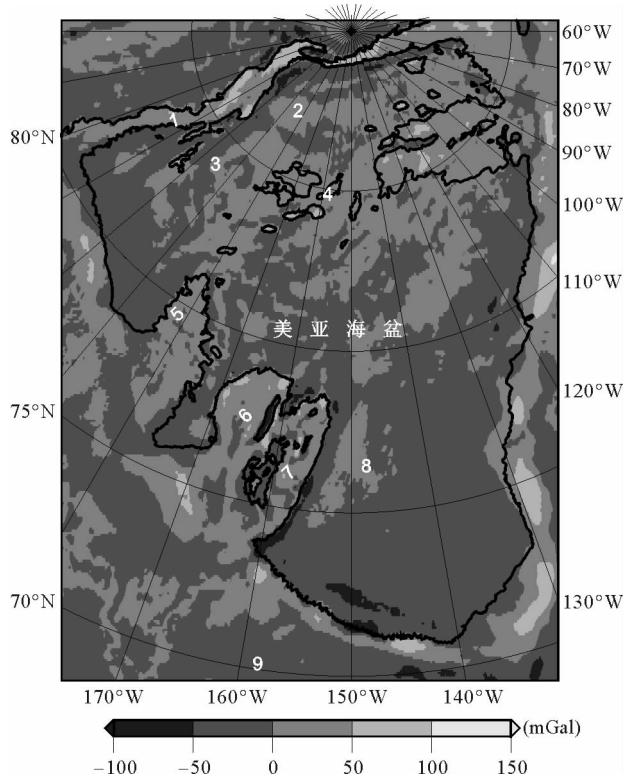


小图为北极区域地形图,白色框为研究区范围;经纬度 $105^{\circ}\text{E}\sim 50^{\circ}\text{W}$, $65^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$

图 1 美亚海盆水深图

Fig. 1 Bathymetric map in the Amerasia Basin

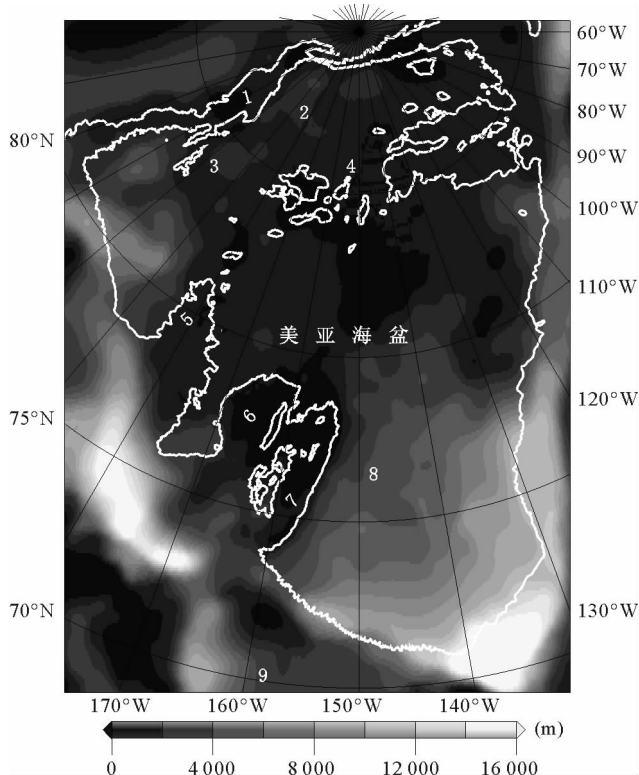
当前,由于美亚海盆的地质地球物理资料较少,且频繁的火山活动一定程度上扰乱了海盆区的磁性特征,致使其张开时间很难被确定^[15]。在北冰洋张开之前,北极地区构造主体是北极克拉通,周边分别是不同时期的造山带,而美亚海盆的门捷列夫海岭、阿尔法海岭、楚科奇边缘地均为陆壳,应该是北极克拉通的一部分^[12]。在中一晚侏罗世全球泛大陆裂解的背景下,加拿大海盆开始形成,但由于缺少地质地球物理资料的约束,其具体的海底扩张时间存在很大的争议,有观点认为是在 $140\sim 133\text{ Ma}$ ^[16],也有观点认为大约开始于 145 Ma ^[15]。有关加拿大海盆的构造模式归纳起来主要可以分为三类:陆壳洋壳化、古洋壳的捕获和海底扩张,目前大部分学者支持海底扩张模式,但对扩张方式又存在四种不同的解释模型,分别是:逆时针旋转模型、北极群岛走滑模式、北极阿拉斯加转换模式以及 Yukon 走滑模式^[17],目前主流模型是 Grantz 提出的基于“逆时针旋转”的“挡风玻璃雨刮式”模型。而对于整个美亚海盆的成因,虽主要认为是在原地扩张而形成的,但对其扩张的方向以及位置尚存在不同观点^[18]。



黑色粗线为 2 000 m 等深线;1—罗蒙诺索夫海岭;
2—马卡罗夫海盆;3—波德沃德尼科夫海盆;4—阿尔法海岭;
5—门捷列夫海岭;6—楚科奇台地;7—北风脊;
8—加拿大海盆;9—阿拉斯加

图 2 美亚海盆空间重力异常图

Fig. 2 Free-air gravity anomaly of the Amerasia Basin



白色曲线为 2 000 m 等深线;1—罗蒙诺索夫海岭;
2—马卡罗夫海盆;3—波德沃德尼科夫海盆;4—阿尔法海岭;
5—门捷列夫海岭;6—楚科奇台地;7—北风脊;
8—加拿大海盆;9—阿拉斯加

图 3 美亚海盆沉积层厚度图

Fig. 3 Sediment thickness of the Amerasia Basin

3 方法原理

Fullea 等^[7]提出的 FA2BOUG 法主要是为地形起伏较大的大陆地区设计的,目前已扩展到海洋区域。计算过程分三步:第一步,布格平板改正(Bullard A),将局部地形用一个密度恒定的无限横向延伸的平板近似,其厚度等于该点相对于海平面的高程;第二步,曲率改正(Bullard B),将布格平板替换为具有相同厚度的球形盖层,其表面距离为 166.735 km;第三步,地形改正(Bullard C),消除周围地形对计算点的重力影响。

该方法根据计算点与地形之间的水平距离(R)将计算点周围划分为三个计算区域:内部区域、中间区域以及较远区域。并在这个计算区域内计算 Bullard A、Bullard B 和 Bullard C 的改正值。对于海洋区域,在每个区域都使用不同的算法:

1) 内部区域($R < \Delta X_i/2$)(ΔX_i 为网格间距)是以计算点为中心、 ΔX_i 为边长的正方形。计算过程主要分两步:第一步,计算一个内平顶棱柱的垂直引力,该棱柱侧向伸展与内部区域大小相等,高度与计算点的高程相等;第二步,将内部区域分为四个具有恒定斜率的象限。

2) 中间区域($\Delta X_i/2 \leq R < R_i$)(R_i 为小范围的限制距离),用 Nagy 等^[19]给定的直角坐标系下的解析公式(1)计算矩形棱柱所产生的垂直引力。

$$\Delta g_{FTP}(\rho) = G_\rho \left| \left| \left| x \ln(y+r) + y \ln(x+r) - z \arctan\left(\frac{xy}{zr}\right) \right| \right| \right|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2}, \quad (1)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

$$\begin{cases} \rho = \rho_c, & E > 0; \\ \rho = \rho_c - \rho_w, & E < 0. \end{cases}$$

其中: G 为万有引力常数, 取 $6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; ρ_c 为地壳密度, 取 $2\,800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_w 为海水密度, 取 $\rho_w = 1\,030 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; E 是海平面测量的高度。

3) 在较远区域 ($R_i \leq R < R_d$) (R_d 为大范围的限制距离), 需考虑重力势的球谐展开以避免数值不稳定。其中 R_i 取 20 km , R_d 取 167 km , ΔX_i 取 2 km 。

为了得到研究区更为精确的布格重力异常, 需要去除研究区内沉积物的影响, 计算过程如图 4。北极地区沉积层厚度较大, 计算沉积基底界面的重力效应时, 需考虑到沉积层厚度与沉积物密度之间的关系, 根据 Glebovsky 等^[20] 提供的沉积厚度与沉积层密度的关系, 将沉积物分为不同厚度的 10 层 (表 1); 并采用公式 (2) 将沉积物等效为地壳。

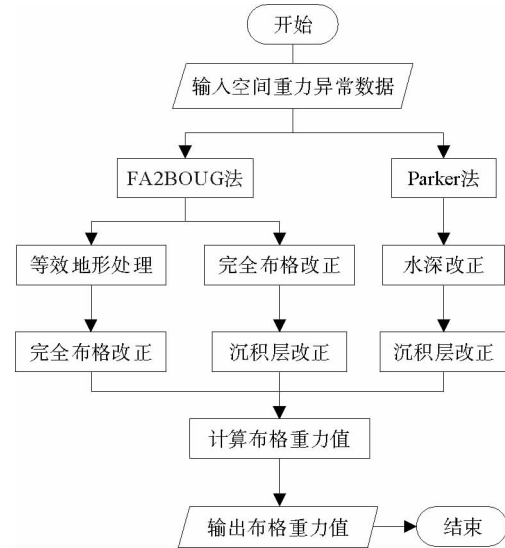


图 4 计算过程图

Fig. 4 Calculation process chart

表 1 沉积层厚度与平均密度的关系

Tab. 1 Relationship between sedimentary layer thickness and average density

沉积层厚度/km	0~0.2	0.2~0.4	0.4~1	1~1.5	1.5~2	2~3	3~4	4~5	5~8	>8
平均密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.56	1.7	2	2.28	2.4	2.6	2.7	2.75	2.77	2.79

$$h_{\text{cor}} = \frac{\rho_c - \rho_{\text{sed}}}{\rho_c} \times \Delta h, \quad (2)$$

式 (2) 中: ρ_c 为地壳密度; ρ_{sed} 各层沉积物密度; Δh 为沉积层厚度; h_{cor} 为等效地壳后沉降的高度, 通过每层不断的叠加 h_{cor} , 加上水深数据即可得到等效地形数据。

同时为了验证本研究所使用方法的可行性, 同样使用 Parker 方法进行该地区的完全布格重力异常计算, Parker 的正演公式为

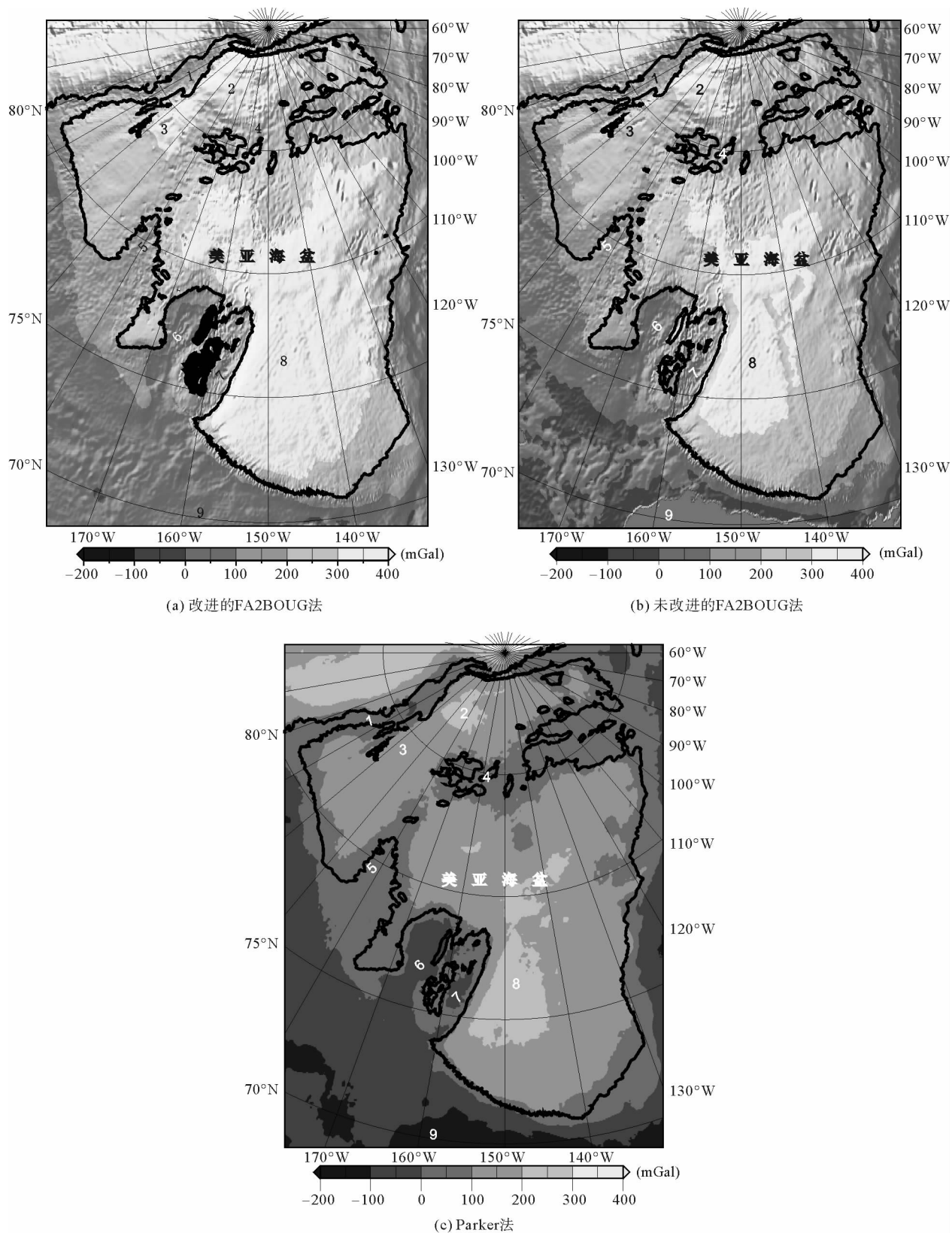
$$F[\Delta g(x, y)] = -2\pi G \Delta \rho e^{-|k|Z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|k|^{n-1}}{n!} F[T^n(x, y)]. \quad (3)$$

其中: F 表示傅里叶变换; $\Delta g(x, y)$ 为重力异常值; $\Delta \rho$ 为界面之间密度差值; k 为波数; Z_0 为平均水深值; $T(x, y)$ 为测深地形。

4 结果与讨论

本节采用基于改进的 FA2BOUG 法并使用等效地形数据, 对北极美亚海盆区域进行布格板改正、曲率改正以及地形改正后得到该区的布格重力异常值 (图 5(a))。为验证本文所用方法的可行性, 计算了研究区未经沉积效应改正的布格重力异常值 (图 5(b)) 以及使用 Parker 公式分层去除水深、沉积物影响的布格重力异常值 (图 5(c))。

从图 5 可以看出, 三种方法计算的布格重力异常与地形呈明显的负相关性。在美亚海盆内, 三种计算方法得到的布格重力异常值同为正值, 且与海底地形负相关, 随着水深不断加深, 异常值逐渐加大; 在美亚海盆边缘, 其地形变化幅度较大, 三种方法计算的布格重力异常值变化趋势相似且都具有非常陡的梯度。但在数值方面, 三种方法得到的结果存在明显差异, 显然采用改进的 FA2BOUG 法得到的布格重力异常值变化范围更大, 集中在 $-200 \times 10^{-5} \sim 400 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 而未改进的 FA2BOUG 法得到的布格重力异常值范围集中



图中黑色曲线为 2 000 m 等深线;1—罗蒙诺索夫海岭;2—马卡罗夫海盆;3—波德沃德尼科夫海盆;
4—阿尔法海岭;5—门捷列夫海岭;6—楚科奇台地;7—北风脊;8—加拿大海盆;9—阿拉斯加

图 5 美亚海盆布格重力异常图

Fig. 5 Bouguer gravity anomaly of the Amerasia Basin

在 $0 \sim 380 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 而 Parker 法所计算得到的布格重力异常值集中在 $-100 \times 10^{-5} \sim 200 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间。整体上, 相对于图 5(c) 中较为平滑的异常值变化, 图 5(a)、5(b) 的变化更加显著, 与地形(图 1)关系更为紧密。值得注意的是, 从图 5(a)、5(b) 中可以明显看出位于加拿大海盆的“反 S”型重力异常带, 而在图 5(c) 中没有显现, 由此可以看出 FA2BOUG 方法的优越性。

为进一步验证布格重力异常计算中进行等效地形处理的必要性以及三种方法在地形起伏较大地区的差异, 笔者在美亚海盆中选择了一条穿过楚科奇边缘地和加拿大海盆中的“古洋中脊”的剖面 AA' (具体位置见图 1), 提取该剖面的水深值(图 6)、沉积物厚度值(图 7)以及三种方法的布格重力异常值(图 8)。

从图 6~8 可以看出, 三种方法整体趋势保持一致, 与地形保持负相关关系。在地形起伏较大的地区, 如楚科奇边缘地, 基于改进的 FA2BOUG 法使用等效地形数据和未使用等效地形数据所得到的布格重力值差异不大, 但与 Parker 法所计算得到的布格重力异常值有非常明显的数值差异。结合图 7 和图 8 可以看出, 在沉积物厚度不大的地方, 沉积物的重力影响较小, 但随着沉积物厚度的增大, 进行沉积物改正与未进行沉积物改正的布格重力异常的差值也逐渐扩大。

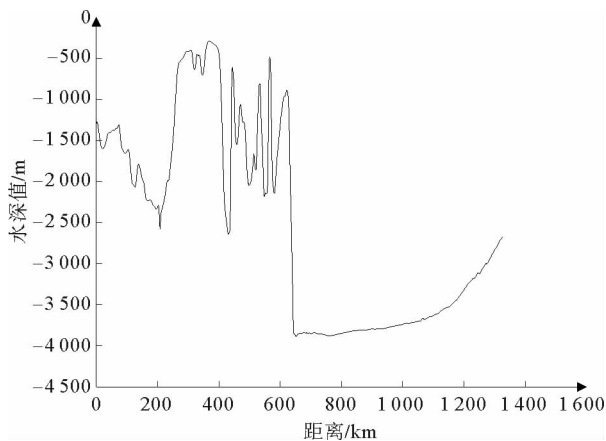


图 6 AA'剖面水深图

Fig. 6 Bathymetry of the AA' profile

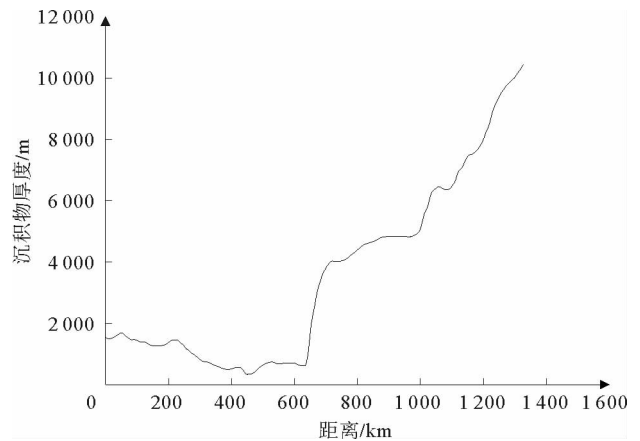


图 7 AA'剖面沉积物厚度图

Fig. 7 Sediment thickness of the AA' profile

为确定上述三种方法中深度与布格重力异常值之间的相关性, 对其进行了线性拟合处理(图 9), 计算每种方法的拟合度 R^2 , 拟合度越高, 变量之间相关性越强。由图 9 可知, 基于改进的 FA2BOUG 法的两者拟合度为 0.950 7, 未改进的 FA2BOUG 法的两者拟合度为 0.948 54, Parker 法的两者拟合度为 0.91, 由此可知采用改进的 FA2BOUG 法获得的布格重力异常值更加优越。

鉴于此, 采用改进的 FA2BOUG 法来计算北极美亚海盆的布格重力异常值并分析该区布格重力异常的分布特征, 为后期进一步研究该区的构造特征奠定基础。计算结果显示, 美亚海盆内布格重力异常变化主要集中在 $150 \times 10^{-5} \sim 400 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

在加拿大海盆中, 深海地区数值较大, 并且由深海地区向海岸带附近逐渐变小; 在马卡罗夫海盆以及波德沃德尼科夫海盆中变化幅度不大, 相对来说, 水深较深的马卡罗夫海盆异常

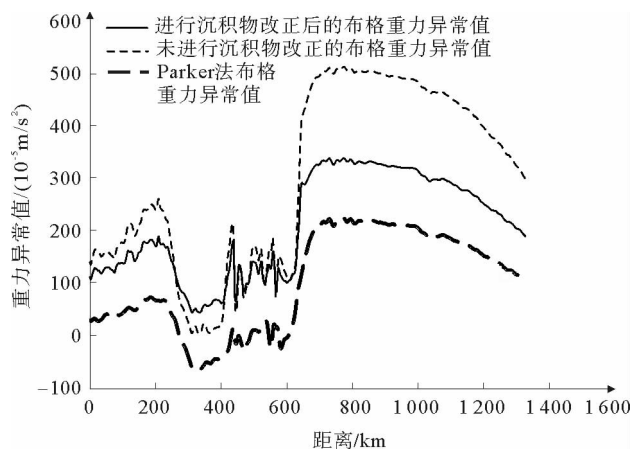
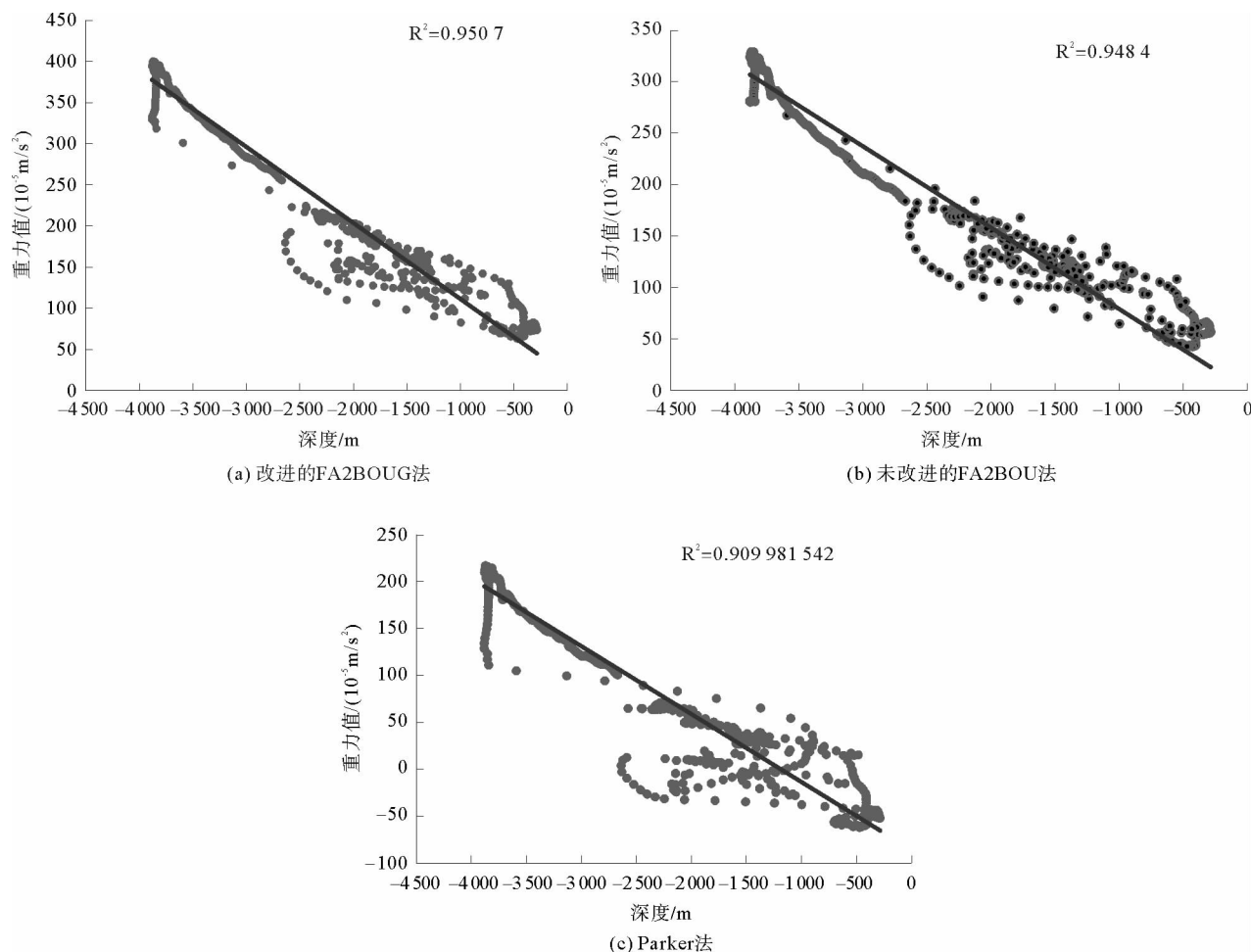


图 8 三种方法的 AA'剖面布格重力异常值

Fig. 8 Bouguer gravity anomaly of the three methods along AA' profile

值较大,达 $400 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。阿尔法-门捷列夫海岭的布格重力异常值不大,主要集中在 $200 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 左右。



黑色点为剖面对应的深度、布格重力异常值,直线为线性拟合趋势线

图9 深度与重力值的线性拟合图

Fig. 9 Linear fitting between depth and gravity value

5 结论

本研究利用全球最新发布的空间重力异常数据、水深数据以及沉积层厚度数据,进行沉积物改正后,基于改进的 FA2BOUG 法计算该地区的布格重力异常值。在计算过程中,为了验证所选用方法的正确性,选用了经典的 Parker 公式逐层去除水深、沉积物影响及未进行沉积物改正的 FA2BOUG 方法,分别计算该地区的布格重力异常值,将三种计算结果进行比较分析。

通过比较分析,三种方法得到的结果整体变化趋势相一致,但基于改进的 FA2BOUG 法计算得到的布格重力异常特征与地形具有更好的相关性,尤其在地形变化较大的区域。美亚海盆的布格重力异常值主要为 $150 \times 10^{-5} \sim 400 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,最大可达 $400 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;而海岭地区布格重力异常值在 $200 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 左右变化。

参考文献

- [1] 李江海,刘仲兰,王洛,等.北极地区大地构造特征及其构造演化—北极地区大地构造编图研究进展[J].海洋学报,2016,38(7):85-96.
- LI Jianghai, LIU Zhonglan, WANG Luo, et al. The tectonic setting and geological evolution of the Arctic: From compiling of tectonic map of the Arctic[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(7): 85-96.

- [2] GRANTZ A, CLARK D L, PHILLIPS R L, et al. Phanerozoic stratigraphy of Northwind Ridge, magnetic anomalies in the Canada basin, and the geometry and timing of rifting in the Amerasia Basin, Arctic Ocean[J]. Geological Society of America Bulletin, 1998, 110(6): 801-820.
- [3] 刘伟译. 北极地区的地震活动、结构和构造[J]. 世界地震译丛, 2016, 47(1): 1-21.
LIU Wei (Translated). Seismicity, structure and tectonics in the Arctic region[J]. Translated World Seismology, 2016, 47(1): 1-21.
- [4] 张华添, 李江海, 王洛, 等. 北冰洋地质与地球物理科学考察进展[J]. 极地研究, 2017, 29(1): 151-162.
ZHANG Huatian, LI Jianghai, WANG Luo, et al. Progress of geological and geophysical scientific investigations of Arctic Ocean[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2017, 29(1): 151-162.
- [5] PARKER R L. The rapid calculation of potential anomalies[J]. Geophysical Journal International, 1973, 31(4): 447-455.
- [6] 刘文忠, 孙建伟, 傅容珊. 用 Parker 公式进行海域布格重力异常校正[C]//1993 年中国地球物理学会第九届学术年会论文集. 长沙: 地震出版社, 1993: 176.
LIU Wenzhong, SUN Jianwei, FU Rongshan. Correction of Bouguer gravity anomaly in sea areas with Parker formula[C]// Proceedings of the 9th Annual Conference of Chinese Geophysical Society. Changsha: Seismological Press, 1993: 176.
- [7] FULLEA J, FERNÁNDEZ M, ZEYEN H. FA2BOUG-A FORTRAN 90 code to compute Bouguer gravity anomalies from gridded free-air anomalies: Application to the Atlantic-Mediterranean transition zone[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(12): 1665-1681.
- [8] DE MARCHI A C P, GHIDELLA M E, TOCHO C N. Analysis of different methodologies to calculate Bouguer gravity anomalies in the Argentine continental margin[J]. Geosciences, 2014, 4(2): 33-41.
- [9] GEBCO Compilation Group (2019) GEBCO 2019 Grid[EB/OL]. (2019-02)[2018-12-20]. https://www.gebco.net/data and products/gridded_bathymetry_data/.
- [10] BALMINO G, VALES N, BONVALOT S, et al. Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies[J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(7): 499-520.
- [11] STRAUME E O, GAINA C, MEDVEDEV S, et al. GlobSed: Updated total sediment thickness in the world's Oceans[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2019, 20(4): 1756-1772.
- [12] PISKAREV A, POSELOV V, KAMINSKY V. Geologic structures of the Arctic basin[M]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018: 295-325.
- [13] 马媛媛, 赵俐红, 凌子龙, 等. 加拿大海盆莫霍面分布特征及其构造意义[J]. 极地研究, 2019, 31(3): 284-290.
MA Yuanyuan, ZHAO Lihong, LING Zilong, et al. The Moho depth in the Canadian Basin and its tectonic implications[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2019, 31(3): 284-290.
- [14] KUTSCHALE H. Arctic ocean geophysical studies; The southern half of the Siberia Basin[J]. Geophysics, 2012, 31(4): 683.
- [15] ALVEY A, GAINA C, KUSZNIR N J, et al. Integrated crustal thickness mapping and plate reconstructions for the high Arctic[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 274(3/4): 310-321.
- [16] GOLONKA J, BOCHAROVA N Y, FORD D, et al. Paleogeographic reconstructions and basins development of the Arctic[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(3/4): 211-248.
- [17] 张登. 北极楚科奇边缘地地层与构造特征研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2015: 9-13.
ZHANG Deng. Straigraphy and tectonic characteristics of the Chukchi borderland, Arctic[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2015: 9-13.
- [18] 李学杰, 万玲, 万荣胜, 等. 北冰洋地质构造及其演化[J]. 极地研究, 2010, 22(3): 271-285.
LI Xuejie, WAN Ling, WAN Rongsheng, et al. The structure and tectonic revolution of Arctic ocean[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2010, 22(3): 271-285.
- [19] NAGY D, PAPP G, BENEDEK J. The gravitational potential and its derivatives for the prism[J]. Journal of Geodesy, 2000, 74(7/8): 552-560.
- [20] GLEBOVSKY V Y, ASTAFUROVA E G, CHERNYKH A A, et al. Thickness of the Earth's crust in the deep Arctic Ocean; Results of a 3D gravity modeling[J]. Russian Geology and Geophysics, 2013, 54(3): 247-262.

(责任编辑:高丽华)