

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017101101

# 插值切割法在南海重力数据处理中的应用

万荣胜, 张伙带, 陈洁

自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广州 510075

**摘要:**重力数据处理是进行重力反演和解译的必要环节, 其中将区域场和局部场分离对于重力勘探有着重要的作用。相比于其他算法, 插值切割法是一个优良的算法, 算法中切割半径是一个重要的参数。通过计算比较局部异常和区域异常与原始数据及地形数据的相关性, 认为可以通过相关性确定最佳切割半径, 应用于南海的重力异常数据分离, 并取得良好的分离效果。

**关键词:**重力数据处理; 插值切割法; 局部场; 区域场

**中图分类号:**P738.2      **文献标识码:**A

## Application of interpolation cut method to gravity data processing in South China Sea

WAN Rongsheng, ZHANG Huodai, CHEN Jie

Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510075, China

**Abstract:** Gravity data processing is the foundation of gravity inversion and data interpretation. In gravity exploration, it is critical important to separate the local anomalies from the regional field. Compared to other algorithms, the interpolation cut method is an excellent one and the cutting radius is an important parameter to the method. In this paper, we computed the correlation through comparison of the local and regional anomalies as well as the comparison of the original gravity data and the terrain data. The best cutting radius is determined by the correlation. Our practice suggests that the interpolation cut method works well in separating the local fields from the regional in the South China Sea.

**Key words:** gravity data processing; interpolation cut method; local field; regional field

重磁资料是揭示地质构造信息的重要依据, 在利用地球物理资料进行地质解释过程中, 重磁数据的处理是一个重要的环节。重力异常是由地下不同规模、不同形态和不同埋深的不均匀地质体的重力作用叠加而成<sup>[1]</sup>, 通常将实测获取的重力异常数据看成是区域异常场和局部异常场的组合<sup>[2]</sup>。区域场与局部场是一个相对的概念, 二者的划分可由所研究的对象不同而变化<sup>[3]</sup>。区域异常的分布范围大, 幅度大, 变化平缓, 一般由分布广的中深地质因素引起; 局部异常的分布有限, 幅度小, 梯度大, 一般由埋深浅、体积小的地质因素引起。依据勘探目标的不同, 需要将实测异常数据中区域性异常分离出来, 圈定局部异常, 从而更好地揭示与矿产、构造等相关地质现象的关系, 也能对分离后的异常数据进行更好的定量解释。因此, 将重力数据中的区域场和局部场分离对于重力勘探显得尤为重要。

异常分离是一个很早就出现的需求, 在 20 世纪 50、60 年代, 用于分离异常的数字处理方法已经提出, 经过几十年来人们不断的探索, 异常分离的方法越来越成熟, 并且出现了很多新方法<sup>[4-13]</sup>。这些方法由于数学原理不同, 应用前提也不尽相同, 具有针对性和选择性<sup>[1]</sup>, 在进行重力异常分离时应根据需求选取合适的方法。

插值切割法在程方道、文百红等<sup>[10-17]</sup>的研究基础上不断发展成熟, 该方法在分离重磁异常数据中具有抗干扰、计算速度快、收敛性好、分辨率和精度较高的特点, 是一种非常实用的异常分离方法, 并在实践中取得了很多重要的应用。基于上述优点, 本文选取插值切割法来对南海的重力场进行分离。

利用插值切割法分离重力场, 确定切割半径是一个关键。文百红<sup>[13]</sup>指出, 只有选择了最佳的切割半径, 才能取得最佳的分离效果。张虹<sup>[17]</sup>指出, 切

**资助项目:**国家重点研发计划“深水油气近海底重磁高精度探测关键技术”(2016YFC0303000); 国土资源部海底矿产资源重点实验室开放基金(KLMMR-2015-A-09)

**作者简介:**万荣胜(1979—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事遥感与 GIS 应用、数据处理, E-mail: wanrsh@126.com

**收稿日期:**2017-10-11; **改回日期:**2017-10-25. 蔡秋蓉编辑

割半径及切割精度一定要合理选取,数据间距要小,保证插值切割法发挥作用。由于地质现象的复杂性,所形成的重力异常在幅度变化、波长长短、叠加程度、干扰水平等方面也是错综复杂,因此,在确定最佳切割半径时,必须同时考虑异常和干扰的空间分布特征。一般是根据实际情况,选取一系列的切割半径,通过对比不同切割半径下的异常场分离效果来确定最佳的切割半径。如何从定量上分析确定一个最佳的切割半径,前人很少提及。本文以南沙群岛中北部的一块岛礁区域为例,通过计算比较,认为重力局部异常、区域异常与原始数据及地形数据的相关性系数可以作为确定最佳切割半径的依据,并将确定好的最佳半径应用于整个南海重力场的切割分离。

## 1 插值切割法原理

插值切割法的基本原理是构造一个切割算子<sup>[13]</sup>,重复作用于测点的场值,迭代切割使其收敛达到稳定值,得到区域场,从观测场中减去区域场即得到局部场。

针对矩形网格化的离散数据,汪炳柱等<sup>[13]</sup>给出了一个多次插值切割法的计算实例,具体算法如下:

设一个测区中某点的重力异常值为 $G(i, j)$ ,区域异常为 $R(i, j)$ ,局部异常为 $L(i, j)$ ,则有

$$G(i, j) = R(i, j) + L(i, j) \quad (1)$$

其中 $(i, j)$ 表示测点的行列坐标( $i=0, 1, 2, \dots, M; j=0, 1, 2, \dots, N; M+1$ 是 $x$ 方向的点数; $N+1$ 是 $y$ 方向的点数。)

计算点 $(i, j)$ 的区域异常是关键的一步,该点的 $R(i, j)$ 是其重力异常值与其周围4点的重力异常值的加权平均,用(2)式计算。

$$R(i, j) = [1 - a(i, j)/2]B(i, j) + [a(i, j)/2]G(i, j) \quad (2)$$

公式(2)中 $a(i, j)$ 为一个加权系数。 $B(i, j)$ 为4点的重力异常平均值,用公式(3)计算。

$$B(i, j) = 0.25[G(i + n_x, j) + G(i - n_x, j) + G(i, j + n_y) + G(i, j - n_y)] \quad (3)$$

这里 $n_x, n_y$ 分别为 $x$ 方向和 $y$ 方向的切割半径,通常取相同值,为点距的整数倍。

加权系数 $a(i, j)$ 由公式(4)计算。

$$a(i, j) = b(i, j) + c(i, j) \quad (4)$$

$$\text{其中, } b(i, j) = 1 / \{ [F_x(i, j)]^2 + 1 \} \quad (5)$$

这里 $F_x(i, j)$ 是 $x$ 方向的非线性度,由公式

(6)~(8)计算。

$$F_x(i, j) = \Delta B_{x1}(i, j) / \Delta B_{x2}(i, j) \quad (6)$$

$$\Delta B_{x1}(i, j) = G(i, j) - 0.5[G(i + n_x, j) + G(i - n_x, j)] \quad (7)$$

$$\Delta B_{x2}(i, j) = G(i + n_x, j) - G(i - n_x, j) \quad (8)$$

当 $B_{x2}(i, j) = 0$ 时,若 $B_{x1}(i, j) = 0$ ,则 $b(i, j) = 1$ ;若 $B_{x1}(i, j) \neq 0$ ,则 $b(i, j) = 0$ 。

$c(i, j)$ 和 $b(i, j)$ 的意义相同,由公式(9)~(12)计算。

$$c(i, j) = 1 / \{ [F_y(i, j)]^2 + 1 \} \quad (9)$$

这里 $F_y(i, j)$ 是 $y$ 方向的非线性度。

$$F_y(i, j) = \Delta B_{y1}(i, j) / \Delta B_{y2}(i, j) \quad (10)$$

$$\Delta B_{y1}(i, j) = G(i, j) - 0.5[G(i, j + n_y) + G(i, j - n_y)] \quad (11)$$

$$\Delta B_{y2}(i, j) = G(i, j + n_y) - G(i, j - n_y) \quad (12)$$

当 $B_{y2}(i, j) = 0$ 时,若 $B_{y1}(i, j) = 0$ ,则 $c(i, j) = 1$ ;若 $B_{y1}(i, j) \neq 0$ ,则 $c(i, j) = 0$ 。

在计算区域异常时,是重复利用公式(2)进行多次插值切割的。设 $R_k(i, j), R_{k-1}(i, j)$ 分别是经过 $k$ 次和 $k-1$ 次插值切割得到的点 $(i, j)$ 的区域异常,当 $k$ 趋向于 $\infty$ 时, $\max |R_k(i, j) - R_{k-1}(i, j)| = 0$ 。令 $V = \max |R_k(i, j) - R_{k-1}(i, j)|$ ,取 $e$ 为一个很小的正数,若 $V > e$ ,则令 $G(i, j) = R_k(i, j)$ ,进行下一次迭代计算;若 $V \leq e$ ,则可将 $R_k(i, j)$ 作为点 $(i, j)$ 的区域异常。

将式(1)变换为: $L(i, j) = G(i, j) - R(i, j)$ ,即可求出局部异常 $L(i, j)$ 。

切割半径是一个重要参数,它可以控制划分出不同层次的局部场和区域场。切割半径越大,切割出的局部场反映的地质体的深度和规模越大。

## 2 切割半径的确定

本文采用的南海重力数据来源于1:200万“南海地质地球物理图系——空间重力异常图”<sup>[21]</sup>,该重力数据的主体数据来源于我国的海洋重力实际测量,以广州海洋地质调查局历年调查成果为主,还包括国家海洋局及国外在南海的部分调查成果,空白及资料不足的地方用卫星测量数据补充<sup>[18-23]</sup>。

陈洁等<sup>[18]</sup>指出南海的大部分海岛海山等正向高地均与重力高重合。利用南海双子岛礁至九章群礁一带的地形数据和不同切割半径下分离的重力局部异常和区域异常数据,计算它们的相关性,可以从定量上对重力局部异常、区域异常与原始数据及海

底地形的对应关系做出探讨,从而确定一个最佳的切割半径来应用于整个南海的重力切割。

图 1 为南沙群岛中北部的海底地形,分布着双子群礁、中业群礁、道明群礁、郑和群礁和九章群礁等岛礁以及礼乐西海槽等,水深变化超过 4000m。图 2 为对应的空间重力异常图,可见重力异常的高低值与岛礁、沟槽有着明显的对应。

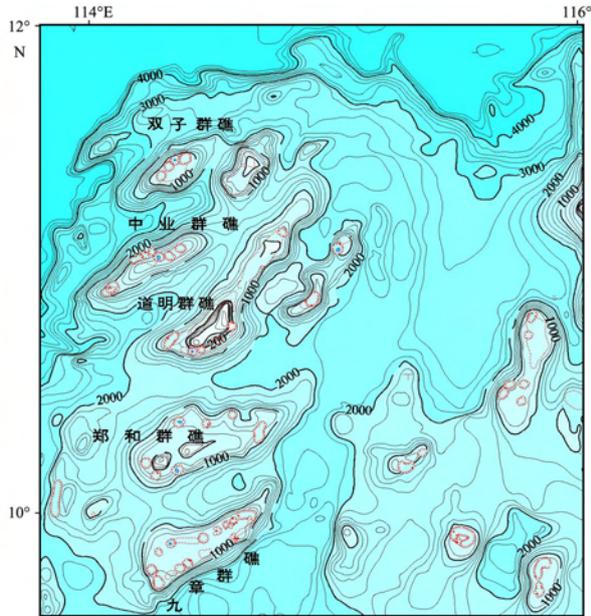


图 1 南沙群岛中北部地形图  
(引自南海地质地球物理图系)

Fig.1 Topographic map of the Nansha Islands (partial)

以一系列不同的切割半径对该区的重力进行局部异常和区域异常的分离,计算这些异常数据与未切割的原始数据及地形数据的相关性系数,如图 3、

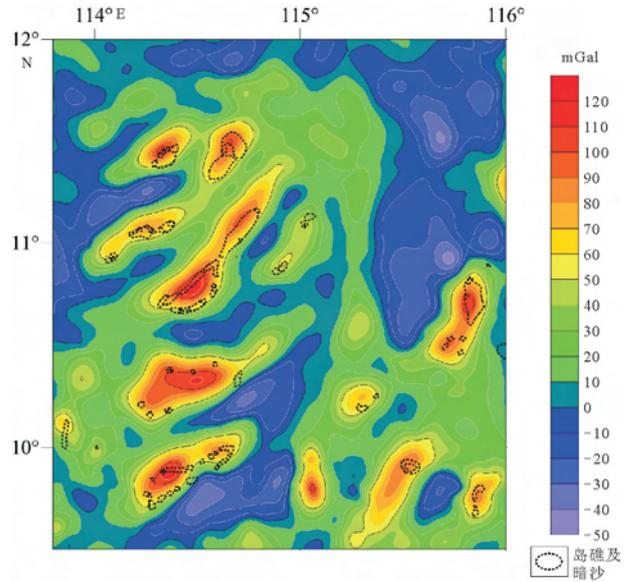


图 2 南沙群岛中北部空间重力异常图  
Fig.2 Free-air gravity anomaly map of the Nansha Islands (partial)

图 4 所示。其中,2~10km 之间以 2km 为间隔,10~100km 之间以 10km 为间隔。未切割的原始重力异常数据与地形的相关性系数为 0.692,重力异常与地形有极显著的相关性。

考察局部异常与原始重力数据的相关性(图 3),当切割半径增大时,相关性系数不断增大。切割半径在 2~20km 时增长很快;从 30km 到 100km,相关性系数基本保持不变,维持在 0.98 左右的高位,可以认为切割半径大于 30km 之后,对分离出局部异常的作用不大。重力与地形密切相关,随切割半径增大,局部异常与地形的相关性系数也不断增大(图 4)。切割半径在 2~30km 时增长很快,到 40km 以后,基本保持平稳。

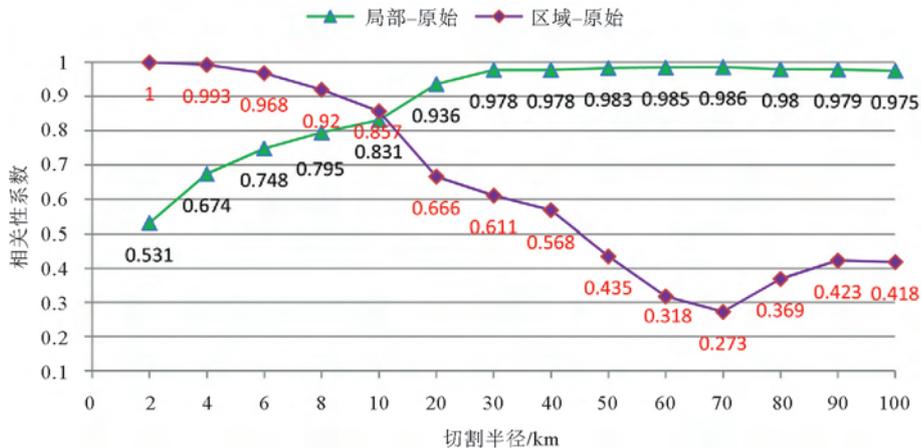


图 3 重力局部异常及区域异常与原始数据的相关性折线图

Fig.3 Correlation of local and regional gravity anomalies with original data

区域异常的相关性系数总体变化与局部异常是相反的,图3中与原始数据的相关性系数随切割半径的增加而下降,在70km时略有反转,在10km时与局部异常的折线相交;图4中与地形数据的相关性系数也是随切割半径的增加而下降,在2~30km为0.7~0.76,随后快速下降到50km处的0.493,之后保持稳定。

局部异常反映浅层地质因素的影响,区域异常反映中深部地质因素的影响。从分离角度来说,局部异常与原始数据及地形数据的相关性越低越好,但是切割半径小,分离得到的局部异常规模太小,而相应的区域异常不能反映深部的东西,如图3中切割半径为2、4km时,区域异常与原始数据的相关性很高,为1和0.993。因此需要在这两者之间权衡。

图5列出了切割半径为6~30km的局部异常

及区域异常分布图,不同的切割半径下均能较好地分离出局部异常及区域异常。切割半径为20、30km的区域异常特征不够明显,切割半径为10km的局部异常比切割半径为6、8km的细节更丰富。综合考虑,可以确定10km为最佳的切割半径,用于对整个南海的重力切割分离。

### 3 南海重力异常分离

前人的研究中,将南海的重力格局划分为北部陆架-陆坡异常区、中-西沙岛礁异常区、海盆异常区、南沙岛礁异常区、西部陆架-陆坡异常区和东部岛弧-海沟异常区<sup>[24-26]</sup>等,并通过重磁分析探讨南海构造及演化问题<sup>[27-30]</sup>。

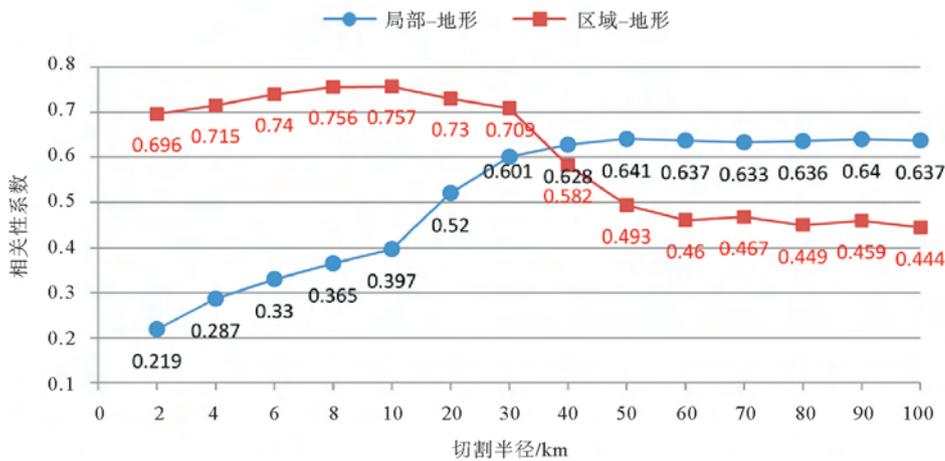
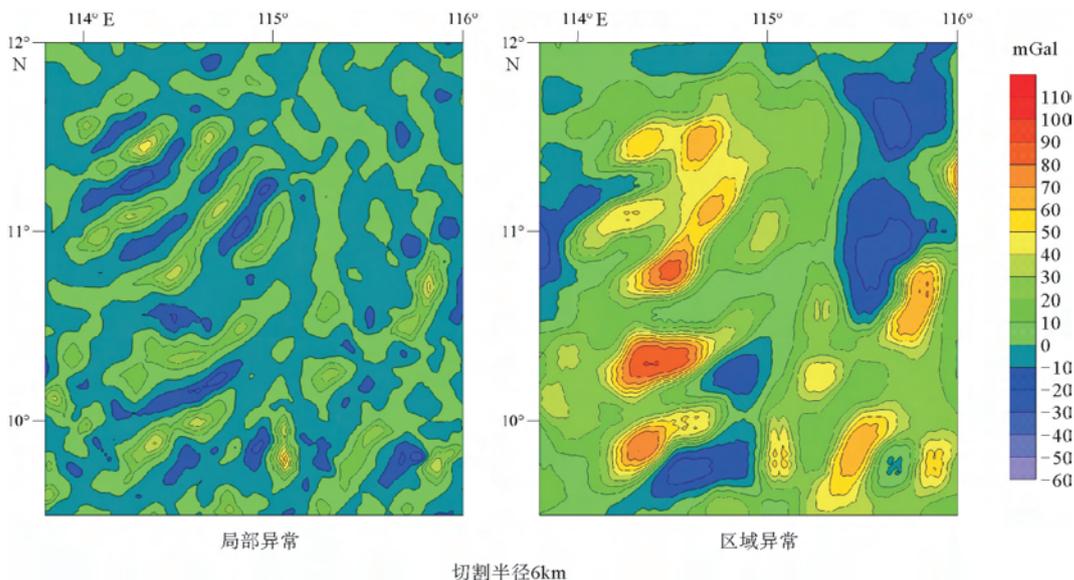
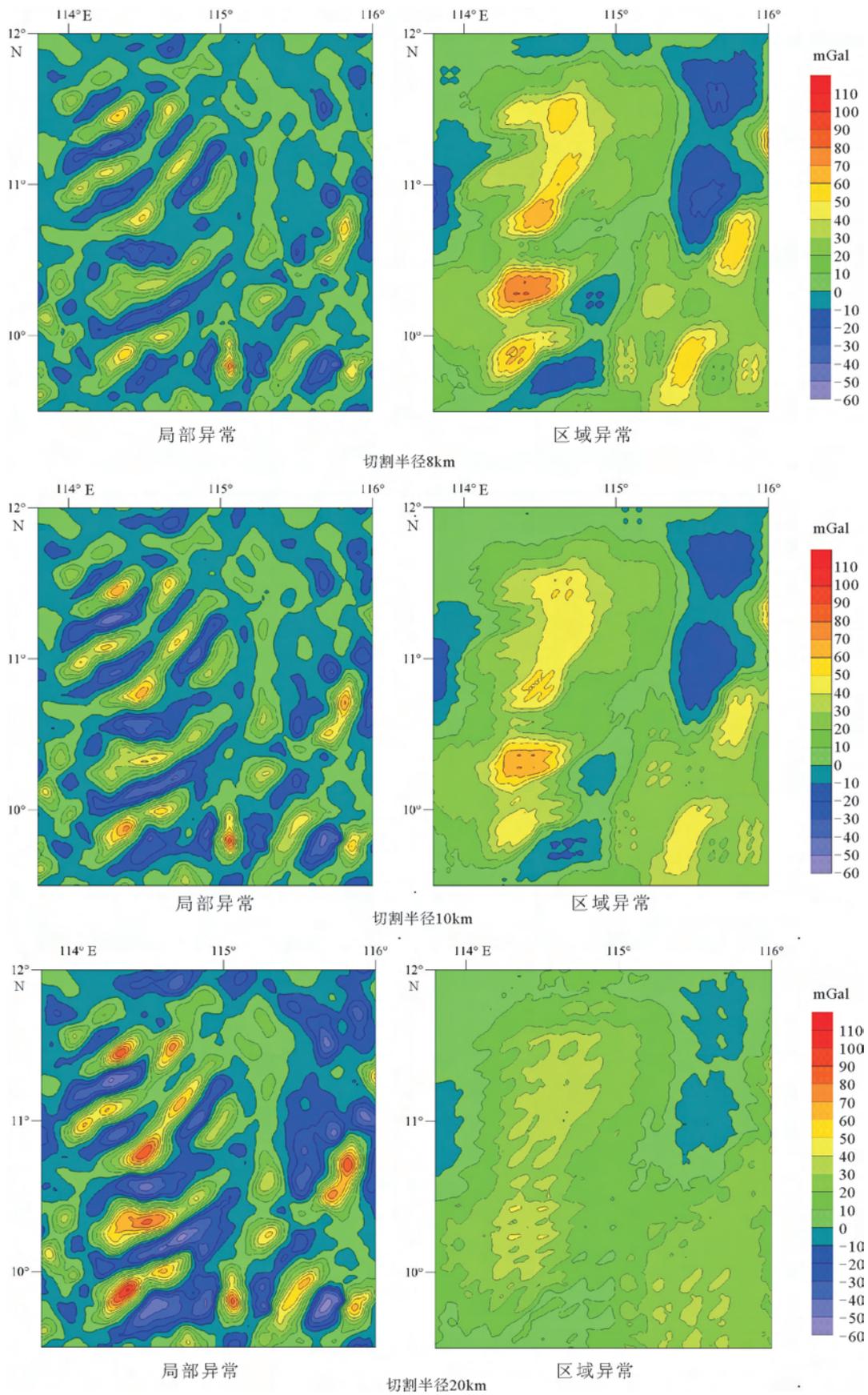


图4 重力局部异常及区域异常与地形的相关性折线图  
Fig.4 Correlation of local and regional gravity anomalies with terrain





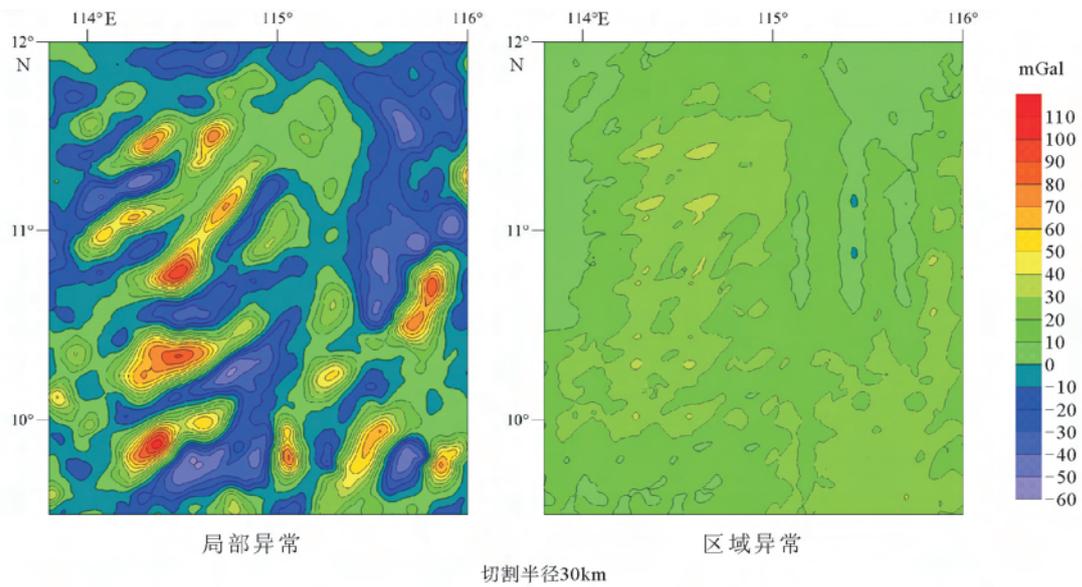


图5 不同切割半径下南沙群岛重力局部异常和区域异常图

Fig.5 Local and regional anomalies of the Nansha Islands in different cutting radius

结合之前的分析,以 10km 作为切割半径对重力数据进行异常分离。图 6 为南海空间重力异常图,图 7 为以 10km 切割半径插值切割分离得到的

区域异常图,图 8 为对应的局部异常图。从插值切割结果中可以更清晰地看出南海重力异常的分布特征。

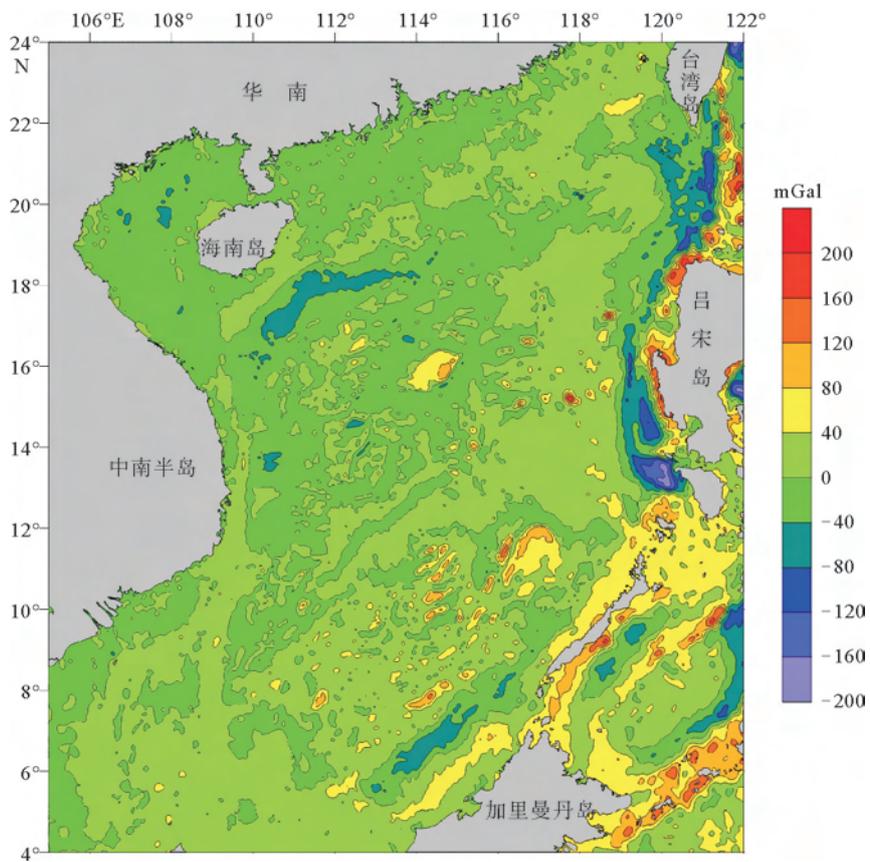


图6 南海空间重力异常图

Fig.6 Free-air gravity anomaly map of the South China Sea

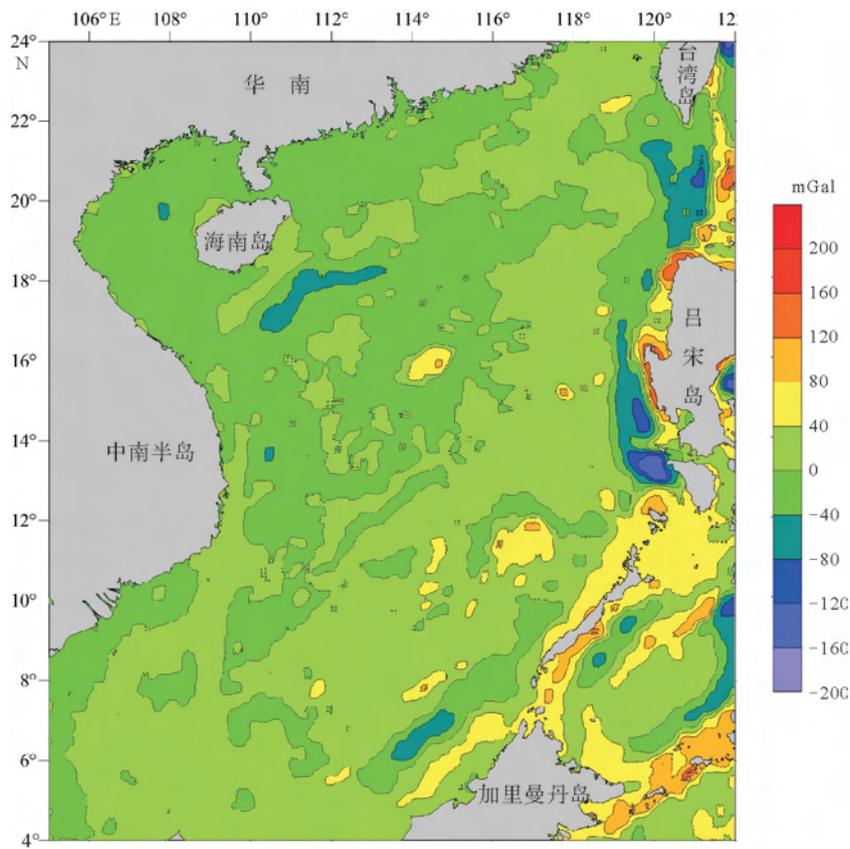


图 7 南海空间重力区域异常图(切割半径 10km)

Fig.7 Regional gravity anomaly map of the South China Sea (cutting radius of 10km)

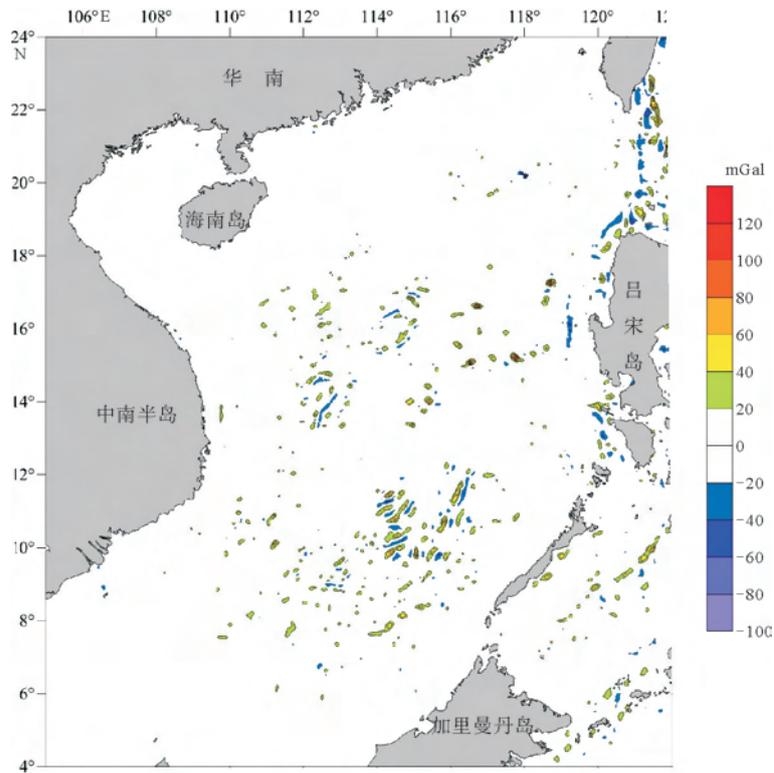


图 8 南海空间重力局部异常图(切割半径 10km)

Fig.8 Local gravity anomaly map of the South China Sea (cutting radius of 10km)

图7为区域异常场,去掉了浅层重力异常的影响,某些岛礁异常、岛弧-海沟异常等均不同程度被抹平,只留下规模巨大、分布宽缓的背景场,从而使该切割半径下的区域异常反映分布更广更深的地质体的特征。区域异常场与图6的空间重力异常分布基本一致。区域异常数值集中于 $-40\sim 40\text{mGal}$ ,总体显示为北低南高;南海北部的低异常带对应着盆地构造的凹陷区,如莺歌海盆地;台湾岛与吕宋岛之间的巴士海峡及吕宋岛西缘的重力梯度带反映了俯冲带的特征;中沙群岛、南沙群岛及南部的南沙海槽均有明显的展示。

图8的局部异常中,将分布广、变化缓的 $-20\sim 20\text{mGal}$ 的局部异常标示为白色,便于突出显示。图中,巴士海峡、中部西沙群岛、中沙群岛及黄岩岛等海域的局部异常特征明显,南沙海域 $10^\circ$ 至 $12^\circ$ 之间正负相间的异常特征得到了突出显示。

#### 4 结语

插值切割法是一种非常实用的异常分离方法,在分离重力异常的应用中可以取得较好的效果。该方法中,确定最佳的切割半径是一个重要的步骤。本文通过计算重力局部异常、区域异常与原始数据及地形数据的相关性系数,发现重力异常与地形有极显著的相关性,从相关性结果可以初步确定理想的切割半径;并对比不同切割半径下的分离效果,可以很好地确定最佳切割半径。以 $10\text{km}$ 最佳半径应用于整个南海重力场的切割分离,取得很好的分离效果。

重力异常的插值切割处理只是单纯的分离,要获取更深的认识,还应结合已知的地质资料和其他的地球物理资料来进行解释。

#### 参考文献 (References)

- [1] 刘彦,严加永,吴明安,等.基于重力异常分离方法寻找深部隐伏铁矿——以安徽泥河铁矿为例[J].地球物理学报,2012,55(12):4181-4193.[LIU Yan, YAN Jiayong, WU Ming'an, et al. Exploring deep concealed ore bodies based on gravity anomaly separation methods: A case study of the Nihe iron deposit[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(12): 4181-4193.]
- [2] 邢怡,滕菲,张国利.利用插值切割法研究重力区域场与局部场的分离[J].地质调查与研究,2014,37(3):193-196.[XING Yi, TENG Fei, ZHANG Guoli. An interpolating cut method for separation of regional and local gravity field[J]. Geological Survey and Research, 2014, 37(3): 193-196.]
- [3] 胡德昭,朱慧娟.地球物理学原理及应用[M].南京:南京大学出版社,1995.[HU Dezhao, ZHU Huijuan. Geophysical Principles and Applications[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1995.]
- [4] 管志宁,张昌达,申宁华.磁法勘探重要问题理论分析与应用[M].北京:地质出版社,1993.[GUAN Zhining, ZHANG Changda, SHEN Ninghua. Theoretical Analysis and Application of Important Problems in Magnetic Prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.]
- [5] 余运洋,黄国祥.卡尔曼滤波在重磁异常划分中的应用[J].物探化探计算技术,1991,13(3):220-228.[YU Yunyang, HUANG Guoxiang. Application of Kalman filtering theory to regional-residual separation of gravity or magnetic anomalies[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1991, 13(3): 220-228.]
- [6] 韩兆红,吴燕冈,张成海,等.自相关滤波法提取重磁场中弱异常[J].世界地质,2010,29(1):124-129.[HAN Zhaohong, WU Yangang, ZHANG Chenghai, et al. Extracting weak anomaly in gravity and magnetic field with self-correlation filtering method[J]. Global Geology, 2010, 29(1): 124-129.]
- [7] Agarwal B N P, Sivaji C. Separation of regional and residual anomalies by least-squares orthogonal polynomial and relaxation techniques: a performance evaluation[J]. Geophysics, 1992, 40(2): 143-156.
- [8] Fedi M, Quarta T. Wavelet analysis for the regional-residual and local separation of potential field anomalies[J]. Geophysical Prospecting, 1998, 46(5): 507-525.
- [9] 李宗杰,杨林,王勤聪.小波变换在位场数据处理中的应用[J].石油物探,1997,36(2):86-93.[LI Zhongjie, YANG Lin, WANG Qincong. Application of the wavelet transform in potential field data processing[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1997, 36(2): 86-93.]
- [10] 耿喜哲,刘天佑,丁艳红,等.小波神经网络在重磁资料反演中的应用前景[J].物探与化探,2001,25(2):102-108,116.[GENG Xizhe, LIU Tianyou, DING Yanhong, et al. The prospect of applying wavelet neural network to the inversion of gravitational and magnetic data[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2001, 25(2): 102-108, 116.]
- [11] 王霞,吴新林,李克鲁.航磁数据多重分形研究及应用[J].铀矿地质,1999,15(6):356-360.[WANG Xia, WU Xinlin, LI Kelu. Fractal study of aeromagnetic data and its application[J]. Uranium Geology, 1999, 15(6): 356-360.]
- [12] 程方道,刘东甲,姚汝信.划分重力区域场与局部场的研究[J].物探化探计算技术,1987,9(1):1-9.[CHENG Fangdao, LIU Dongjia, YAO Ruxin. A study on the identification of regional and local gravity fields[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1987, 9(1): 1-9.]
- [13] 文百红.插值切割法在消除磁异常干扰中的应用[J].地质与勘探,1991,27(2):40-45.[WEN Baihong. Application of the interpolation cut method to disturbance elimination for magnetic anomalies[J]. Geology and Prospecting, 1991, 27(2): 40-45.]

- [14] 段本春,徐世浙.磁(重力)异常局部场与区域场分离处理中的扩边方法研究[J].物探化探计算技术,1997,19(4):298-304.[DUAN Benchun, XU Shizhe. A study of the scheme of extending edge in the processing of separating local field from regional field for magnetic/gravity anomaly[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 19(4): 298-304.]
- [15] 汪炳柱,徐世浙,刘保华,等.多次插值切割法分场的一个实例[J].石油地质物理勘探,1997,32(3):431-438.[WANG Bingzhu, XU Shizhe, LIU Baohua, et al. An example of aeromagnetic anomaly separation using multi-interpolation division[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32(3): 431-438.]
- [16] 段本春,徐世浙,阎汉杰,等.划分磁异常场的插值切割法在研究火成岩体分布中的应用[J].石油地质物理勘探,1998,33(1):125-131.[DUAN Benchun, XU Shizhe, YAN Hanjie, et al. Application of interpolation-cut method for magnetic anomaly division to igneous mass investigation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1998, 33(1): 125-131.]
- [17] 张虹.重磁资料异常分离与构造边界识别方法的应用分析[J].中小企业管理与科技,2016(2):241.[ZHANG Hong. Application analysis of anomaly separation of gravity and magnetic data and identification of tectonic boundaries[J]. Management & Technology of SME, 2016(2): 241.]
- [18] 陈洁,朱本铎,温宁,等.南海海岛海山的重磁响应特征[J].地球物理学报,2012,55(9):3152-3162.[CHEN Jie, ZHU Benduo, WEN Ning, et al. Gravity-magnetic response of the islands and seamounts of South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 3152-3162.]
- [19] 陈洁,温宁,万荣胜,等.重要的海洋测绘成果——南海重磁异常图[J].海洋测绘,2010,30(6):33-36.[CHEN Jie, WEN Ning, WAN Rongsheng, et al. Important marine charting results: the gravity and magnetic anomaly maps of South China Sea[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(6): 33-36.]
- [20] 陈洁,温宁.南海地球物理图集[M].北京:科学出版社,2010.[CHEN Jie, WEN Ning. Atlas of Geophysics of the South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2010.]
- [21] 杨胜雄,邱燕,朱本铎.南海地质地球物理图系(1:200万)[M].天津:中国航海图书出版社,2015.[YANG Shengxiong, QIU Yan, ZHU Benduo. Atlas of Geology and Geophysics of the South China Sea (1:2000000)[M]. Tianjin: China Navigation Publications, 2015.]
- [22] Sandwell D, Smith W H F. Global marine gravity from re-tracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2009, 114(B1): B01411.
- [23] 万剑华,李家军,刘善伟,等.基于 Cryosat-2 数据的南海  $2' \times 2'$  重力异常计算与分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(3):70-75.[WAN Jianhua, LI Jiajun, LIU Shanwei, et al. Calculation and analysis of  $2' \times 2'$  gravity anomalies over the South China Sea based on Cryosat-2 satellite altimeter data[J]. Journal of China University of Petroleum, 2015, 39(3): 70-75.]
- [24] 李淑玲,孟小红,郭良辉,等.南海重力异常特征及其显著的构造意义[J].现代地质,2012,26(6):1154-1161.[LI Shuling, MENG Xiaohong, GUO Lianghui, et al. Characteristics of gravity anomalies in the South China Sea and their tectonic implications[J]. Geoscience, 2012, 26(6): 1154-1161.]
- [25] 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. Interpretation on the tectonics and characteristics of altimeter-derived gravity anomalies in China South Sea[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(4): 343-347.]
- [26] 姚运生,姜卫平,晁定波.南海海盆重力异常场特征及构造演化[J].大地构造与成矿学,2001,25(1):46-54.[YAO Yunsheng, JIANG Weiping, CHAO Dingbo. Study of the gravity anomaly and construction evolution in the South China Sea Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2001, 25(1): 46-54.]
- [27] 丁巍伟,陈汉林,杨树锋,等.南海西南次海盆与东部次海盆地质与地球物理分析[J].高校地质学报,2002,8(3):268-279.[DING Weiwei, CHEN Hanlin, YANG Shufeng, et al. Geological and geophysical analysis of the southwestern and eastern Sub-Basins, South China Sea[J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(3): 268-279.]
- [28] 王懋基,宋正范,尹春霞.南海卫星重力研究[J].物探与化探,1998,22(5):329-335,328.[WANG Maoji, SONG Zhengfan, YIN Chunxia. Satellite gravity study on South China sea [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1998, 22(5): 329-335, 328.]
- [29] 武粤,孟小红,刘国峰.南海北部边缘重力异常的多尺度分析及其构造讨论[J].现代地质,2012,26(6):1162-1167.[WU Yue, MENG Xiaohong, LIU Guofeng. Multi-scale analysis of gravity anomaly and discussion of deep structure in the north margin of South China Sea[J]. Geoscience, 2012, 26(6): 1162-1167.]
- [30] 张菲菲,王万银,杨金玉,等.根据重力数据研究南海北部陆缘断裂带的延伸问题[J].地球物理学进展,2014,29(5):2113-2119.[ZHANG Feifei, WANG Wanyin, YANG Jinyu, et al. Research on the extension of faults zones in northern margin of the South China Sea based on the gravity data[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2113-2119.]