



引文格式:侯静,方剑,何慧优.采用波数域成像方法研究中国南海及邻区岩石圈三维密度扰动[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(11):2091-2100.DOI:10.13203/j.whugis20240369

**Citation:** HOU Jing, FANG Jian, HE Huiyou. 3D Density Disturbance of the South China Sea and Adjacent Areas Based on Wavenumber Domain Imaging Method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(11):2091-2100.DOI: 10.13203/j.whugis20240369

# 采用波数域成像方法研究中国南海及邻区 岩石圈三维密度扰动

侯 静<sup>1,2</sup> 方 剑<sup>1</sup> 何慧优<sup>3</sup>

1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院,湖北 武汉,430077

2 中国科学院大学,北京,100049

3 黄冈师范学院数学与统计学院,湖北 黄冈,438000

**摘要:**中国南海位于欧亚板块、太平洋板块和印度洋板块交汇处,经历了大陆破裂和海底扩张等复杂的构造活动。研究中国南海及邻区大尺度的岩石圈三维密度结构对于认识该地区深部构造特征、板块演化和动力学机制等具有十分重要的意义。目前对该地区密度结构的研究多采用地震波剖面资料,大尺度区域性研究较少。重力数据的大尺度和高分辨率特点在研究大尺度三维密度扰动方面具有很大优势。因此,利用高精度的重力场模型数据,采用波数域三维密度成像方法反演了中国南海及邻区大尺度高分辨率的三维密度扰动。研究结果表明,岩石圈密度扰动分布结果呈现出不同深度的密度波动和异常分布。中央海盆下方存在相对邻区较低密度的地幔,该地幔与洋盆的高热流背景有关。中沙群岛、南沙海槽区域存在高密度异常,猜测这些地区高密度扰动可能是由于地幔热物质上涌导致高密度的地幔物质侵入到相对较低密度的下地壳中造成的。马尼拉海沟在地幔处显示出明显低密度,这是由于板块俯冲作用造成的,使密度较低的洋壳下沉到高密度地幔中。

**关键词:**中国南海;重力异常;波数域三维密度成像;密度扰动

**中图分类号:**P223

**文献标识码:**A

**收稿日期:**2024-09-27

**DOI:**10.13203/j.whugis20240369

**文章编号:**1671-8860(2024)11-2091-10

## 3D Density Disturbance of the South China Sea and Adjacent Areas Based on Wavenumber Domain Imaging Method

HOU Jing<sup>1,2</sup> FANG Jian<sup>1</sup> HE Huiyou<sup>3</sup>

1 Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Mathematics and Statistics, Huanggang Normal University, Huanggang 438000, China

**Abstract:** Objectives: Located at the intersection of the Eurasian Plate, the Pacific Plate and the Indian Plate, the South China Sea has experienced complex tectonic activities such as continental rupture and sea-floor spreading. It is very important to determine the three-dimensional density structure of the lithosphere in the South China Sea and its adjacent areas for understanding the deep tectonic characteristics, plate evolution and dynamic mechanism of the region. At present, the study of density structure in this area mostly uses seismic wave profile data, and there are few regional studies. Therefore, it is very important to obtain the regional 3D density structure by using the characteristics of large scale and high resolution of gravity data. Methods: Based on high-precision gravitational field model data, potential field separation of Bouguer gravity anomalies is carried out, and the remaining Bouguer gravity anomalies are retrieved by wave-number domain 3D density imaging method. Results: We have obtained large-scale high-resolution three-dimensional

基金项目:国家自然科学基金(42474121, 4219253)。

第一作者:侯静,博士生,主要从事重磁异常和岩石圈结构方面的研究。houjing@apm.ac.cn

通讯作者:方剑,研究员。jfang@whigg.ac.cn

density structures of the lithosphere in the South China Sea and adjacent areas, showing density distribution characteristics at depths of 5–90 km. **Conclusions:** The results show that the density distribution of the lithosphere presents density fluctuations and abnormal distribution at different depths. Beneath the central basin, there is relatively low-density mantle compared to the adjacent areas, which is associated with the high heat flow background of the ocean basin. In the areas of the Zhongsha Islands, Nansha Trough, high-density anomalies are observed. These high-density perturbations are speculated to result from mantle material upwelling, causing high-density mantle material to intrude into the relatively low-density lower crust. In the Manila Trench, a pronounced low-density anomaly is observed within the mantle, attributed to subduction processes where the low-density oceanic crust is subducted into the high-density mantle.

**Key words:** the South China Sea; gravity anomaly; wavenumber domain 3D density imaging; density disturbance

中国南海是西太平洋边缘海盆中具有成熟洋壳的边缘海<sup>[1]</sup>,经历了大陆破裂和海底扩张等复杂的构造活动。南海位于欧亚板块、太平洋板块和印度洋板块交汇处。它的构造演化活动受特提斯和古太平洋构造域相互作用的共同影响,导致深部结构十分复杂,并具有强烈的非均一性<sup>[2]</sup>。南海岩石圈结构包含了大陆边缘的共轭张裂信息以及海盆张开的信号,同时与青藏高原的隆起也息息相关<sup>[3]</sup>。因此,南海岩石圈结构受到国内外学者高度重视,对其进行研究可以帮助分析南海构造变形和岩浆活动,对于探讨中国南海及邻区的构造分布、板块演化和动力学过程等科学问题具有重要意义。

为揭示中国南海及邻区深部岩石圈结构,许多学者对该地区进行了多次钻探并开展了大量地球物理调查和研究<sup>[4-7]</sup>,在南海地区获取了大量高质量的地震测线资料,得到了二维的岩石圈结构剖面<sup>[8-11]</sup>。尽管在部分区域有学者开展了地震波三维探测,得到了小尺度的三维速度结构<sup>[12-13]</sup>。但由于深海地区探测困难、成本高、地震台站稀疏等原因,很难进行大尺度的岩石圈结构的研究,因此对于中国南海及邻区大尺度岩石圈密度结构的研究较少。随着重力场模型的发展,重力数据高分辨率,可覆盖全球。因此重力数据是了解海洋岩石圈密度结构的重要资料。

为了获得海洋岩石圈内部的密度分布,使用基于重力数据的三维(three dimensional, 3D)密度结构反演<sup>[14]</sup>。通过检查岩石圈引起的重力场变化可以确定密度波动,从而了解海洋岩石圈的内部结构和演化历史。文献[15]利用重力异常和梯度数据进行三维密度反演,得到的异常地质体的反演结果具有较好的分辨率。文献[16]利用泛函表示法的波数域重力迭代反演方法,获得了地壳深部密度分布以及结构。文献[17]采用快

速位场成像的波数域迭代方法,同时引入深度因子,获得分辨率和精度较高的密度模型。传统的反演方法在分辨率或反演效率方面有明显的局限性,而波数域三维密度成像方法将重力模型正演计算转移到波数域,通过简单的乘法和除法简化运算,避免了空间域反演方法中复杂的卷积和反卷积计算<sup>[18]</sup>,大大提高了成像速度。此外,波数域方法可以更好地处理高频数据,提高成像分辨率。它可以通过深度限制和连续迭代来生成高分辨率和高精度的密度模型<sup>[19]</sup>。因此,波数域三维密度成像方法在研究海洋岩石圈密度结构方面具有显著的优势。

本文利用波数域三维密度成像方法,采用高精度卫星重力数据反演不同深度的密度扰动,得到大尺度高分辨率的南海三维密度扰动,为科学的研究中国南海的地质演化和构造特征提供可能的线索。

## 1 中国南海及邻区地质构造背景

中国南海是西太平洋面积最大、水深最深的边缘海。它北部与中国大陆相邻,南部是巴拉望群岛,西部与中南半岛相邻,东部为菲律宾群岛,地形图如图1所示。图1中, TXB 表示台西盆地, TXNB 表示台西南盆地, PRMB 表示珠江口盆地, QDNB 表示琼东南盆地, YGHB 表示莺歌海盆地, BBGB 表示北部湾盆地, ZJB 表示中建南盆地, XSNB 表示西沙南盆地, WAB 表示万安盆地, NWB 表示南薇盆地, ZMB 表示曾母盆地, BKB 表示北康盆地, BSB 表示文莱-沙巴盆地, RBB 表示礼乐盆地, NWBB 表示西北巴拉望盆地。南海海盆整体呈现为北东-南西向延伸的菱形,其周围被地壳深大断裂和岩石圈断裂所包围。中国南海及邻区是由多个小地块在不同的地质时期经

过多次碰撞缝合形成的,其地壳结构横向变化显著。南海介于大陆型地壳构造域和大洋型构造域之间。边缘被性质和特征不一的构造单元所环绕,南海北部边缘的陆架呈现阶梯状正断层分布,发育有一系列的地堑和地垒,是离散性质的边缘构造;南部为汇聚性质的边缘构造;东部边缘是挤压性质的边缘构造;西部边缘存在阶梯状正断层,呈现剪切-拉张性质的边缘构造特征<sup>[20]</sup>。

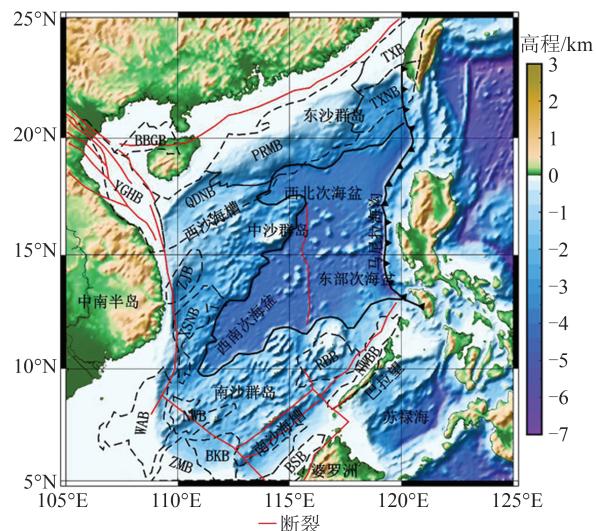


图 1 中国南海及邻区地形图<sup>[26]</sup>

Fig. 1 Topographic of the South China Sea and Adjacent Areas<sup>[26]</sup>

南海海盆一共包括 3 个部分:中间面积最大的是中央海盆,其次是位于中央海盆西南的西南次海盆,还有位于中海海盆西北的西北次海盆。在南海深海同样存在着海山和海丘分布。黄岩岛海山链在地形图上最为明显,沿着黄岩岛海山为主体沿东西向分布。中国南海及邻区受板块运动作用发育许多北东向和东西向断裂,深大断裂地区地震活动频繁,地震强度较大。南海的北东向锯齿断裂是大规模地壳和岩石圈的断裂,它与近南北向的断裂共同控制南海海盆的形状。近东西向的锯齿状张裂主要分布在南海北部的陆架,以基底断裂为主,地壳断裂为辅<sup>[21-23]</sup>。这些位置由于介质的不均匀性,应力容易在此集中和释放<sup>[24]</sup>。

南海在历史上曾经历多次海底扩张和剧烈岩浆活动,岩浆活动主要发生在晚燕山期和喜马拉雅期。喜马拉雅期的岩浆活动表现为大规模的基性和超基性岩浆的侵入与喷发,而晚燕山期的岩浆活动在陆缘外侧以基性、超基性岩浆为主,陆缘内侧的华南块体则以中、酸性岩浆的侵入和喷发为主<sup>[21,25]</sup>。南海及邻区的复杂的构造分

布和演化历史均对岩石圈影响剧烈,使岩石圈密度扰度存在差异。

## 2 中国南海及邻区剩余重力异常

本文利用波数域三维密度成像办法研究岩石圈的密度扰动。重力异常是地球内部密度分布不均匀的整体反应,本文的研究目标是南海地区岩石圈密度扰动特征,需将该地区重力异常进行分离,提取出由岩石圈密度不均匀引起的重力异常。选择从布格重力异常中去除沉积层、莫霍面以及重力场低阶项,以获得岩石圈密度不均匀引起的重力异常。

收集了中国南海及邻区高精度的地形和重力异常数据,并进行位场分离,得到由岩石圈产生的重力异常,进而反演密度扰动分布。地形数据来自 ETOP01 模型(图 1)。分析中使用的自由空气重力数据来自高分辨率地球重力异常模型 WGM2012,其空间分辨率为  $1' \times 1'$ <sup>[27]</sup>(图 2(a))。为与后续去除的低阶重力场数据相对应,布格重力异常选取高阶重力场模型 SGG-UGM-2 模型<sup>[28]</sup>,该模型是高分辨率地球重力场模型,最高可达 2 190 阶和 2 159 次。记录的重力统计数据有效地捕捉到了地球密度的波动。

自由空气重力异常包含海水、沉积层以及莫霍面等多个部分,是地下密度的综合反映。而布格重力异常消除了海底地形的影响,反映了岩石圈深部的密度变化。由图 2 可以看到,自由空气重力异常包含了很多浅部信息,受海水沉积层影响较大。布格重力异常值变化较大,分布在 -40 至 450 mGal 之间。低布格重力异常主要集中在大陆和几个岛屿。布格重力异常从陆地到海洋有明显的增加,南海中央海盆区域整体布格重力异常较大,与海盆边缘构造断裂对应较好,更好地反映了深部物质分布的不均匀性<sup>[29]</sup>。布格重力异常中最主要的信息是莫霍面深度和沉积层深度变化的信息,研究岩石圈密度不均匀首先要从布格重力异常中扣除各界面起伏的重力影响。因此,选择用剩余重力异常计算中国南海及邻区的三维密度扰动。

本文采用波数域界面正演方法计算沉积层和莫霍面的重力异常响应,计算公式为:

$$F(g_z) = -2\pi f e^{-|k|z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|k|^{n-1}}{n!} F[\sigma(\xi, \eta) h^n(\xi, \eta)] \quad (1)$$

式中,  $F(g_z)$  代表界面起伏产生重力异常的傅里

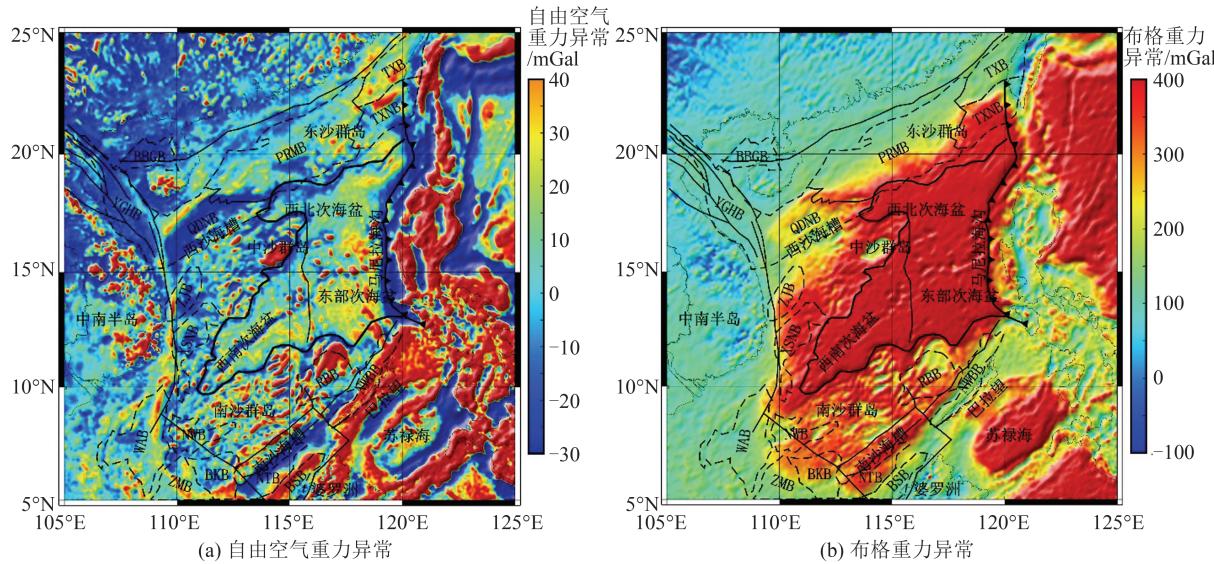


图2 中国南海及邻区重力异常图

Fig. 2 Gravity Anomalies in the South China Sea and Adjacent Areas

叶变换;  $(\xi, \eta)$  为场源坐标;  $\sigma$  为密度差;  $k$  为波数,  $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ,  $k_x$  和  $k_y$  分别为沿  $x$  轴和  $y$  轴的波数;  $f$  代表万有引力常数;  $z_0$  和  $h$  分别为界面的上、下界面。

首先,若莫霍面位置是由重力异常反演得到,再用于岩石圈密度结构的反演过程中,则莫霍面的位置和密度结构之间会形成相互依赖关系。这种依赖会使反演模型的内在关系更加复杂,导致较难解耦并产生连锁的误差传播。使用其他资料得到的模型数据可以将边界位置从密度结构中解耦,避免相互依赖性,使密度结构的反演更加纯粹。因此,本文的莫霍面数据采用CRUST1.0模型资料,而不是重力异常反演结果。沉积层数据也来自CRUST1.0,这是最新的全球地壳模型,精度为 $1^\circ \times 1^\circ$ <sup>[30-31]</sup>。提取中国南海及邻区的沉积层和莫霍面数据,密度差分别取常数 $-0.2 \text{ g/cm}^3$ 和 $-0.45 \text{ g/cm}^3$ <sup>[32-33]</sup>,应用波数域界面正演方法,计算沉积层和莫霍面的重力响应(图3)。根据文献[34]的研究,重力场低阶项下地幔、上地幔重力位球谐函数阶数分别为2~6阶、7~36阶。本文选用的重力场模型为SGG-UGM-2<sup>[28]</sup>,其重力场模型2~36阶球谐函数对应的长波长部分的重力如图3所示。在研究过程中,由于地壳模型CRUST1.0的分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ,而地球重力异常模型的空间分辨率为 $1' \times 1'$ 。为了在计算中保持数据的一致性和提高精度,对CRUST1.0的数据进行了插值处理,将其分辨率提升至 $1' \times 1'$ ,使地壳模型的空间分辨率与重力

异常模型达成一致。这一处理方式确保了沉积层数据和重力异常数据在精度上的统一性,从而为后续的反演计算提供了高分辨率的输入数据。对重力异常进行位场分离,计算公式为:

$$g_{\text{residual}} = g_{\text{obs}} - g_{\text{Sedi}} - g_{\text{Moho}} - g_{\text{GE}} \quad (2)$$

式中,  $g_{\text{residual}}$  为剩余重力异常;  $g_{\text{obs}}$  为布格重力异常;  $g_{\text{Sedi}}$  为沉积层重力异常;  $g_{\text{Moho}}$  为莫霍面重力异常;  $g_{\text{GE}}$  为低阶项重力异常。由此得到主要由岩石圈密度波动引起的重力异常,计算密度扰动。

通过计算得到了沉积层、莫霍面、低阶项的重力异常,最后得到了剩余布格重力异常分布如图4所示。通过分析剩余重力异常,可以对中国南海及邻区的岩石圈密度结构和构造断裂进行分析。西南次海盆与东部次海盆异常值较高,西北次海盆地的布格重力异常相对较低,造成这个差异的原因可能是不同时期盆地的扩张。研究区南部大陆边缘盆地数值较北部大陆边缘盆地有明显的增大,表明南、北部大陆边缘盆地内部构造差异较大。推测造成这种现象的原因主要有两个:一是地幔物质的抬升<sup>[35-36]</sup>,二是南北大陆边缘盆地构造演化的不同步<sup>[37]</sup>。马尼拉海沟重力异常显著增高,可能是板块俯冲边界发生剧烈的构造运动造成的。

### 3 中国南海及邻区三维密度特征

波数域三维密度成像法是一种基于波数域重力异常计算地下密度分布的直接方法<sup>[38-40]</sup>。波数域密度成像公式可以表示为:

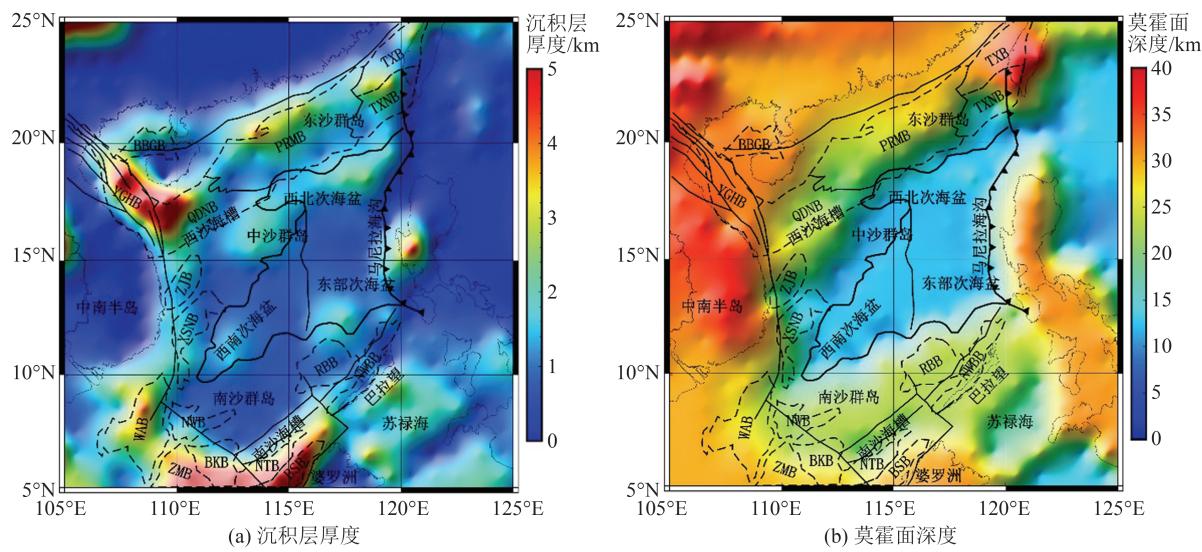


图3 中国南海及邻区界面深度分布图

Fig. 3 Depth Distribution in the South China Sea and Adjacent Areas

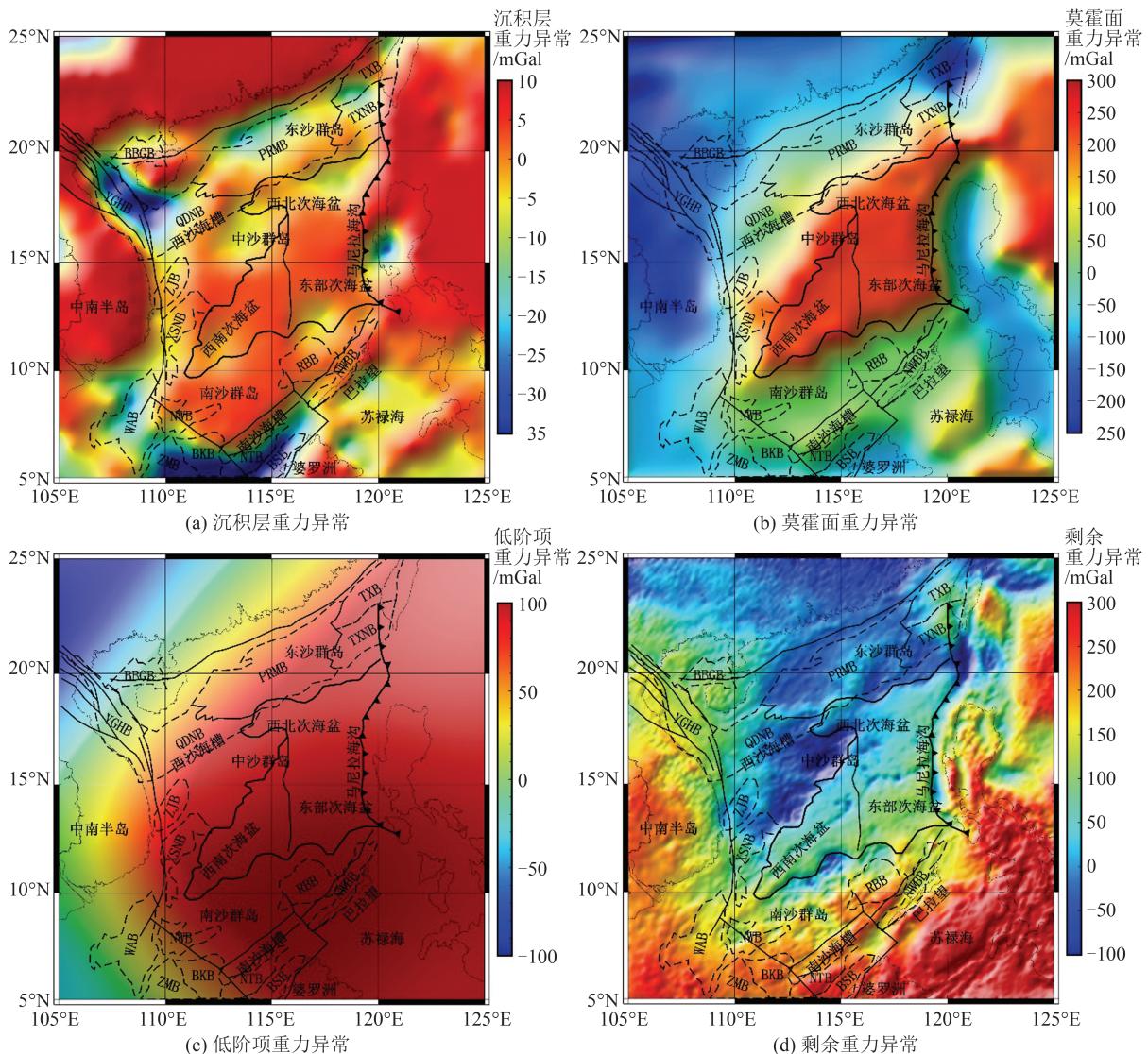


图4 中国南海及邻区不同界面重力异常以及剩余重力异常图

Fig. 4 Gravity Anomalies at Different Interfaces and Residual Gravity Anomalies in the South China Sea and Adjacent Areas

$$\rho(x, y, z) = F^{-1} \left[ \frac{1}{2\pi f} \frac{(n+1)^{n+1}}{n!} z^n k^{n+1} e^{-nkz} G(k_x, k_y, 0) \right] \quad (3)$$

式中,  $\rho(x, y, z)$  为给定点的质量体密度;  $F^{-1}$  为傅里叶逆变换;  $G(k_x, k_y, 0)$  表示重力异常谱的谱; 常数  $n$  ( $1 < n < 10$ ) 表示滤波器的分辨率, 值越大表示分辨率越高;  $z$  为反演深度;  $k$  为波数。为提高纵向分辨率, 本文加入深度加权函数  $W(z)$ <sup>[41]</sup>:

$$W(z) = \frac{\alpha + e^{\frac{d_1(z - z_{c1})}{dz}}}{1 + e^{\frac{d_1(z - z_{c1})}{dz}}} - \frac{\alpha + e^{\frac{d_2(z - z_{c2})}{dz}}}{1 + e^{\frac{d_2(z - z_{c2})}{dz}}} \quad (4)$$

式中,  $z$  为研究点深度;  $dz$  为反演区域;  $\alpha$  为确定近地表权重的经验值,  $\alpha = 0.001$ <sup>[41]</sup>;  $z_{c1}$ 、 $z_{c2}$  分别为模型顶底面深度;  $d_1$  为上界面约束因子;  $d_2$  为下界面约束因子。带深度权重函数的迭代反演方程为:

$$\rho_{i+1} = \rho_i + W(z) \times \Delta\rho_i \quad (5)$$

式中,  $\rho_{i+1}$  是第  $i+1$  次迭代时的密度分布;  $\rho_i$  是第  $i$  次迭代时的密度分布;  $\Delta\rho_i$  是密度校正。将反演后的地下域划分为  $N$  个水平层, 每个水平层进一步细分为  $m \times n$  个正交棱柱体。对地质层内每个棱柱体进行迭代, 由此可以得到不同层的密度扰动的分布。

结合推断中国南海及邻区岩石圈厚度约为 80~100 km, 因此本文密度反演深度取 90 km。同时, 为保证计算精度和反演效率, 以及确保反演的收敛性并避免过拟合现象, 经过多次实验, 最终选择反演深度间隔为 1 km, 进行 40 次迭代。图 5 给出了中国南海及邻区岩石圈密度扰动结果。

由图 5 可知, 在 5 km 深度处, 可以看出密度差异较小, 仅部分显示在黄岩岛海山以及马尼拉海沟附近存在幅值约为 0.3 g/cm<sup>3</sup> 的密度异常变化(图 5(a))。10 km 对应南海海盆内部中地壳范围, 整体密度扰动更为平滑, 多为 0 值左右。可以十分明显地看到黄岩海山链处存在更为清晰的高密度异常以及两侧明显的低密度异常。在北缘和西缘的大陆地壳中, 10 km 仍主要对应上地壳深度, 可以看到存在许多较小尺度密度扰动; 而在海盆南缘和东缘海沟, 可以很明显地看出沿断裂带分布的正负相间的密度异常(图 5(b))。本文结果与地震波速度反映的特征一致<sup>[42]</sup>。30 km 埋深对应中央海盆的岩石圈内部与周缘地区的下地壳以及上地幔范围, 密度异常幅值有所增

加, 南海周缘的海槽和断裂更加清晰可见, 例如, 红河断裂、马尼拉海沟、南沙海槽等(图 5(c))。当位于 50 km 深度(岩石圈地幔中)时, 可以看到密度异常整体变小, 仅在中沙群岛、中建南盆地、南沙群岛以及台西南盆地南部存在较大的明显的正异常扰动, 与地壳内部密度扰动对比, 可以看到红河断裂和南沙海槽地区密度差异变小(图 5(d))。70 km 深度处可以明显看出南海海盆的构造边界均为密度扰动高值区域, 海盆内部呈现大面积密度扰动平滑区域, 对应该区域已为上地幔顶部地幔, 深部物质为熔融状态, 密度差异小(图 5(e))。文献[43]认为南海热流总体上由陆地向海洋增大。洋盆高热流背景可能是洋盆地幔密度相对周围区域较低的主要原因<sup>[44-45]</sup>。90 km 处能清晰看出海盆边缘构造分布, 中国南海及邻区均位于上地幔中, 只能看到大尺度密度差异主要位于中沙群岛和南沙海槽区域, 推断这些地区高密度扰动可能是由于该地区存在地幔物质上涌, 导致高密度的地幔物质侵入到相对较低密度的下地壳中造成的(图 5(f))。这与文献[46]等利用地震波得到的结论一致。马尼拉海沟在地幔处显示出明显低密度, 这是由于板块俯冲作用造成的, 使密度较低的洋壳下沉到高密度地幔中<sup>[34]</sup>。

纵向对比岩石圈三维密度扰动, 可以看出, 在中沙群岛南部区域存在从地幔软流层起始的大尺度高密度异常, 此区域对应西北太平洋的扩张脊, 高值密度扰动反映了该中止的扩张脊可能为熔融体的迁移提供了通道。这与该区域较高的地震波速异常得到的该区域存在后扩张岩浆活动的结论相一致<sup>[46]</sup>。

在礼乐滩附近, 可以看到在 5~50 km 深度其均显现出正密度扰动, 但在 70 km 和 90 km 深度处, 该区域变为负的密度, 这与该区域地震波速显现的结果一致, 可认为该地区存在一个由于晚期火山活动导致扩张中止的裂谷中心<sup>[46]</sup>。在珠江口盆地南缘洋陆转换带上存在一条沿断裂带延伸的高密度异常, 猜测可能是有随着深大断裂的发育, 洋陆转换带处加入了许多来自下地壳或地幔的岩浆导致的。

## 4 结语

本文利用波数域三维密度成像方法, 对中国南海及邻区岩石圈密度扰动进行了研究, 利用高精度全球卫星重力数据反演了中国南海及邻区

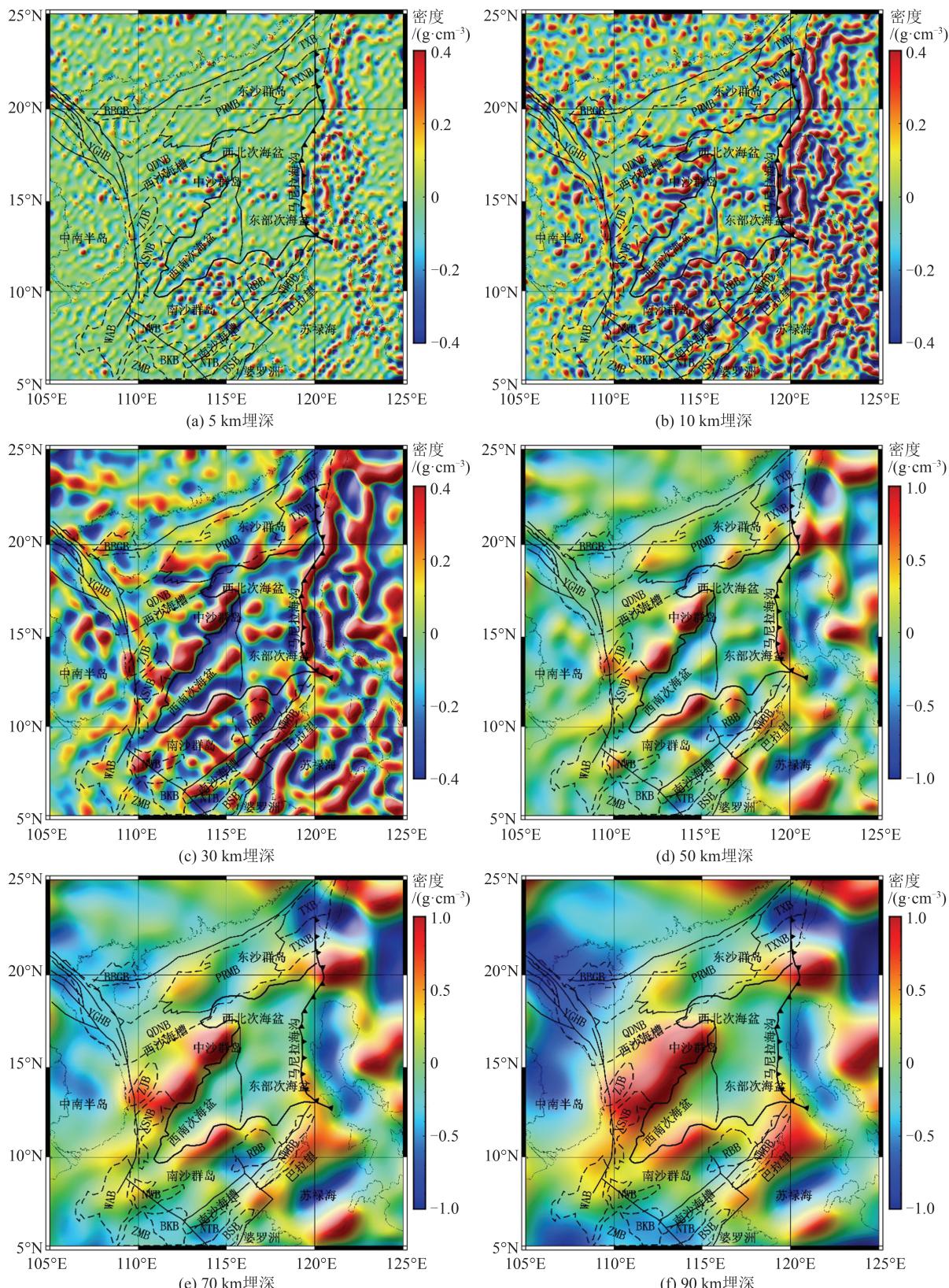


图5 中国南海及邻区不同深度密度分布图

Fig. 5 Density Distribution at Different Depths in the South China Sea and Adjacent Areas

大尺度的三维岩石圈密度分布。通过研究三维密度扰动特征,可以更好地了解该地区的构造分布,分析其演化特征和动力学过程,为地震灾害防治、资源勘探、海洋环境保护和海洋安全提供

## 重要参考。

岩石圈不同深度的大尺度密度分布结果呈现出不同的密度波动和异常分布,揭示了南海地区复杂多样的地质过程和岩石圈结构变化。

密度扰动随深度变得更加平滑。在南海海盆地壳内部可以看到黄岩海山链处存在清晰的高密度异常以及两侧的低密度异常。下地壳密度异常能显现出红河断裂、马尼拉海沟、南沙海槽等构造分布。在上地幔中,南海海盆内部密度扰动边缘构造相对较小。

在中国南海及邻区的上地幔中,存在大尺度密度差异。洋盆下方存在相对周边区域密度较低的地幔,该地幔与洋盆的高热流背景有关。中沙群岛、南沙海槽区域存在高密度异常,推断这些地区高密度扰动可能是由于该地区存在地幔物质上涌,导致高密度的地幔物质侵入到相对较低密度的下地壳中造成的。马尼拉海沟在地幔处显示出明显低密度,这是由于板块俯冲作用造成的,使密度较低的洋壳下沉到高密度地幔中。

总之,本文通过反演大尺度区域性岩石圈密度扰动,为更深入地认识中国南海及邻区地质和地球动力学过程提供了科学依据和数据支持。未来的研究将利用得到的三维密度,结合磁异常和热流资料等多源数据,更加系统全面地探索中国南海及邻区的构造分布以及动力学过程。

## 参考文献

- [1] Lu Binbin, Ge Yong, Qin Kun, et al. A Review on Geographically Weighted Regression[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(9): 1356–1366. (卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权回归分析技术综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1356–1366. )
- [2] Qi Xianghui. Research on Image Segmentation Algorithm Based on MRF and Fuzzy Clustering [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019. (亓祥惠. 基于MRF与模糊聚类的图像分割算法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019. )
- [3] Li Jiabiao, Ding Weiwei, Gao Jinyao, et al. Cenozoic Evolution Model of the Sea-Floor Spreading in South China Sea: New Constraints from High Resolution Geophysical Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3004–3015. (李家彪, 丁巍伟, 高金耀, 等. 南海新生代海底扩张的构造演化模式: 来自高分辨率地球物理数据的新认识[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3004–3015. )
- [4] Yan P, Zhou D, Liu Z S. A Crustal Structure Profile Across the Northern Continental Margin of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2001, 338(1): 1–21.
- [5] Lü Chuanchuan, Hao Tianyao, Qiu Xuelin, et al. A Study on the Deep Structure of the Northern Part of Southwest Sub-basin from Ocean Bottom Seismic Data, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3129–3138. (吕川川, 郝天珧, 丘学林, 等. 南海西南次海盆北缘海底地震仪测线深部地壳结构研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3129–3138. )
- [6] Qiu Xuelin, Zhao Minghui, Ao Wei, et al. OBS Survey and Crustal Structure of the Southwest Sub-basin and Nansha Block, South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3117–3128. (丘学林, 赵明辉, 敖威, 等. 南海西南次海盆与南沙地块的OBS探测和地壳结构[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3117–3128. )
- [7] Cameselle A L, Ranero C R, Franke D, et al. The Continent–Ocean Transition on the Northwestern South China Sea [J]. *Basin Research*, 2017, 29(S1): 73–95.
- [8] Pichot T, Delescluse M, Chamot-Rooke N, et al. Deep Crustal Structure of the Conjugate Margins of the SW South China Sea from Wide-Angle Refraction Seismic Data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 627–643.
- [9] Hou W A, Li C F, Wan X L, et al. Crustal S-wave Velocity Structure Across the Northeastern South China Sea Continental Margin: Implications for Lithology and Mantle Exhumation [J]. *Earth and Planetary Physics*, 2019, 3(4): 314–329.
- [10] Gao J W, Wu S G, McIntosh K, et al. The Continent–Ocean Transition at the Mid-northern Margin of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2015, 654: 1–19.
- [11] Wan K Y, Xia S H, Cao J H, et al. Deep Seismic Structure of the Northeastern South China Sea: Origin of a High-Velocity Layer in the Lower Crust [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(4): 2831–2858.
- [12] Fan C Y, Xia S H, Cao J H, et al. Lateral Crustal Variation and Post-Rift Magmatism in the Northeastern South China Sea Determined by Wide-Angle Seismic Data [J]. *Marine Geology*, 2019, 410: 70–87.
- [13] Zhao Minghui, Du Feng, Wang Qiang, et al. Current Status and Challenges for Three-Dimensional Deep Seismic Survey in the South China Sea [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3749–3761. (赵明辉, 杜峰, 王强, 等. 南海海底地震仪三维深地震探测的进展及挑战[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3749–3761. )
- [14] Ji F, Li F, Gao J Y, et al. 3-D Density Structure of the Ross Sea Basins, West Antarctica from Con-

- strained Gravity Inversion and Their Tectonic Implications [J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 215(2): 1241–1256.
- [15] Guo Lianghui, Meng Xiaohong, Shi Lei, et al. 3D Correlation Imaging for Gravity and Gravity Gradiometry Data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(4): 1098–1106. (郭良辉, 孟小红, 石磊, 等. 重力和重力梯度数据三维相关成像[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1098–1106. )
- [16] Kobrunov A I. The Method of Functional Representations in the Solution of Inverse Problems of Gravimetry [J]. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2015, 51(4): 459–468.
- [17] Cui Y T, Guo L H. A Wavenumber-Domain Iterative Approach for 3D Imaging of Magnetic Anomalies and Gradients with Depth Constraints [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2019, 16(6): 1032–1047.
- [18] Cui Y T, Guo L H. A Wavenumber-Domain Iterative Approach for Rapid 3-D Imaging of Gravity Anomalies and Gradients [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 34179–34188.
- [19] He H Y, Sun H P, Fang J, et al. Crustal Density Structure Investigation of the East China Sea and Adjacent Regions Using Wavenumber Domain 3D Density Imaging Method [J]. *Earth, Planets and Space*, 2024, 76(1): 16.
- [20] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated Interpretation of Magnetic Anomalies and Seafloor Spreading Stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary Tectonics of Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98(B4): 6299–6328.
- [21] Hayes D E, Lewis S D. A Geophysical Study of the Manila Trench, Luzon, Philippines: 1. Crustal Structure, Gravity, and Regional Tectonic Evolution [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B11): 9171–9195.
- [22] Yao Bochu, Wan Ling, Wu Nengyou. Cenozoic Plate Tectonic Activities in the Great South China Sea Area [J]. *Chinese Geology*, 2004, 31(2): 113–122. (姚伯初, 万玲, 吴能友. 大南海地区新生代板块构造活动[J]. 中国地质, 2004, 31(2): 113–122. )
- [23] Schlüter H U, Hinz K, Block M. Tectono-Stratigraphic Terranes and Detachment Faulting of the South China Sea and Sulu Sea [J]. *Marine Geology*, 1996, 130(1/2): 39–78.
- [24] Francis T W. Recent tectonics of Taiwan [J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1978, 26(S): S265–S299.
- [25] Franke D, Barckhausen U, Baristeas N, et al. The Continent–Ocean Transition at the Southeastern Margin of the South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(6): 1187–1204.
- [26] Zhang J, Yang G L, Tan H B, et al. Mapping the Moho Depth and Ocean–Continent Transition in the South China Sea Using Gravity Inversion [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 218: 104864.
- [27] Bonvalot S, Balmino G, Briais A, et al. World Gravity Map: A Set of Global Complete Spherical Bouguer and Isostatic Anomaly Maps and Grids [C]//EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2012.
- [28] Liang W, Li J C, Xu X Y, et al. A High-Resolution Earth's Gravity Field Model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, Satellite Altimetry, and EGM2008 [J]. *Engineering*, 2020, 6(8): 860–878.
- [29] Gao J, Zhang T, Fang Y, et al. Faulting, Magmatism and Crustal Oceanization of the Okinawa Trough [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009(3): 40–49.
- [30] Laske G, Masters G, Ma Z T, et al. Update on CRUST1.0: A 1-Degree Global Model of Earth's Crust [C]//EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2013.
- [31] Jiang Yongtao, Zhang Yongzhi, Wang Shuai, et al. The Lithospheric Heterogeneities of China Mainland and Neighborhood Based on CRUST1.0 and Its Characteristics [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(6): 60–65. (姜永涛, 张永志, 王帅, 等. 基于CRUST1.0的中国大陆及邻域岩石圈结构计算及特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(6): 60–65. )
- [32] Jiang Fuzhen, Fang Jian. Gravity Field Separation, Density Inversion and Crustal Tectonics in Kang-Dian Region [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, 14(4): 417–424. (蒋福珍, 方剑. 康滇地区重力场分离、密度反演与地壳构造[J]. 地震学报, 2001, 14(4): 417–424. )
- [33] Chen Zhixin, Xu Chuang, Zhang Heng, et al. Lithospheric Structure Feature of the Tibetan Plateau Revealed by Multi-scale Analysis of Gravity Gradients [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220776. (陈芷欣, 许闯, 张恒, 等. 采用重力梯度多尺度分析方法揭示青藏高原岩石圈结构特征[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220776. )
- [34] Fang Jian, Xu Houze. Three-Dimensional Lithospheric Density Structure Beneath Qinghai-Tibet

- and Its Adjacent Area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1997, 40(5): 660-666. (方剑, 许厚泽. 青藏高原及其邻区岩石层三维密度结构[J]. 地球物理学报, 1997, 40(5): 660-666.)
- [35] Wu Z C, Gao J Y, Ding W W, et al. The Moho Depth of the South China Sea Basin from Three-Dimensional Gravity Inversion with Constraint Points and Its Characteristics[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(4): 368-383.
- [36] Lu B L, Wang W Y, Zhao Z G, et al. Characteristics of Deep Structure in the South China Sea and Geological Implications: Insights from Gravity and Magnetic Inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61: 4231-4241.
- [37] Xie Xinong, Ren Jianye, Wang Zhenfeng, et al. Difference of Tectonic Evolution of Continental Marginal Basins of South China Sea and Relationship with SCS Spreading[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 77-87. (解习农, 任建业, 王振峰, 等. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 77-87.)
- [38] He Huiyou. Research and Application of Forward and Inversion Method of Gravity Anomaly in the Wavenumber Domain [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (何慧优. 波数域重力正反演方法研究及其应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.)
- [39] He H Y, Fang J, Guo D M, et al. 3D Density Imaging Using Gravity and Gravity Gradient in the Wavenumber Domain and Its Application in the Decorah [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 134.
- [40] He Huiyou, Fang Jian. Gravity Anomaly Spectrum Analysis Method and Its Application[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(12): 2092-2102. (何慧优, 方剑. 重力异常频谱分析方法研究与应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 2092-2102.)
- [41] Commer M. Three-Dimensional Gravity Modelling and Focusing Inversion Using Rectangular Meshes [J]. *Geophysical Prospecting*, 2011, 59(5): 966-979.
- [42] Huang H B, He E Y, Qiu X L, et al. Insights About the Structure and Development of Zhongsha Bank in the South China Sea from Integrated Geophysical Modelling [J]. *International Geology Review*, 2020, 62(7/8): 1070-1080.
- [43] Shi X B, Qiu X L, Xia K Y, et al. Characteristics of Surface Heat Flow in the South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 22 (3): 265-277.
- [44] Kaban M K, Schwintzer P. Oceanic Upper Mantle Structure from Experimental Scaling of VS and Density at Different Depths[J]. *Geophysical Journal International*, 2001, 147(1): 199-214.
- [45] Shi X B, Zhou D, Qiu X L, et al. Thermal and Rheological Structures of the Xisha Trough, South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2002, 351 (4): 285-300.
- [46] Ruan A G, Wei X D, Niu X W, et al. Crustal Structure and Fracture Zone in the Central Basin of the South China Sea from Wide Angle Seismic Experiments Using OBS [J]. *Tectonophysics*, 2016, 688: 1-10.