

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.01.008

引用格式: 尚鲁宁, 潘军, 曹瑞, 等. 基于重磁数据研究江苏岸外滨海断裂带及邻区构造特征[J]. 华东地质, 2024, 45(1): 101-114. (SHANG L N, PAN J, CAO R, et al. Structural characteristics of the Binhai Fault Zone in Jiangsu offshore—implications from gravity and magnetic data[J]. East China Geology, 2024, 45(1): 101-114.)

基于重磁数据研究江苏岸外滨海断裂带及邻区构造特征

尚鲁宁¹, 潘军¹, 曹瑞², 周青春³, 孔祥淮¹

(1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266237;

2. 青岛地质工程勘察院, 山东 青岛 266101;

3. 中国地震灾害防御中心, 北京 100029)

摘要: 江苏岸外滨海断裂带是南黄海西部一条重要的活动断裂, 孕育了多次 $M \geq 5.0$ 的破坏性地震。该断裂带所在海域特殊的自然地理条件限制了海洋地质调查的开展, 导致目前对其展布特征、断面结构、活动强度和力学性质等仍存在争议。文章基于重磁异常的定性分析和定量计算并结合前人研究成果, 对滨海断裂带及邻区的构造特征进行研究, 追踪了滨海断裂带可能的展布特征, 并探讨了不同分段构造属性和活动性。结果表明, 滨海断裂带在江苏岸外 20~30 km 处大致平行于岸线延伸, 在废黄河口以北分叉为东、西两支。推测大致以射阳和如东海域为界, 将断裂带分为 3 段。中段构成苏北盆地的东部边界, 为长期继承性活动的深大断裂; 南段为形成时代较新的平移断裂, 构造活动性最强; 北段的存在与否和活动性仍有待进一步调查确认。

关键词: 江苏岸外滨海断裂带; 重磁异常; 盆地结构; 地震; 海洋区域地质调查

中图分类号: P31; P54; P65

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2024)01-101-14

江苏岸外的滨海断裂带是南黄海西部一条平行于岸线延伸的 NNW 向断裂, 具有强烈的活动性, 历史上曾发生多次 $M \geq 5.0$ 的地震^[1-7]。已有的研究成果表明, 滨海断裂带是一条切穿 Moho 面的深大断裂^[3,8], 具有右旋走滑-挤压性质^[8-9], 对两侧的构造应力场、盆地结构和构造演化具有重要的分隔控制作用^[9-10]。研究该断裂带及邻区的构造特征, 对于深入理解华北—扬子板块的相互作用过程、苏北—南黄海盆地的形成演化, 以及该断裂在新近纪以来的构造活动性和孕震机制等至关重要。

滨海断裂带所在的江苏岸外滩—浅海区域水深较浅, 潮间带宽阔, 潮流沙脊群的存在和变迁导致本区海底地形变化多端^[11-13], 给海洋和海岸带地

质调查造成了特殊的困难, 使得本区成为海洋区域地质调查的盲区之一。深层反射地震资料和海域固定地震台站的缺失, 制约了对滨海断裂带中—深层位置和断面几何结构的成像和研究, 导致目前对于滨海断裂带空间展布、结构构造、活动强度和力学性质等方面的认识仍然存在争议。

本文在总结江苏岸外滨海断裂带已有研究成果的基础上, 结合南黄海西部海洋区域地质调查工作的目标任务, 利用重磁数据对该断裂带及邻区的构造地质特征进行研究。通过定性分析和各项计算, 进一步明确重磁异常分布特征与盆地基底结构之间的对应关系; 结合天然地震资料, 追踪断裂带的空间展布特征, 并探讨滨海断裂带对两侧构造格局和构造应力场的分隔控制作用。

* 收稿日期: 2023-12-25 修订日期: 2024-03-01 责任编辑: 叶海敏

基金项目: 中国地质调查局“南黄海西部 1:25 万海洋区域地质调查(编号: DD20221710-2)”、山东省自然科学基金面上项目(编号: ZR2023MD047)和中国地震局地震科技星火计划(编号: XH22014A)项目联合资助。

第一作者简介: 尚鲁宁, 1986 年生, 男, 副研究员, 博士, 主要从事海洋地质调查工作。Email: shang1924@163.com。

通信作者简介: 曹瑞, 1986 年生, 男, 高级工程师, 本科, 主要从事地质矿产和工程地质勘查工作。Email: 277025178@qq.com。

1 区域地质背景

研究区位于郯庐断裂带以东的下扬子东北部陆域和邻近的南黄海西部海域(图 1)。陆域地形较为平坦,以冲积平原为主。苏北岸外海域地形地貌变化较大(图 2),主要可以分为北部较为平坦的废黄河水下三角洲和南部以弶港为顶点的辐射状潮流沙脊群^[13]。构造上,研究区跨越扬子板块及其北侧的苏鲁造山带两大一级构造单元,覆盖了苏鲁—千里岩隆起、南黄海北部盆地、南黄海中部隆起、苏北—南黄海南部盆地、苏南—勿南沙隆起的局部地区(图 2)。受 NEE 和 NW 两个优势方向断裂带的控制,盆地内又分为多个规模不等的凸起和凹陷^[14-16]。部分断裂在新近纪期间受印度板块碰撞远程效应以及菲律宾海板块俯冲作用叠加在本区形成的复杂构造应力场的影响^[5,17-18],发生了活化或继承性活动,引起了较为强烈的地震活动^[19-21]。

本区经历了复杂的构造演化历史^[10,14,22-23]。寒武纪—中三叠世,先后经历了克拉通坳陷盆地和克拉通裂陷盆地阶段,在晋宁期结晶基底和褶皱基底之上形成以海相碳酸盐岩为主的巨厚沉积。中三叠世末,扬子板块与中朝板块沿秦岭—大别—苏鲁造山带发生碰撞拼贴并连为一体^[23]。同碰撞造山期和造山期后,沿郯庐断裂带和朝鲜半岛西缘断裂带发生的大规模走滑运动,使扬子板块东北部的下扬子东部陆域和南黄海地区向北楔入中朝板块,形成相对独立的块体^[24-25]。晚侏罗世—早白垩世,在古太平洋板块俯冲和扬子—中朝碰撞后热/重力崩塌的共同作用下^[26-28],本区发生强烈伸展,在元古代变质基底和残留古生代海相地层的基础上,开始形成陆相断陷盆地。晚白垩世—古近纪,苏北—南黄海南部盆地和南黄海北部盆地发生大规模断陷作用,沉积了厚度超过 5 000 m 的陆相地层^[14,29],二者之间的中部隆起区长期处于抬升剥蚀状态^[30]。渐

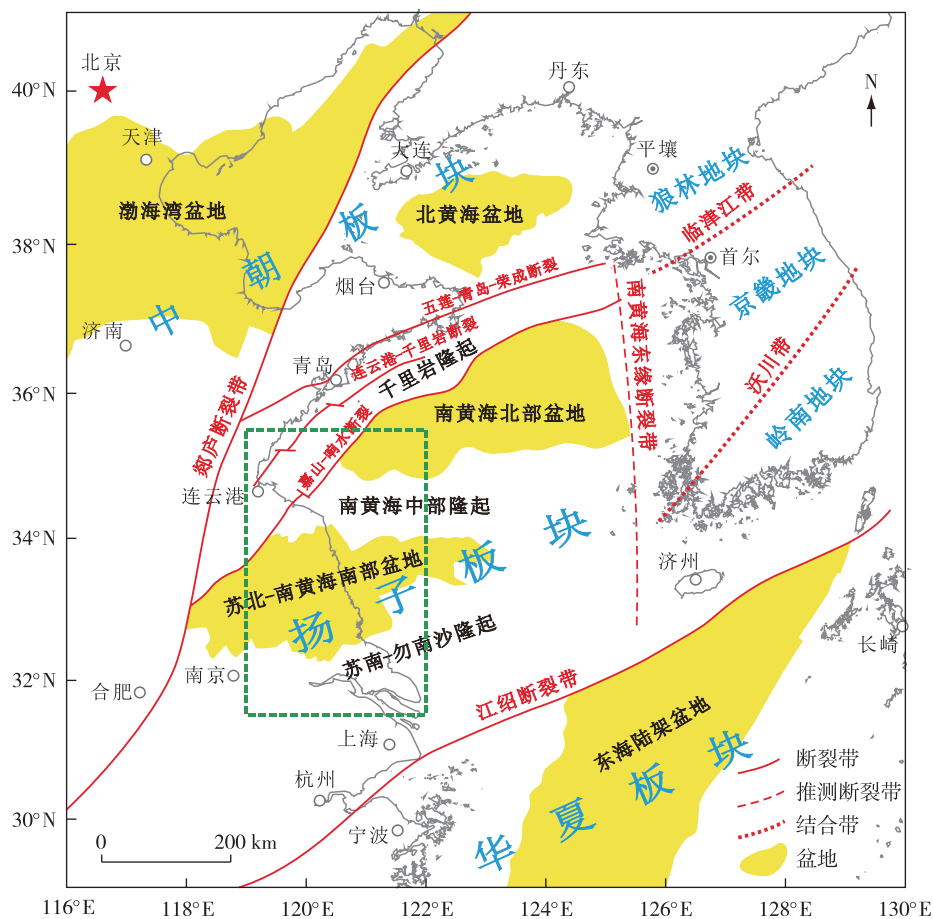
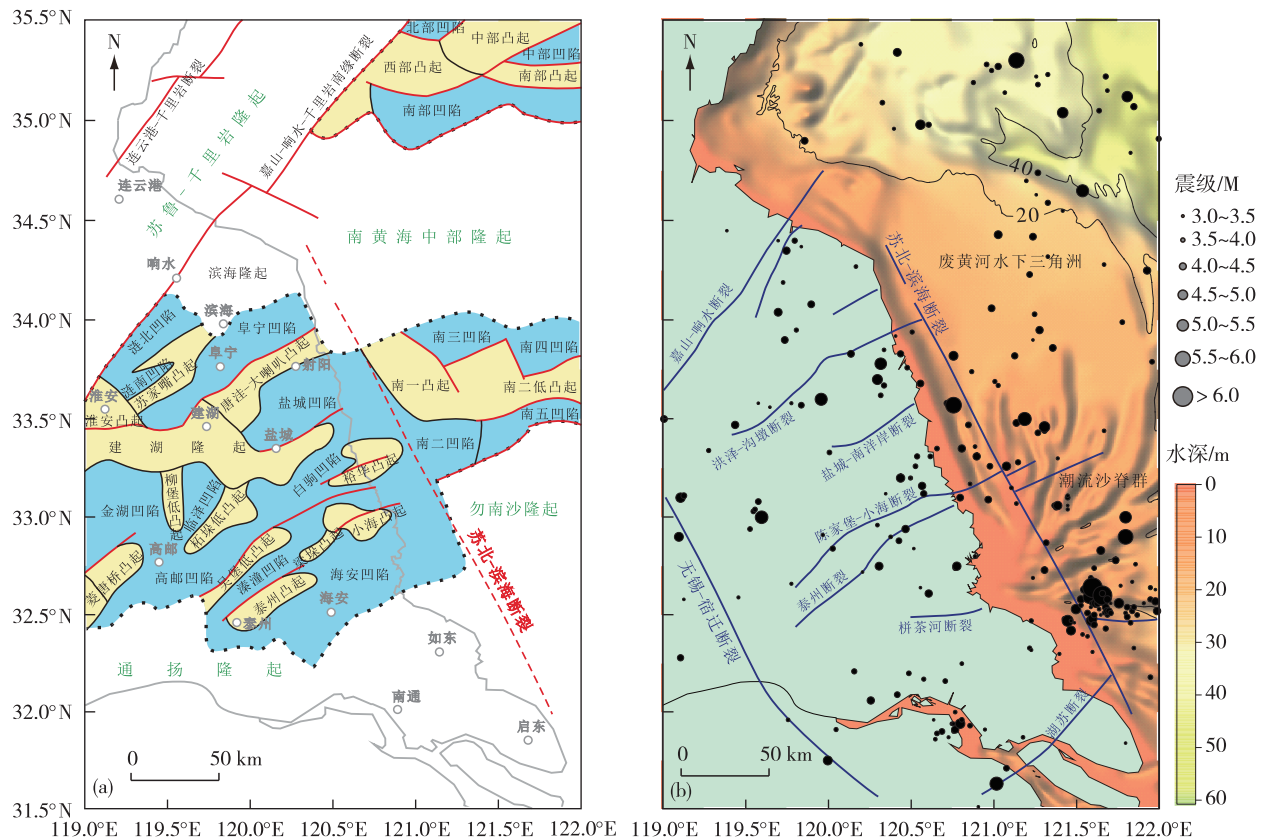


图 1 研究区大地构造位置图(据文献[10, 24-25, 31-32]修改,绿色虚线方框为研究区范围)

Fig. 1 Tectonic setting of the study area (modified from references [10, 24-25, 31-32], the green dashed rectangle delineates the study area)



红色实线为主要控盆/凹断裂;天然地震数据来源于国家地震科学数据中心(<https://data.earthquake.cn/>)和中国地震台网中心(<https://news.ceic.ac.cn/>)

图 2 苏北滨海断裂带及邻区构造纲要图(a)(据文献[10,15,21]修改)和海底地形、主要活动断裂及天然地震分布图(b)(海底地形据文献[13],活动断裂据文献[2,19,21,33-34]修改)

Fig. 2 Structure sketch (a) (modified from references[10,15,21]), seafloor topography(modified from reference [13]), major active faults(modified from references [2,19,21,33-34]) and earthquake distribution (b) of the study area

新世末,断陷作用结束,苏北和南黄海形成统一的坳陷盆地,堆积了厚度均一、变形微弱的新近系和第四系^[14,22-23]。

2 数据和方法

2.1 数据来源

重磁数据主要来源于青岛海洋地质研究所承担的“中国海及邻区地质地球物理系列图”^[35]项目重磁数据库。其中,海域重磁数据主要包括 1970—2000 年通过专项调查获得的船测数据^[36-37],陆区重磁数据由陕西省地质矿产勘查开发局第二综合物探大队、自然资源航空物探遥感中心等单位提供^[37]。采用 EMAG2 全球磁异常数据集^[38]、美国

Scripps 海洋研究所全球海洋重力数据集^[39]以及国际重力局(BGI)全球重力模型(WGM2012)等数据填补了实测数据空白区。利用统一的标准和相同的平台对不同来源的重磁数据做了融合处理,并评价了数据精度^[37]。将数据重新网格化为 $2' \times 2'$ 的网格,用于成图和各项计算。结合 1970 年以来研究区发生的天然地震震源分布和震级等参数,对主要活动断裂的展布和构造活动性进行了探讨。共使用 $M \geq 3.0$ 、震源深度 ≤ 40 km 的天然地震事件 256 个,地震数据来源于国家地震科学数据中心(<https://data.earthquake.cn/>)和中国地震台网中心(<https://news.ceic.ac.cn/>)。

2.2 计算方法

根据研究区中心点(120.5°E , 33.5°N)附近的

地磁场参数(偏角 50.15° , 倾角 -6.92°)(国际地磁参考场模型 IGRF13^[40]), 对磁异常做了化极处理。在布格重力异常和化极磁异常定性分析和描述的基础上, 为了更加清晰准确地突显出主要的构造边界, 分离不同深度场源产生的高、低频率的重磁异常并获得深、浅部构造信息, 利用中国地质调查局发展研究中心开发的 RGIS 软件^[41], 对重力和磁力异常进行了各项计算, 主要包括向上延拓、总水平导数、解析信号振幅和线性增强等, 并选取特征最明显的计算结果, 如布格重力异常上延 20 km、解析信号振幅、总水平导数以及化极磁异常线性增强, 探讨江苏岸外滨海断裂带及邻区的构造特征。

各项计算的主要目的和方法概括如下:

2.2.1 向上延拓

向上延拓主要用来削弱局部异常, 突出深部异常, 对于深部构造研究具有重要作用。重磁异常随测点与场源距离的增大而衰减, 衰减速度与具有剩余密度和磁性的地质体体积和埋深有关。小而浅的地质体重磁场比大而深的地质体重磁场随距离衰减快得多, 因此可以用向上延拓来压制局部异常的干扰, 反映深部规模较大的地质体^[37]。

向上延拓的基本计算方法和原理^[42]包括:

由某一平面上的重力异常 $\Delta g(x, y, 0)$ 值换算高于这个平面上的任意点的 $\Delta g(x, y, -z)$, 是以“莱曼”无限外部问题为基础。

一个密度分布不均匀的无限大物质面在其上部空间任意点 A 产生的引力位为:

$$V(x, y, -z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta g(\epsilon, \eta, 0) d\epsilon d\eta}{[(\epsilon - x)^2 + (\eta - y)^2 + (0 - z)^2]^{1/2}}, \quad (1)$$

对 z 求导数, 得到该点的重力异常表达式:

$$\Delta g(x, y, -z) = -\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{z}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta g(\epsilon, \eta, 0) d\epsilon d\eta}{[(\epsilon - x)^2 + (\eta - y)^2 + (0 - z)^2]^{3/2}}, \quad (2)$$

此式为直角坐标系时, 三度体异常向上延拓的基本公式, 改用柱坐标并把计算点选在坐标原点的正上方, 则公式变为:

$$\Delta g(0, 0, -z) = \frac{z}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Delta g(r, a, 0) r dr da}{(r^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (3)$$

对二度体异常来说, 由于重力异常沿 y 方向为

常数, 将(3)式对 η 积分, 然后代入积分限得二度体重力异常换算公式:

$$g(0, -z) = \frac{z}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\epsilon, 0) \frac{d\epsilon}{\epsilon^2 + z^2}. \quad (4)$$

2.2.2 总水平导数

总水平导数可以用来辅助确定线性构造, 如断裂或岩性接触面的位置, 是边缘识别技术应用最多的方法之一^[43]。研究和试验表明, 重力异常总水平导数随着地质体埋深的增大, 其极大值位置偏向地质体外侧的距离越大。对于倾斜边界, 总水平导数所确定的边缘位置偏向地质体倾向一侧^[43]。

平面网格数据总水平导数的计算公式为^[43]:

$$THDR(x, y, 0) = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y, 0)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y, 0)}{\partial y}\right)^2}, \quad (5)$$

式中, $f(x, y, 0)$ 为某一平面上的数据体。

2.2.3 解析信号振幅

解析信号振幅代表了重磁异常场的总梯度模, 该方法利用极大值位置来识别地质体的边缘位置^[44]。重磁异常解析信号振幅的变化规律为: 当地质体埋深较浅时, 解析信号振幅极大值位置所确定的地质体边缘位置接近形体的上顶边缘位置, 且靠近地质体上顶边缘内侧。随着地质体埋深的增加, 解析信号振幅极大值位置偏向形体内侧, 并很快收敛到形体的中心位置^[44]。

解析信号振幅的计算公式^[44]为:

$$ASM = \sqrt{THDR^2 + VDR^2}, \quad (6)$$

式中, $THDR$ 为总水平导数, VDR 为垂向导数。

2.2.4 线性增强

梯度带滤波增强技术对重力梯度带有强烈的放大作用, 是一种提高断层信息分辨率的有效方法, 能够更为准确地确定断裂的位置^[41]。针对重磁场数据的特点, 特别是重力异常特征, 采取异常梯度带滤波增强技术, 可以突出异常中的线性构造特征^[41]。

梯度带滤波增强技术包含以下计算过程^[41]:

a. 在每个区域内分别计算异常均值和方差:

$$\delta_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\bar{g}_i - g_i(j)) / m_i}, \quad (7)$$

式中, m_i 为第 i 个区域异常测点数, $\bar{g}_i$ 为第 i 个区域异常平均值, $g_i(j)$ 为第 i 个区域第 j 个点上的异常值, δ_i 为第 i 个区域的异常方差;

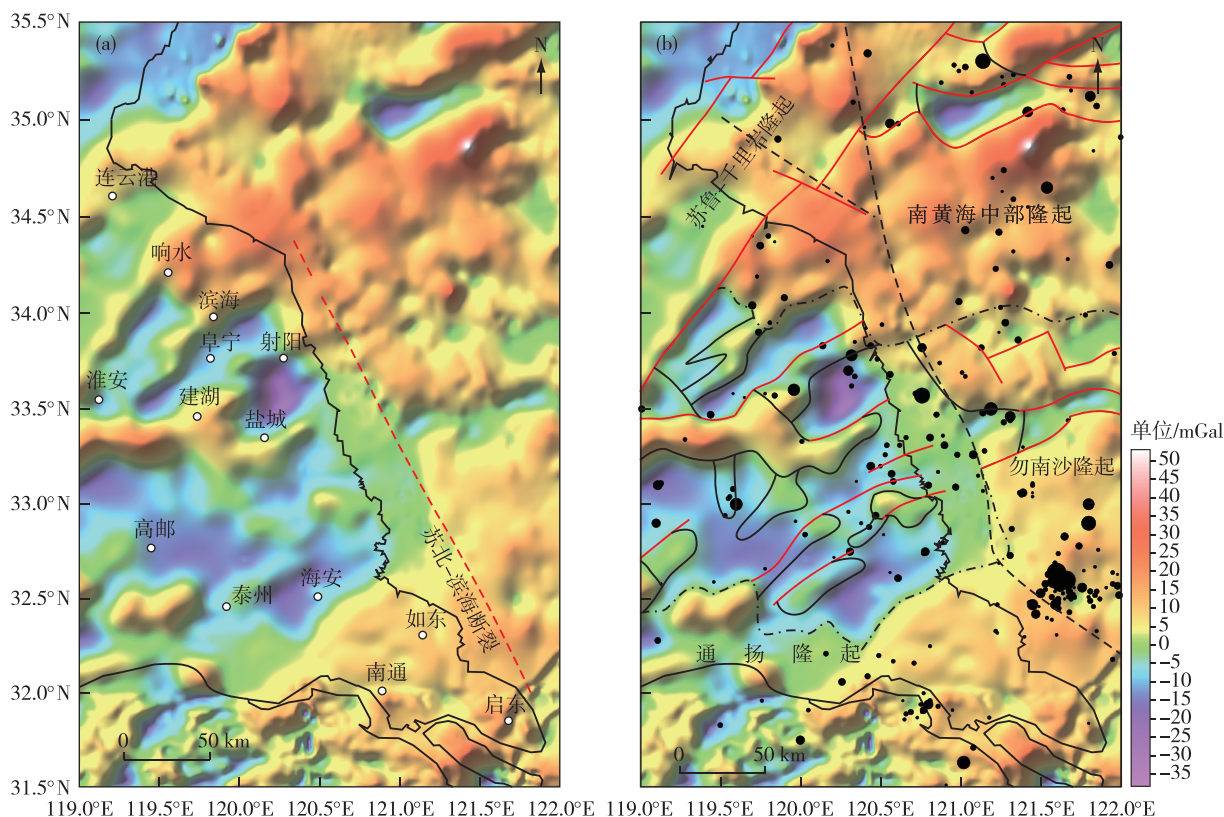
- b. 选择 δ_i 中最小者 δ_{min} ;
- c. 把 δ_{min} 所对应异常区域的均值作为处理结果;
- d. 窗口滑动到下一点重复上述步骤。

3 重磁异常特征和计算结果

3.1 重磁异常分布特征

研究区布格重力异常以大面积宽缓变化的团块状异常为主,异常幅值较低,大部分地区为 $-50 \sim 50$ mGal(图 3)。布格重力异常的分布特征与已知构造单元之间存在明显的对应关系,异常值高低主

要反映了基底隆-拗格局。苏北盆地以大范围负异常为主,异常最低的地区位于盐城凹陷,最低值 < -20 mGal。负异常背景之上叠加了局部异常高值区,主要与盆地内的凸起相对应,以建湖隆起最为显著,异常值超过 20 mGal。海域以正异常为主,自南向北,勿南沙隆起、南黄海中部隆起、千里岩隆起分别与陆域的苏南隆起、滨海隆起和苏鲁隆起相连,形成大面积连片分布的正高异常区,仅在南黄海南部和北部盆地的凹陷区存在小范围负异常区。连云港—千里岩断裂以北的地区,以负异常为主。



构造单元边界及主要断裂展布同图 2(a),天然地震分布同图 2(b),黑色粗虚线为江苏岸外重力梯度带

图 3 滨海断裂带及邻区布格重力异常图(a)及构造解释图(b)

Fig. 3 Bouguer gravity anomaly (a) and structural interpretations (b) of the Binhai Fault Zone and adjacent region

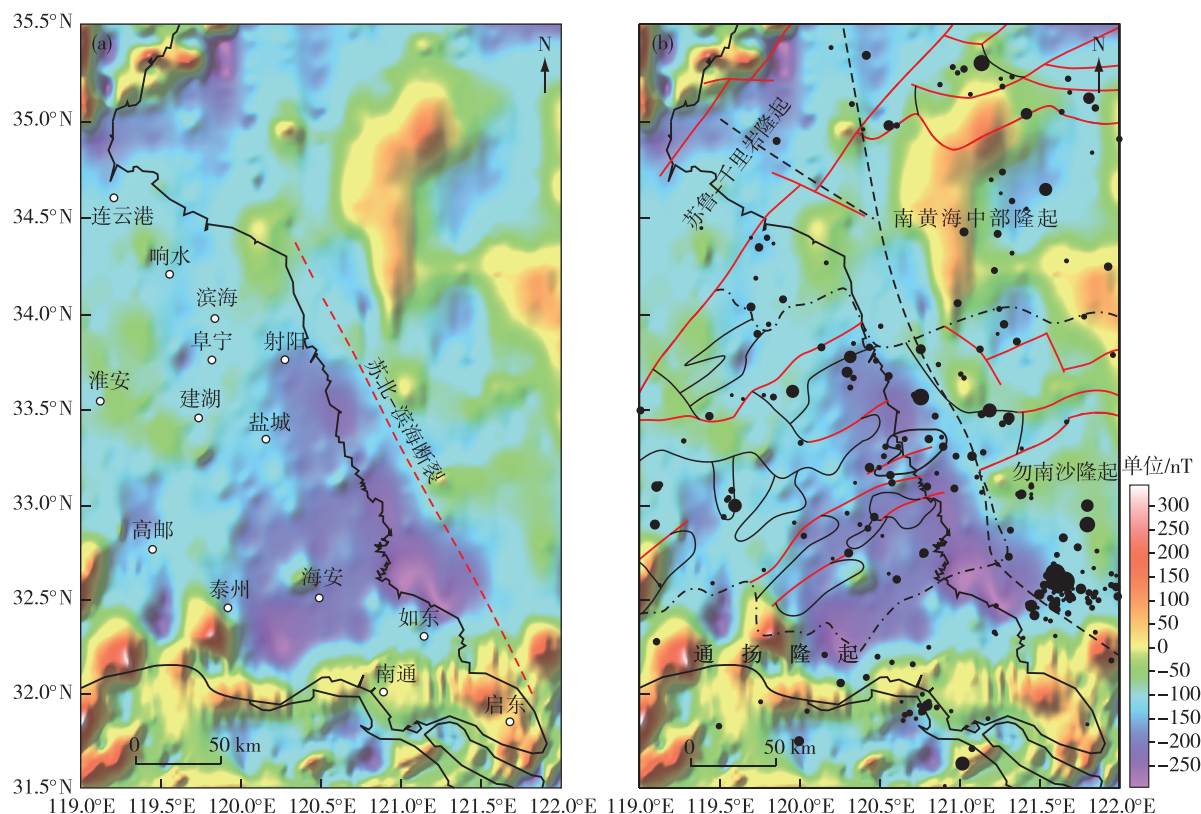
布格重力异常的优势走向为 NE—NEE—EW 向,不同地区存在显著差异。苏北盆地建湖隆起以北的地区表现为明显的 NE 向,而以南的地区则以 NEE 向为主。海域重力异常走向特征不明显,仅在南、北两盆地区表现为 NEE—EW 向的优势走向。在苏北岸外约 20~30 km 处,存在一条大致平行于岸线延伸的重力异常梯度带。该带在废黄河口以北分为东、西

两个分支,西侧分支平行于岸线延伸至海州湾西部,东侧分支则继续向北延伸至山东半岛南侧。大致以射阳为界,梯度带南、北极性发生反转,北段的重力异常呈西高东低,且两侧异常幅值差异较小;而南段呈明显的东高西低的特点,梯度较大,构成了南黄海南部盆地和苏南—勿南沙隆起正异常区与苏北盆地负异常区之间的界线。梯度带向南在如东—启东岸外

发生顺时针偏转并难以准确追踪。

化极磁异常图上(图 4),苏北和南黄海西部地区以负异常和正低异常为主,大部分地区异常幅值较低($-100\sim 50$ nT)。磁异常的分布与盆地基底构造格局之间没有明显的对应关系。较强的负异常主要分布于苏北盆地东部和南部,最低值 <-250 nT。南黄海中部隆起的西部和南黄海北部盆地的南部凹陷

等地区分布有面积较大的团块状正高异常区,异常最大值超过 100 nT。苏北岸外布格重力异常梯度带所在的位置,在化极磁异常图上也存在清晰的线性特征,表现为一条明显的磁异常边界:如东—射阳,构成了苏北盆地东部负异常中心的边界;射阳以北,构成了南黄海西部正高磁异常区的西边界。



构造单元边界及主要断裂展布同图 2(a),天然地震分布同图 2(b),黑色粗虚线为江苏岸外重力梯度带

图 4 滨海断裂带及邻区化极磁异常图(a)及构造解释图(b)

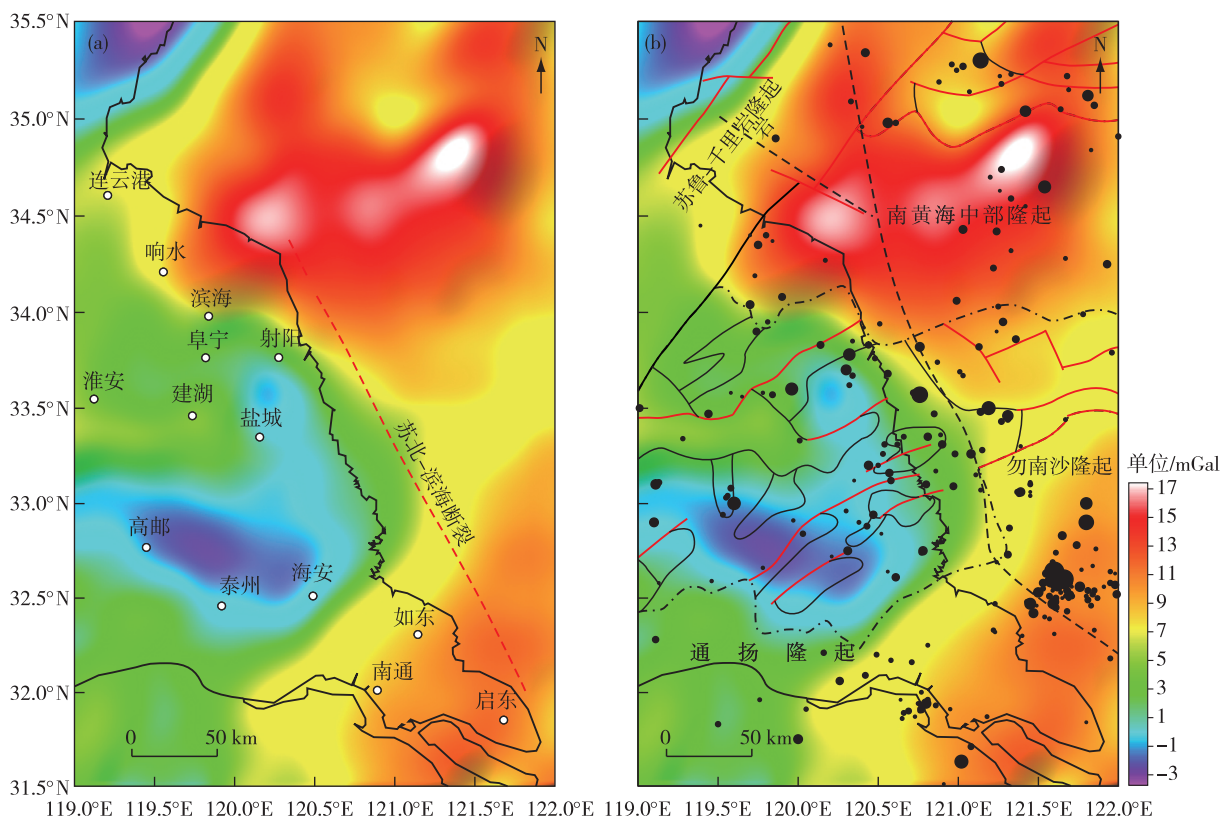
Fig. 4 Reduced-to-the-pole magnetic anomaly (a) and structural interpretations (b) of the Binhai Fault Zone and adjacent region

3.2 重磁异常计算结果

布格重力异常向上延拓 20 km 计算有效压制了浅部和细节异常,突出了深部和区域异常(图 5)。总体上,上延 20 km 的布格重力异常值与新生代断陷盆地基底形态存在正相关关系,基底埋深越大,异常值越低。苏北盆地表现为明显的布格重力低异常。海域存在南、北两个高异常区,分别与苏南—勿南沙隆起和南黄海中部隆起相对应,二者被南黄海南部盆地中一低异常区分隔。南黄海中部隆起为本区重力异常最高的地区,异常值普遍在

10 mGal 以上,包含东、西两个异常值超过 17 mGal 的极大值区。苏北岸外布格重力异常梯度带在上延 20 km 后仍十分明显,在南段的如东和射阳之间构成南黄海正高异常区和苏北盆地低异常区之间的梯度带;在射阳以北则构成南黄海中部隆起东、西两个异常极大值区的边界。

布格重力异常总水平导数和解析信号振幅计算结果进一步突出了断裂等主要构造单元边界和线性构造的位置和展布特征(图 6、图 7),二者的极大值与已知断裂和构造单元边界存在良好的对应



构造单元边界及主要断裂展布同图 2(a),天然地震分布同图 2(b),黑色粗虚线为江苏岸外重力梯度带

图 5 布格重力异常向上延拓 20 km 图(a)及构造解释图(b)

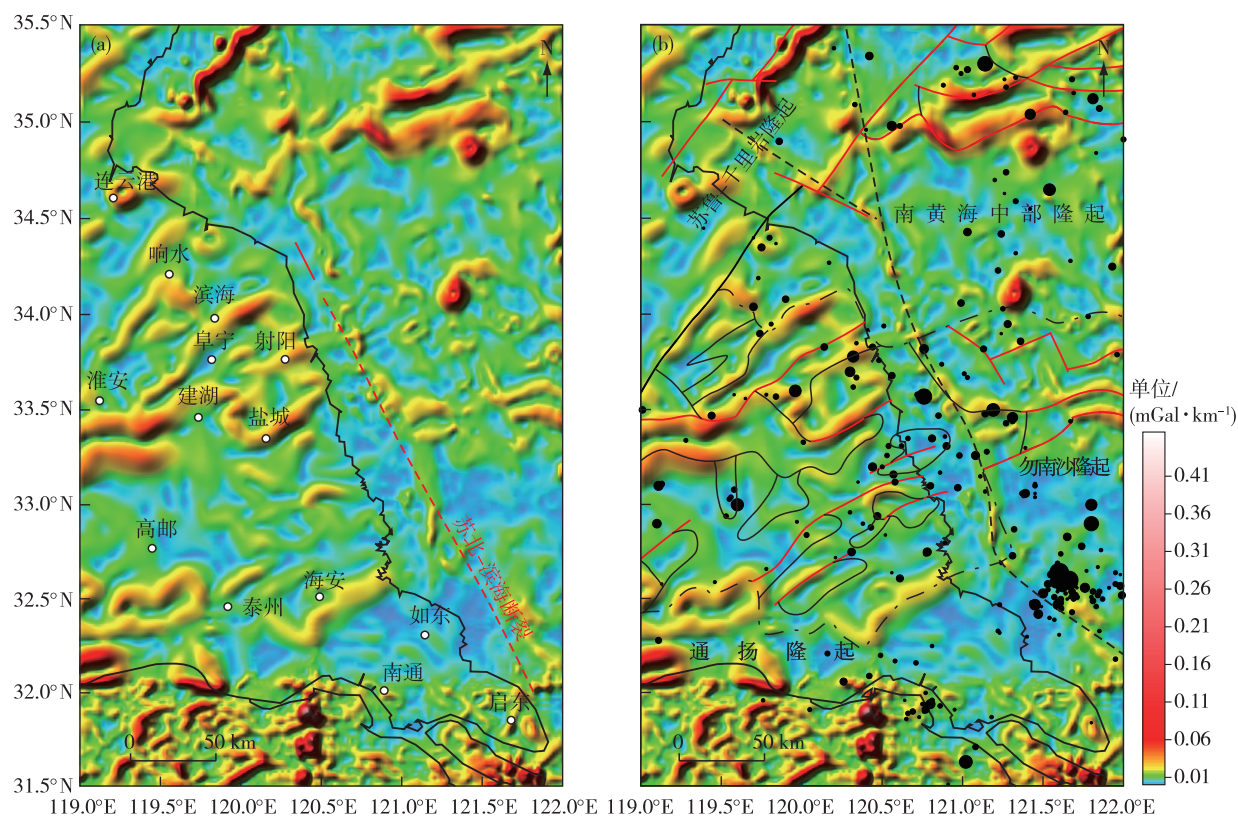
Fig. 5 20 km-upward-continuation of the Bouguer gravity anomaly (a) and structural interpretations (b) of the Binhai Fault Zone and adjacent region

关系。在陆域和海州湾地区,大致以苏北盆地建湖隆起为界,以北的地区布格重力异常总水平导数和解析信号振幅极大值带优势走向为 NE 向,以南的地区优势走向为 NEE—EW 向。海域的南黄海中部隆起和勿南沙隆起区,布格重力异常总水平导数和解析信号振幅极大值线性特征不明显,南、北两盆地优势走向为近 EW 向。苏北岸外布格重力异常梯度带表现为串珠状极大值带,分隔了两侧具有不同幅值和优势走向的区域。化极磁异常线性增强计算结果图(图 8)的磁异常分布特征与化极磁异常分布特征相似,但强化了不同异常区之间的边界,使得已知断裂与磁异常梯度带之间的对应关系更加明显。

4 讨论

目前,通过天然地震分布、地震层析成像、浅层反射地震探测等多种方法,基本证实了江苏岸外滨

海断裂带的存在,并在断裂带的几何学、运动学和动力学特征等方面取得了诸多认识,主要包括:①滨海断裂带呈 NNW 向自启东外海延伸至废黄河口外,全长超过 270 km,可以分为不连续的北、中、南 3 段^[6];②滨海断裂带是南黄海西部一条重要的孕震构造,中段和南段全新世以来存在明显的活动,历史上发生过多处 $M \geq 5.0$ 破坏性地震^[1-7];③滨海断裂带南段和中段的活动性较强,地震主要集中于这一区域,而北段活动性较弱,断裂上部未切穿全新统底界^[41];④滨海断裂带是一条切穿 Moho 面的深大断裂,总体倾向 NE,断面近直立,在 25 km 以浅的地壳速度结构图像上,表现为一条明显的速度界线,分隔了西侧的低速异常和东侧的高速异常^[3,8];⑤滨海断裂带在浅地层剖面上,表现为一组高角度小微断层组合^[45];⑥滨海断裂带活动方式为右旋走滑挤压^[6,8-9],主要是在新近纪以来西部印度板块碰撞和东部太平洋/菲律宾海板块俯冲远



构造单元边界及主要断裂展布同图 2(a),天然地震分布同图 2(b),黑色粗虚线为江苏岸外重力梯度带

图 6 布格重力异常总水平导数图(a)及构造解释图(b)

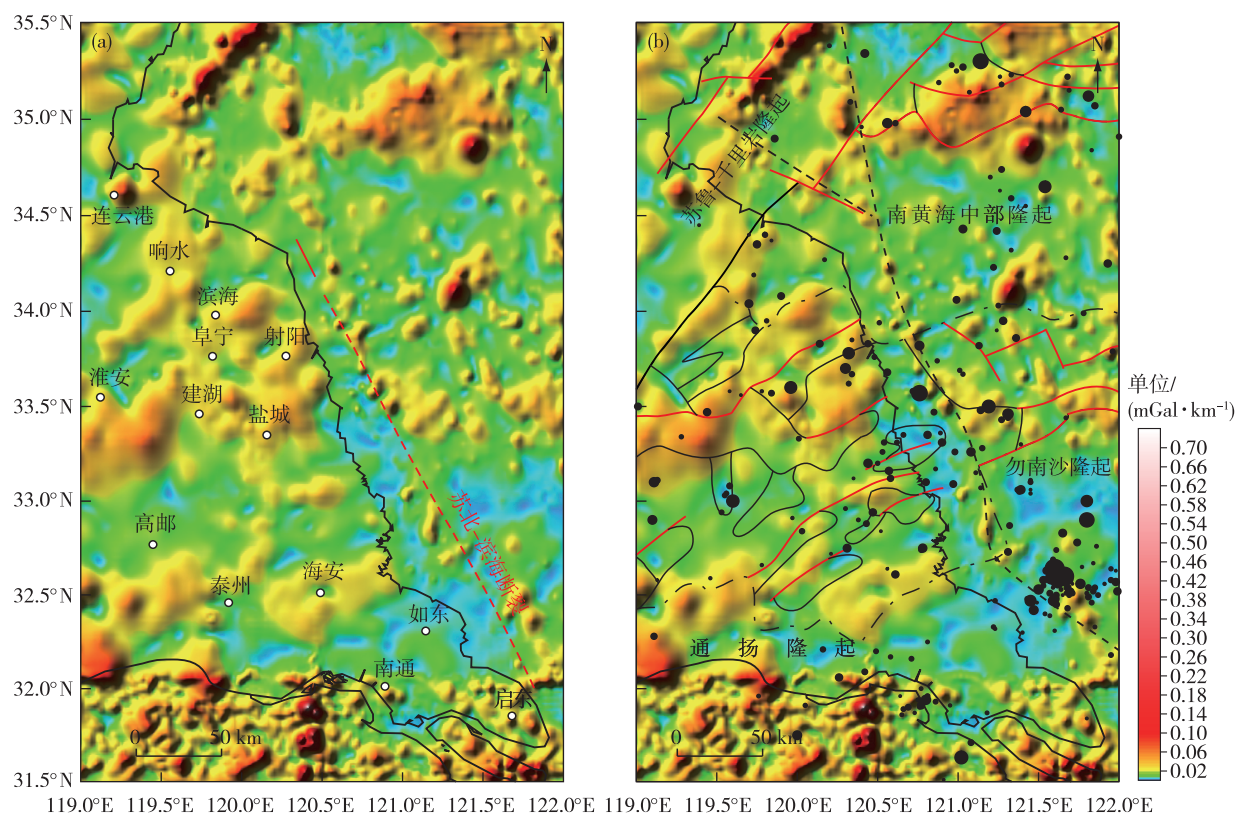
Fig. 6 Total horizontal derivative of Bouguer gravity anomaly (a) and structural interpretations (b) of the Binhai Fault Zone and adjacent region

程效应叠加所产生的 NNE 向区域主压应力场的影响下形成^[1,5,17-18]。

但是,受滨海断裂带及邻区构造地质特征本身的复杂性及探测技术方法等方面的制约,对该断裂带空间展布和构造活动性等认识仍然存在争议。滨海断裂带与多条自苏北陆域向东延伸入海的 NE 向活动断裂相交,断裂交汇处成为地震活动相对集中的区域^[5],准确判别发震断裂、识别由滨海断裂活动产生的地震存在一定的难度,从而制约了滨海断裂带地震活动性的研究。大型断裂由深到浅往往发生分支和偏移,并伴生大量次级断层,形成复杂的断裂系统。在缺乏深层地震反射结构的前提下,仅通过浅层地震探测图像上的断层信息,难以准确约束断裂带的位置和结构。断裂系统深部与浅部之间的关联性较为复杂^[46],苏北及南黄海西部地区的震源重新定位结果表明,地震主要发生在 5 ~ 20 km 的中—上地壳

层^[2,4,6-8,47],沿断裂深层发生的地震活动是否一定在浅表层断裂上有所反应,对通过浅层断面切割地层情况来判断断层活动的时间下限提出了挑战。

重磁异常资料的分析和计算结果,为进一步明确江苏岸外滨海断裂带的空间展布特征和构造属性提供了新的证据。滨海断裂带及邻区的重力异常分布特征与中—新生代断陷盆地基底构造存在良好的对应关系,反映了盆地基底的隆、拗起伏格局。同时,重力异常解析信号振幅和总水平导数的计算结果,确认了重力梯度带与主要断裂之间的对应关系。在苏北岸外 20 ~ 30 km 处,识别出一条大致平行于岸线延伸的重力异常梯度带。该带在如东和射阳之间位置几乎与前人标定的滨海断裂带位置重合,沿线分布大量地震活动,并构成了苏北盆地的东部边界。在化极磁异常及其线性增强计算结果图上



构造单元边界及主要断裂展布同图 2(a),天然地震分布同图 2(b),黑色粗虚线为江苏岸外重力梯度带

图 7 布格重力异常解析信号振幅图(a)及构造解释图(b)

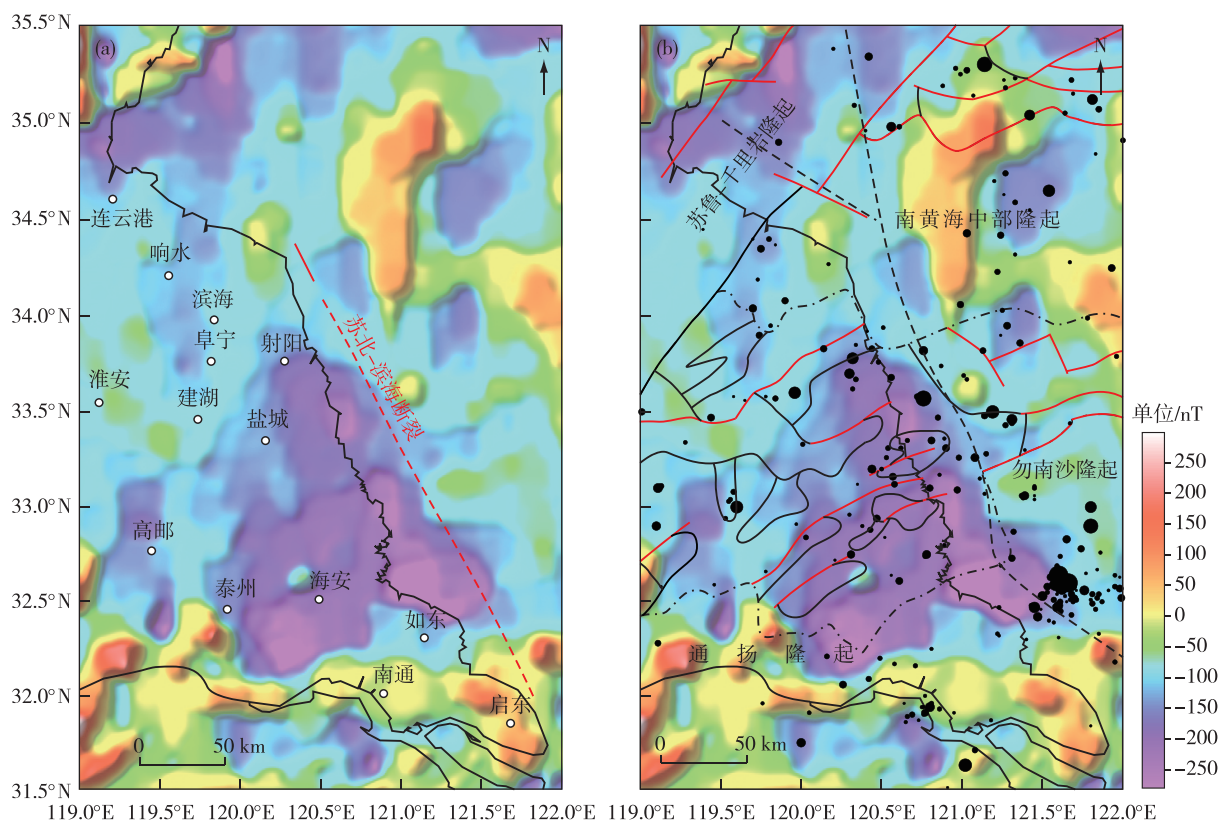
Fig. 7 Analytical signal amplitude of Bouguer gravity anomaly (a) and structural interpretations (b) of the Binhai Fault Zone and adjacent region

(图 8),该带与苏北盆地负异常区的东部边界对应。在布格重力异常上延 20 km 计算结果图(图 5)上,该带构成苏北盆地低异常区和南黄海正高异常区的边界。据此推测,这一重力异常梯度带代表了滨海断裂带。

根据重力异常解析信号振幅和总水平导数计算结果凸显的重力梯度带位置,对滨海断裂带在江苏岸外向北和向南的延伸特点和位置进行了推断。计算结果表明,该断裂带可能自射阳岸外继续向北延伸至南黄海中部隆起内部,并在废黄河口以北分为东、西两个分支,其北端均终止于连云港—千里岩断裂。沿东、西两个分支均有地震活动发生,如 2023 年 12 月 7 日 23 时 01 分西侧分支附近发生的 M3.8 地震(119.86°E,34.9°N),江苏和山东沿海多地有震感。目前,虽然尚未确认这些地震的发震断层是否与 NW 向断裂活动有关,但是滨海断裂带在这一地区的延伸及其构造活动性,在未来的海洋地

质调查中仍值得关注。如东以南,滨海断裂带可能发生逆时针偏转,继续以平行于岸线的方向延伸至勿南沙隆起内部。该断裂在这一地区引起的重磁异常不及北部明显,但是沿线却分布密集的地震活动,表明其形成时代可能较晚并且以平移断层为主,伸展作用较弱,没有导致两侧盆地基底性质和埋深的显著差异。

江苏岸外滨海断裂带对两侧的构造发育特征起到了明显的分隔作用。前人根据天然地震分布和浅层反射地震探测,通常将启东至废黄河口之间的滨海断裂带分为北、中、南 3 段^[6,45]。本文结合重磁异常分析结果,提出以断裂带所处的构造位置及其对两侧构造特征的分隔作用为标准,将滨海断裂带分为北、中、南 3 段。北段位于射阳以北,断裂整体处于南黄海中部隆起和苏鲁—千里岩隆起的内部,地震活动性较为微弱,断裂的位置和活动性有待进一步调查和研究;中段位于射阳



构造单元边界及主要断裂展布同图 2(a),天然地震分布同图 2(b),黑色粗虚线为江苏岸外重力梯度带

图 8 化极磁异常线性增强(a)及构造解释图(b)

Fig. 8 Linear enhancement of reduced-to-the-pole magnetic anomaly (a) and structural interpretations (b) of the Binhai Fault Zone and adjacent region

和如东之间,与传统认为的江苏滨海断裂带位置重合,自北向南分别构成了苏北盆地与南黄海南部盆地、苏北盆地与勿南沙隆起之间的边界,推测继承了苏北盆地东缘基底断裂,并存在长期活动;南段位于如东与启东之间,位于勿南沙隆起内部,地震活动性较强,属于形成时代较新、以走滑活动为主的断裂。

5 结论

(1)江苏岸外滨海断裂带及邻区的布格重力异常主要反映了中—新生代断陷盆地基底的隆—拗格局,重磁异常梯度带与主要断裂和构造单元边界存在良好的对应关系。

(2)综合重磁异常和天然地震等资料,推测滨海断裂带在江苏岸外 20~30 km 处大致平行于岸线延伸,南起启东外海,在废黄河口以北分为东、西两支,分别在海州湾西部和山东半岛南侧终止于

连云港—千里岩断裂。

(3)根据滨海断裂带构造位置和对两侧构造特征的分隔作用,将该断裂带分为 3 段:北段位于射阳以北,发育于南黄海中部隆起和苏鲁—千里岩隆起内部;中段位于射阳和如东之间,构成苏北盆地的东部边界;南段位于如东和启东之间,发育于勿南沙隆起内部。

(4)滨海断裂带不同分段成因机制和构造活动性存在差异,中段为继承了盆地边界控盆断裂并且长期活动的深大断裂,构造活动性较强;南段为形成时代较新的平移断裂,构造活动性最强;北段有少量地震活动,但其存在与否、位置和活动性有待通过调查进一步验证。

致谢:感谢“中国东部海域 1:100 万海洋区域地质调查成果集成与应用”和“南黄海西部 1:25 万海洋区域地质调查”等项目成员在重磁和海底地形数

据处理和融合方面做出的贡献!

参考文献

- [1] 王斌,梁雪萍,周健.江苏及其周边地区断裂活动性与地震关系的分析[J].高原地震,2008,20(1):38-43.
WANG B, LIANG X P, ZHOU J. Analysis on relationship between fault activity and earthquakes in Jiangsu Province and its adjacent areas[J]. Plateau Earthquake Research, 2008, 20(1): 38-43.
- [2] 黄耘,李清河,张元生,等.江苏及邻区地震重新定位和构造特征分析[J].地球物理学报,2008,51(1):175-185.
HUANG Y, LI Q H, ZHANG Y S, et al. Relocation of earthquakes in Jiangsu and neighboring areas, China and analysis of structural features[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(1): 175-185.
- [3] 刘建达,李清河,张元生,等.江苏中、南部及邻区地震重新定位及在断层研究中的应用[J].地球物理学进展,2009,24(1):58-66.
LIU J D, LI Q H, ZHANG Y S, et al. Hypocenter relocation in central and southern Jiangsu Province and adjacent areas, China and its application to fault research[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 58-66.
- [4] 王俊,吴晶,孙业君,等.江苏及周缘地区地震精定位与构造意义分析[J].地震地磁观测与研究,2011,32(2):6-12.
WANG J, WU J, SUN Y J, et al. Analysis on accurate location of earthquakes in Jiangsu and neighboring areas and its Tectonic meaning [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2011, 32(2): 6-12.
- [5] 李旭东,刘绍文,王丽.江苏—南黄海地区地震活动时空分布特征及其孕震构造分析[J].高校地质学报,2018,24(4):551-562.
LI X D, LIU S W, WANG L. Spatiotemporal pattern of earthquake activities and seismotectonics in Jiangsu and adjacent Southern Yellow sea area [J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(4): 551-562.
- [6] 王恩惠,张广伟,谢卓娟,等.盐城地区小震精定位及构造意义[J].地球物理学进展,2020,35(2):461-466.
WANG E H, ZHANG G W, XIE Z J, et al. Precise relocation of small earthquakes in the Yancheng area and associated tectonic implications [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(2): 461-466.
- [7] 黎明晓,邓世广,马玉川,等.2021年11月17日江苏大丰海域MS5.0地震总结[J].地震地磁观测与研究,2022,43(4):148-159.
LI M X, DENG S G, MA Y C, et al. About Dafeng sea area MS 5.0 earthquake in Jiangsu on Nov. 17, 2021[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2022, 43(4): 148-159.
- [8] 何弈成,缪发军,赵启光,等.2021年11月17日江苏大丰海域M5.0地震震源区三维P波速度结构[J].防灾减灾工程学报,2023,43(1):167-175.
HE Y C, MIAO F J, ZHAO Q G, et al. The Three-dimensional P-wave velocity structure across the source region of Dafeng Sea Area M5.0 earthquake, Jiangsu, on 17 November 2021[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1): 167-175.
- [9] 崔敏,张功成,王鹏,等.苏北—南黄海盆地NW向断层特征及形成机制[J].中国矿业大学学报,2017,46(6):1332-1339.
CUI M, ZHANG G C, WANG P, et al. Characteristics and genetic mechanism of NW faults in north Jiangsu and south Yellow Sea basin[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(6): 1332-1339.
- [10] 张训华,肖国林,吴志强,等.南黄海油气勘探若干地质问题认识和探讨——南黄海中—古生界海相油气勘探新进展与面临的挑战[M].北京:科学出版社,2017.
ZHANG X H, XIAO G L, WU Z Q, et al. Recognition and discussion of several geological problems in oil&gas exploration of the South Yellow Sea——New progress and challenges in the Mesozoic-Paleozoic marine oil&gas exploration of the South Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [11] 张训华,张志珣,蓝先洪,等.南黄海区域地质[M].北京:海洋出版社,2013.
ZHANG X H, ZHANG Z X, LAN X H, et al. Regional geology of South Yellow Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2013.
- [12] 王百顺,范代读,顾君晖,等.南黄海辐射沙洲海底地形可视化与定量分析[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(3):485-490.
WANG B S, FAN D D, GU J H, et al. Visualization and statistical analysis on the submarine topography of the radial tidal sandy ridge system in the South Yellow Sea [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(3): 485-490.
- [13] 孔祥淮,陆凯,徐晓达,等.南黄海地形地貌特征及其

- 成因探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(6): 21-31.
- KONG X H, LU K, XU X D, et al. A study on the characteristic and its cause of topography and geomorphology of the South Yellow Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2022, 42(6): 21-31.
- [14] 孔令莹, 徐远志, 赵贵章, 等. 基于多种方法联合反演的河床岩性结构特征研究[J]. 华东地质, 2023, 44(2): 150-159.
- KONG L Y, XU Y Z, ZHAO G Z, et al. Study on the structural characteristics of riverbed lithology based on the joint inversion of multiple methods[J]. East China Geology, 2023, 44(2): 150-159.
- [15] 陈安定. 苏北盆地构造特征及箕状断陷形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 140-150.
- CHEN A D. Tectonic features of the Subei basin and the forming mechanism of its dustpan-shaped fault depression[J]. Oil and Gas Geology, 2010, 31(2): 140-150.
- [16] 王超, 唐贤君, 钟荣全. 下扬子陆域东部北西向断裂特征及其形成机制[J]. 上海国土资源, 2023, 44(2): 107-112.
- WANG C, TANG X J, ZHONG R Q. Characteristics and formation mechanism of NW faults in the eastern part of the lower Yangtze continental region [J]. Shanghai Land and Resources, 2023, 44(2): 107-112.
- [17] 徐杰, 周本刚, 计凤桔, 等. 中同东部海域及其邻区现代构造应力场研究[J]. 地学前沿, 2012, 19(4): 1-7.
- XU J, ZHOU B G, JI F J, et al. The recent tectonic stress field of offshore of China mainland and adjacent areas[J]. Earth Sciences Frontiers, 2012, 19(4): 1-7.
- [18] 高战武, 侯亚森, 钟慧, 等. 中国东部海域断裂构造格架与地震活动研究[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(1): 11-18.
- GAO Z W, GOU Y S, ZHONG H, et al. Fault structure frame and seismicity in the sea on the east side of Chinese Mainland[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2021, 16(1): 11-18.
- [19] 张大莲, 张平, 李向前, 等. 江苏沿海地区小波多尺度重力场特征与构造活动性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(2): 186-191.
- ZHANG D L, ZHANG P, LI X Q, et al. Characteristics of wavelet multi-scale gravity field and analysis of tectonic activity in Jiangsu coastal area [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(2): 186-191.
- [20] 张鹏, 邢云, 孟科, 等. 苏北盆地 NE 向断裂对盐泰锡常宜铁路工程影响[J]. 华北地震科学, 2023, 41(2): 22-31, 42.
- ZHANG P, XING Y, MENG K, et al. Research on the influence of the NE trending faults in the Subei Basin on the Yan-Tai-Xi-Chang-Yi railway project [J]. North China Earthquake Sciences, 2023, 41(2): 22-31, 42.
- [21] 张硕, 张平, 龚绪龙, 等. 江苏盐城—南洋岸隐伏断裂第四纪活动性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(7): 722-727.
- ZHANG S, ZHANG P, GONG X L, et al. Research on quaternary activity of the Yancheng-Nanyang' an buried fault in Jiangsu Province[J]. Journal of Geodesy and Geodynamic, 2023, 43(7): 722-727.
- [22] 刘东鹰. 苏北—南黄海盆地的构造演化分析[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(6): 27-31.
- LIU D Y. Analysis on structural evolution of Northern Jiangsu-South Yellow Sea Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(6): 27-31.
- [23] 庞玉茂, 张训华, 肖国林, 等. 上下扬子构造演化及叠合盆地油气地质条件对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 23(3): 133-142.
- PANG Y M, ZHANG X H, XIAO G L, et al. Comparative study of tectonic evolution and petroleum geological conditions of typical superimposed basin in upper and lower Yangtze block [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2016, 23(3): 133-142.
- [24] 郝天珧, SUH M M, 刘建华, 等. 黄海深部构造与中朝—扬子块体结合带在海区位置的地球物理特征研究[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 51-61.
- HAO T Y, SUH M, LIU J H, et al. Deep structure and boundary belt position between Sino-Korean and Yangtze blocks in Yellow Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 51-61.
- [25] 侯方辉, 朱晓青, 张训华, 等. 中国东部海域地质特征及一些重要大地构造界线在海区延伸的地质地球物理证据[J]. 地学前缘, 2022, 29(2): 281-293.
- HOU F H, ZHU X Q, ZHANG X H, et al. Basic geological characteristics of the East China Sea region and geological-geophysical characterization of some important tectonic boundaries in the region [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(2): 281-293.
- [26] 练铭祥, 薛冰, 杨盛良. 苏北新生代盆地断陷和坳陷的形成机理[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 256-260.
- LIAN M X, XUE B, YANG S L. Formation mechanism of depressions and rifts in the Cenozoic Basin of North Jiangsu Province [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2001, 23(3): 256-260.
- [27] 刘玉瑞, 刘启东, 杨小兰. 苏北盆地走滑断层特征与

- 油气聚集关系[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 279-283, 293.
- LIU Y R, LIU Q D, YANG X L. Relation between features of strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in Subei basin[J]. Oil and Gas Geology, 2004, 25(3): 279-283, 293.
- [28] 马立桥, 陈汉林, 董庸, 等. 苏北—南黄海南部叠合盆地构造演化与海相油气勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(1): 35-42.
- MA L Q, CHEN H L, DONG Y, et al. Tectonic evolution of Subei-South Nanhuanghai superimposed basin from the late Mesozoic to the Cenozoic and marine petroleum potential [J]. Oil and Gas Geology, 2007, 28(1): 35-42.
- [29] 庞玉茂, 张训华, 郭兴伟, 等. 南黄海北部盆地中、新生代构造热演化史模拟研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(8): 3177-3190.
- PANG Y M, ZHANG X H, GUO X W, et al. Mesozoic and Cenozoic tectono-thermal evolution modeling in the Northern South Yellow Sea Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(8): 3177-3190.
- [30] 庞玉茂, 郭兴伟, 张训华, 等. 南黄海中部隆起印支面剥蚀量恢复与演化过程—来自 CSDP-2 井的证据[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(2): 235-245.
- PANG Y M, GUO X W, ZHANG X H, et al. Denudation of indosinian unconformity and tectonic evolution in the central uplift of South Yellow Sea Basin—Insights from CSDP-2 Well[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(2): 235-245.
- [31] 汤倩, 闫玉茹, 周欣, 等. 连云港海州湾近海碎屑沉积物矿物组成及特征分析[J]. 华东地质, 2021, 42(2): 239-245.
- TANG Q, YAN Y R, ZHOU X, et al. Mineral compositions and characteristics of the offshore clastic sediments in Haizhou Bay, Lianyungang City[J]. East China Geology, 2021, 42(2): 239-245.
- [32] 张靖怡, 张舒, 张赞赞, 等. 北淮阳东端牛王寨岩体年代学及地球化学研究: 对大别造山带早白垩世深部地质过程的制约[J]. 华东地质, 2022, 43(2): 141-153.
- ZHANG J Y, ZHANG S, ZHANG Z Z, et al. Geochronology and geochemistry of Niwangzhai pluton in east end of North Huaiyang: constraints on deep geological process of Dabie Orogen in Early Cretaceous[J]. East China Geology, 2022, 43(2): 141-153.
- [33] GU Q P, KANG Q Q, XU H G, et al. New evidence from shallow seismic surveys for Quaternary activity of the Benchah fault [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, 15(4): 1528-1541.
- [34] 顾勤平, 杨浩, 赵启光, 等. 金坛—如皋断裂北东段浅层地震勘探新证据[J]. 地震地质, 2019, 41(3): 743-758.
- GU Q P, YANG H, ZHAO Q G, et al. New evidence on SE-Segment of Jintan-Rugao fault discovered by shallow seismic exploration method [J]. Seismology and Geology, 2019, 41(3): 743-758.
- [35] 张洪涛, 张训华, 温珍河, 等. 中国东部海区及邻域地质地球物理系列图(1:1 000 000) [M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- ZHANG H T, ZHANG X H, WEN Z H, et al. Geologic-Geophysical Maps of eastern China seas and adjacent regions (1:1 000 000) [M]. Beijing: Ocean Press, 2010.
- [36] 张勇, 姚永坚, 李学杰, 等. 中生代以来东亚洋陆汇聚带多圈层动力下的中国海及邻区构造演化及资源环境效应[J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1271-1309.
- ZHANG Y, YAO Y J, LI X J, et al. Tectonic evolution and resource-environmental effect of China Seas and adjacent areas under the multisphere geodynamic system of the East Asia ocean-continent convergent belt since Mesozoic [J]. Geology in China, 2020, 47(5): 1271-1309.
- [37] 韩波. 东海地球物理场及深部地质构造研究[D]. 北京: 中国科学院, 2008.
- HAN B. Geophysical field and deep tectonic features of East China Sea[D]. Beijing: University of Chinese Academy Sciences, 2008.
- [38] MAUS S, BERKENBOSCH H, BOURNAS N, et al. EMAG2: a 2-arc min resolution earth magnetic anomaly grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2009, 10: Q08005.
- [39] SANDWELL D T, MULLER R D, SMITH W H F, et al. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure[J]. Science, 2014, 346(6205): 65-67.
- [40] ALKEN P, THEBAULT E, BEGGAN C D, et al. International geomagnetic reference field: the thirteenth generation[J]. Earth Planets Space, 2021, 73: 49.
- [41] 张明华. 重磁电数据处理解释软件 RGIS[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- ZHANG M H. Gravity, magnetic and electric data processing and interpretation software RGIS[M]. Beijing: Geological Press, 2011.
- [42] 董焕成. 重磁勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- DONG H C. Tutorial on gravity and magnetic exploration[M]. Beijing: Geological Press, 1993.

- [43] 王万银. 位场总水平导数极值位置空间变化规律研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(9): 2257-2270.
WANG W Y. Spatial variation law of the extreme value positions of total horizontal derivative for potential field data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(9): 2257-2270.
- [44] 王万银. 位场解析信号振幅极值位置空间变化规律研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1288-1299.
WANG W Y. Spatial variation law of the extreme value position of analytical signal amplitude for potential field data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(4): 1288-1299.
- [45] 朱孟浩, 闵伟, 刘金瑞, 等. 苏北—滨海断裂北段最新活动时代研究[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(1): 29-38.
ZHU M H, MIN W, LIU J R, et al. Characteristics and activity of the northern segment of the Littoral Fault Zone at Northern Jiangsu Region [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2021, 16(1): 29-38.
- [46] 漆家福. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 15-22.
QI J F. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai basin and their genetic interpretation [J]. Geology in China, 2004, 31(1): 15-22.
- [47] 温燕林, 于海英, 陈飞, 等. 面波反演苏北—南黄海盆地地壳三维 S 波速度结构[J]. 地震工程学报, 2023, 45(1): 130-137.
WEN Y L, YU H Y, CHEN F, et al. Three-dimensional shear wave velocity structure of the Northern Jiangsu-South Yellow Sea Basin from Rayleigh wave tomography [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(1): 130-137.

Structural characteristics of the Binhai Fault Zone in Jiangsu offshore —implications from gravity and magnetic data

SHANG Luning¹, PAN Jun¹, CAO Rui², ZHOU Qingchun³, KONG Xianghuai¹

(1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, Shandong, China;

2. Qingdao Geo-Engineering Surveying Institute, Qingdao 266101, Shandong, China;

3. China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing, 100029, China)

Abstract: The Binhai Fault Zone in Jiangsu offshore is a prominent active fault zone in the western south Yellow Sea, which has undertaken multiple destructive $M \geq 5.0$ earthquakes. The local harsh offshore geographical and hydrodynamic conditions limit the marine geological and geophysical surveys, leading to ongoing controversies over its extension, fault-plane structure, kinematics and dynamic properties. Based on qualitative and quantitative analysis of gravity and magnetic data, this study focused on the structural characteristics of the Binhai Fault Zone and adjacent areas, traced the possible location and extension of the fault zone and explored the structural characteristics and kinematics in its different segments. The results show that the Binhai Fault Zone lies about 20~30 km offshore the Jiangsu Province and extends sub-parallel to the coastline. It bifurcates into two branches in the north area to the abandoned Yellow River estuary. The fault zone is roughly divided into three segments by the offshore boundaries of Sheyang city and Rudong city. Its middle segment standing as the eastern boundary of the Subei(North Jiangsu) Basin has deep-rooted faults with long-term inherited activities, the southern segment has younger and the most active strike-slip faults, while the existence and activity of the northern segment need to be further investigated and verified.

Key words: Binhai Fault Zone in Jiangsu offshore; gravity and magnetic anomalies; basin structure; earthquake; marine regional geological survey