

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017111701

# 辽东湾地区重、磁异常特征及其区域构造分析

张菲菲<sup>1,2</sup>, 孟祥君<sup>1,2</sup>, 韩波<sup>1,2</sup>, 田振兴<sup>1,2</sup>

1. 自然资源部油气资源和环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

**摘要:**辽东湾地区是沿郯庐断裂系发展的新生代裂谷盆地,其断裂展布、基底性质对区域构造研究具有重要意义。充分利用我国海洋区域地质调查项目获取的辽东湾地区最新船载重、磁数据,详细描述了重、磁异常特征及对比分析特征。在此基础上,结合前人对区域构造及岩石物性的研究成果,对区域构造进行了分析和解释,指出了辽东湾拗陷“东西分带”的构造格局及不同时期区域构造的差异,对研究区内主要断裂展布、岩浆岩分布进行了划分,探讨了辽东湾及其周缘海域新太古宙古陆壳基底的分布。

**关键词:**重、磁异常;区域构造;辽东湾

**中图分类号:**P736.1 **文献标识码:**A

## Gravity-magnetic anomalies of Liaodong Bay and their tectonic implications

ZHANG Feifei<sup>1,2</sup>, MENG Xiangjun<sup>1,2</sup>, HAN Bo<sup>1,2</sup>, TIAN Zhenxing<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

**Abstract:** Liaodong Bay is a Cenozoic rift basin in the Bohai Sea developed along the Tanlu fault. The distribution of fault system and the characters of basement have played critical roles in the performance of regional tectonics. This paper is devoted to the gravity and magnetic anomalies in Liaodong Bay based on previous tectonic researches, petrophysical properties and the newly acquired gravity and magnetic data from the various basic marine geological survey programs in China. There we made detailed description and comparative analysis of gravity and magnetic anomalies. In addition, regional tectonics of the study area are analyzed and interpreted. It is clearly noticed that the tectonic pattern of “east-west zonation” in Liaodong Bay Depression the difference of regional tectonic patterns vary with time from place to place. Together with the changes in distribution of main faults and magmatic rocks, the distribution of the new Archean crust basement in Liaodong Bay and its adjacent seas are also discussed.

**Key words:** gravity and magnetic anomalies; regional structure; Liaodong Bay

辽东湾位于渤海湾盆地的北部,是下辽河拗陷向海上的延伸部分,面积约为 26000km<sup>2</sup>,是渤海湾盆地油气最为富集的地区之一。辽东湾地区古近系和新近系沉积厚度与沉降幅度巨大,油气资源丰富,圈闭类型多样。近年来,由于渤海湾盆地海域油气勘探取得重大突破,辽东湾地区的油气勘探工作也得到了极大的重视和深入研究,利用大量的地震勘探以及钻井资料,前人对研究区内走滑断裂构

造<sup>[1-6]</sup>、潜山构造<sup>[7-9]</sup>、油气成藏<sup>[10,11]</sup>、层序地层学<sup>[12-14]</sup>等进行了大量的研究,认为大量油气断陷盆地形成与深部结构的特征息息相关。但是,在最近的研究中,大量成果集中在新生代,对深部构造研究主要集中在渤海湾地壳结构<sup>[15,16]</sup>、郯庐断裂带<sup>[17-19]</sup>、残留盆地<sup>[20]</sup>等,研究采用的重、磁数据比例尺多为 1:100 万、1:200 万,数据采集形式多为航磁及卫星,重、磁异常多为区域重、磁异常,比例尺较

**资助项目:**中国地质调查局地质调查项目“1:25 万锦西幅、营口幅海洋区域地质调查项目”(GZH201400205);青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2015ASKJ03)

**作者简介:**张菲菲(1983—),女,助理研究员,主要从事海洋重磁数据处理、解释工作,E-mail:ffeizhang@126.com

**通讯作者:**孟祥君(1975—),男,教授级高级工程师,主要从事海洋地球物理调查与研究工作,E-mail:sdqumxj@126.com

**收稿日期:**2017-11-17;**改回日期:**2018-06-04. 周立君编辑

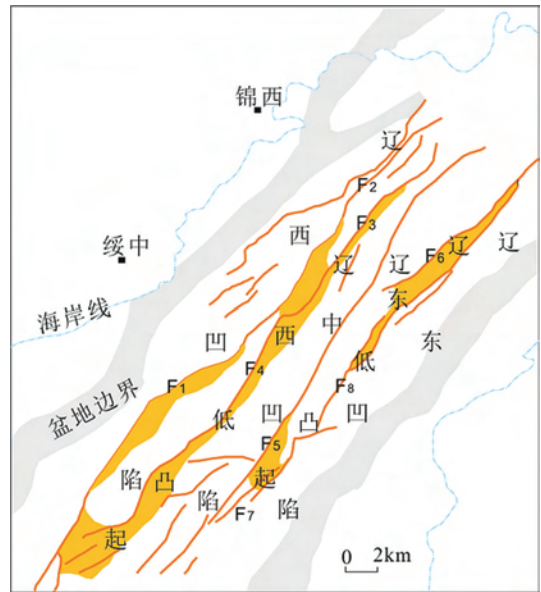
小、精度相对较低,对局部构造研究较少。

从 1999 年起,我国在辽东湾地区先后开展了 1:100 万,1:25 万区域地质调查工作,进行了大量船载重力、磁力测量工作,系统性获得了高质量原始重、磁数据。本文主要是针对辽东湾地区,以最新的 1:25 万船载重、磁数据为依据,通过重、磁异常的对应分析,结合前人研究及区域构造特征,对研究区内的深大断裂、岩浆岩及古陆壳基底等进行了划分与探讨。

## 1 区域背景

辽东拗陷是辽东湾地区的主要构造单元,是沿着郯庐断裂系发展的新生代大陆裂谷断陷,整体呈 NE 走向,受郯庐断裂带影响,由几条 NE—NNE 向正断层组成的复式地堑型拗陷构成,具有“三凹两凸”的构造特点,自西向东为辽西凹陷、辽西低凸起、辽中凹陷、辽东低凸起和辽东凹陷(图 1),其中低凸起和凹陷多以陡倾断裂为边界。前期研究关于辽东湾拗陷构造演化主要有两种观点:多数研究者认为经历了古近纪裂陷和新近纪拗陷两个演化阶段,其中盆地在古近纪裂陷期具有多旋回断陷幕的裂谷盆地发育特点<sup>[21-23]</sup>;另有一些研究者认为其并非典型的两阶段伸展模式,中国东部新生代不同类型盆地具有统一的成因联系,深部动力过程制约浅部构造变形<sup>[24-28]</sup>。两种观点统一的是渤海海域在盆地演化过程中发生了多期构造变动,研究区内断裂体系新生代活动特征显著,但始终受基底 NE 向断裂的控制。

辽东湾拗陷新生代地层发育较齐全,自下而上依次为古近系孔店组、沙河街组、东营组和新近系馆陶组、明化镇组及第四系平原组;基底主要包括太古宇和中、新元古界的变质岩及花岗岩、古生界碳酸盐岩和中生界碎屑岩及火成岩,在不同地区基底的年代和岩性不同(图 2)。辽东湾沿岸地区出露地层比较齐全,根据统计辽东湾地区岩石密度为 $(2.54 \sim 2.86) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ <sup>[29]</sup>,其中变质岩密度最高,致密沉积岩、中基性岩浆岩密度次之,疏松沉积岩密度偏低,早古生界、太古界—元古界表现为高密度层,侏罗系—晚古生界表现为低密度层;区域岩石磁化率为 $(16 \sim 1016) \times 10^{-5} \text{ SI}$ <sup>[29]</sup>,其中中生界火成岩具有较高磁性,新太古界变质岩普遍磁性较高,区域岩石物性差异为我们进行构造研究、岩浆岩圈定以及古老基底推断解释提供了基础物性资料。



F<sub>1</sub>.辽西 1 号断层, F<sub>2</sub>.辽西 2 号断层, F<sub>3</sub>.辽西 3 号断层, F<sub>4</sub>.旅大 4 号断层, F<sub>5</sub>.辽中 1 号断层, F<sub>6</sub>.辽中 2 号断层, F<sub>7</sub>.辽东 1 号断层, F<sub>8</sub>.辽东 2 号断层

图 1 辽东湾拗陷构造单元平面分布图(据文献[7]修改)

Fig.1 Tectonic map of the Liaodong Bay Depression (modified from reference[7])

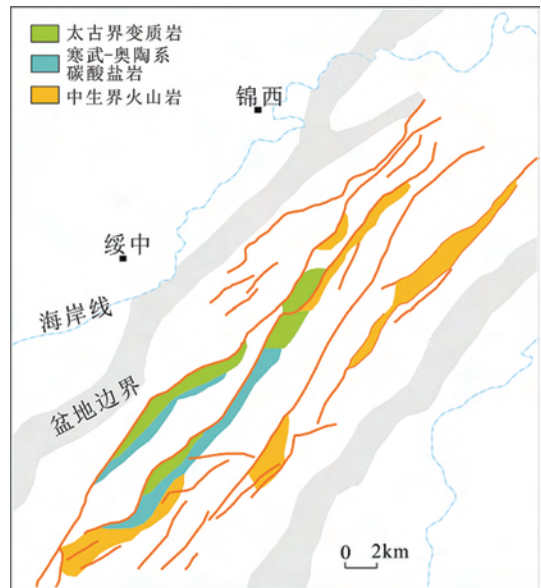


图 2 辽东湾基底地层分布图(据文献[7]修改)

Fig.2 Distribution map of basement rock in Liaodong Bay (modified from reference [7])

## 2 重、磁异常特征

### 2.1 重力异常特征

在海域,自由空间重力异常反映海水深度及地

下密度体的变化情况, Bremaecker 指出<sup>[30]</sup>, 当海洋重力测量在海面进行时, 海洋的自由空间校正非常接近于零, 一般直接采用自由空间重力异常来研究地质构造。布格校正不同于陆地的改正方法, 采用平板校正, 其等效于用同等体积的岩石代替海水进行布格校正。由于海洋区域接近于均衡平衡, 加入大量的岩石完全破坏了均衡, 结果导致了与海底地形呈强烈反相关的布格重力异常, 对于地质体引起的局部重力特征没有明显加强。因此, 本文基于自由空间重力异常来进行分析和研究。

总体看来, 研究区内自由空间重力异常(图3)整体呈 NE 向展布, 表现为高、低异常带相间变化, 异常带之间为 NE 向重力异常梯级带。研究区内重力异常变化比较宽缓, 自西往东分为 3 个部分: 西部重力高异常区、中部相对重力低异常区、东部重力高异常区。

#### (1) 西部重力高异常区

该异常区位于研究区西侧, 毗邻大陆边缘, NE 向展布, 有 3 个串珠状局部高异常区圈闭, 其中中部跟北部的重力高异常圈闭均向陆地一侧延伸, 异常区东侧为 NE 向异常梯级带。

#### (2) 中部相对重力低异常区

该异常区为研究区内的主体异常区, NE 向展布, 呈低—高一低—高异常带相间变化, 可细分为 2 个低重力异常带、2 个高重力异常带, 2 个低重力异常带在研究区北部连接, 延伸出研究区, 全区最低重力异常圈闭位于东侧的低重力异常带。

#### (3) 东部重力高异常区

该异常区位于研究区东侧, 异常结构比较简单, NE 向展布, 西侧为宽缓的异常梯级带, 东侧为重力高异常圈闭。

## 2.2 磁力异常特征

在中、低纬度地区, 由于受斜磁化的影响, 使得磁异常主体与磁性体位置在垂向上有一定偏移, 这对正确认识磁性体的位置造成了很大困难。为了使磁性体的平面位置与磁异常的极值位置垂向对应, 通常是将其换算为垂直磁化的垂直磁异常(简称化极), 本文采用化极磁力异常作为基础研究数据, 并采用多次迭代滑动平均法对磁力异常进行了位场分离, 计算得到研究区内剩余化极磁力异常。

研究区内化极磁力异常(图4)分为两个部分, 西部以低磁异常为主, 东部为大面积的高磁异常, 高、低磁异常区之间为 NEE 向磁力异常梯级带。

(1) 西部低磁异常区整体变化比较平缓, NE 向展布, 发育 3 个低异常圈闭, 负异常值范围大致为  $-200 \sim 0 \text{ nT}$ , 局部达到  $-400 \text{ nT}$ 。该异常区局部发育高磁异常圈闭, 呈 NE 向串珠状展布, 异常极值可达到  $450 \text{ nT}$ 。

(2) 东部高磁异常区整体 NE 走向, 南部为大面积的正异常区, 北部表现为正、负相间变化。南部异常幅值相对高, 为  $0 \sim 200 \text{ nT}$ , 异常多为 NE 向展布, 局部有近 EW 向、NW 向异常; 北部异常变化宽缓, 异常幅值正负相间, 异常值范围大致为  $-100 \sim 50 \text{ nT}$ , 异常特征变化简单, 向北延伸至陆区, 异常特征连续。

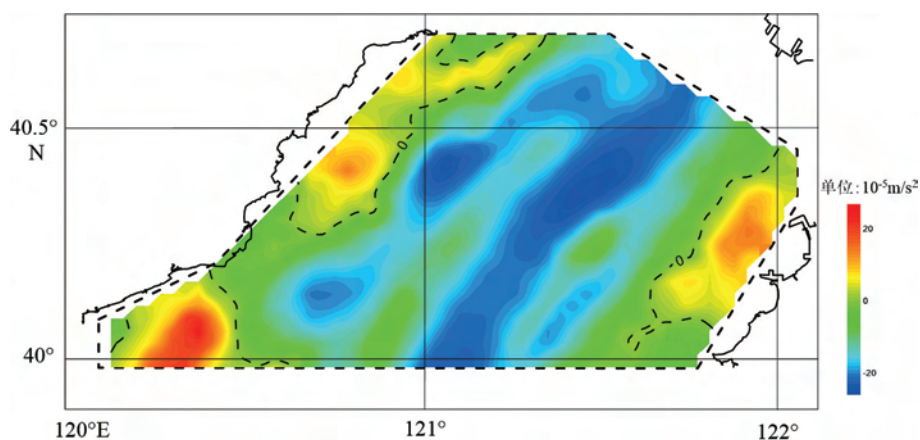


图3 自由空间重力异常图

Fig.3 The map of free air gravity anomaly

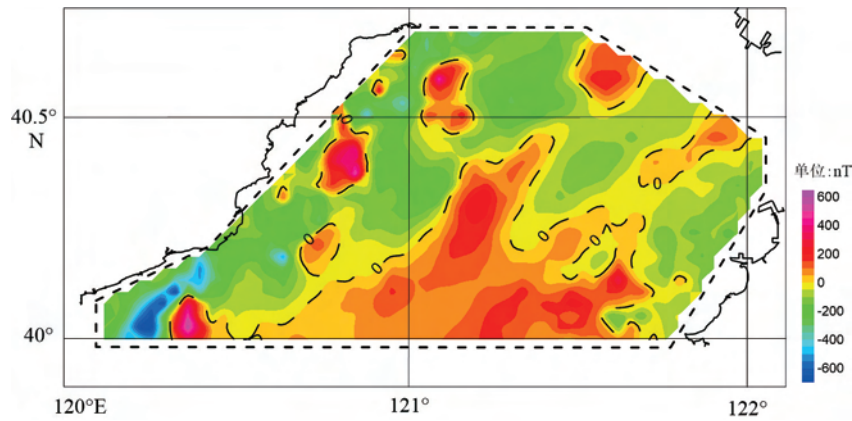


图 4 化极磁力异常图

Fig.4 The map of magnetic anomaly reduced to the pole

### 2.3 重、磁异常对应分析

根据对重、磁异常特征的描述,我们可以看出,整个研究区内异常特征以 NE 向为主,局部发育 NW 向、近 EW 向异常,但异常分区特征又有所区别。为了更直观地反映重、磁异常的相关程度,我们对重、磁异常进行了对应分析。

重、磁异常对应分析<sup>[31-34]</sup>是根据泊松理论把同源的重、磁异常有机地联系在一起,通过计算重、磁异常的相关系数  $R$ ,客观地反映重、磁异常源的地质属性。本次研究运用该方法进行了重、磁对应分析处理,先计算化极磁力异常和重力垂向一阶导数,然后对其进行对应分析处理,得到重、磁异常对应分析结果(图 5)。根据此次计算方法,当相关系数  $R > 0$ ,两者为正相关区域,相关系数  $R < 0$ ,则两者为负相关区域,当  $R < -0.2$  时,认为重、磁异常反映的场源不同。

分析结果显示:在辽西凹陷、辽中凹陷北部、辽东凹陷的沉积中心表现为正相关,推测这些区域为各凹陷构造的沉积中心,沉积层较厚,为重力低、磁力低;研究区西部存在串珠状正相关区,与化极磁力异常图(图 4)对比,推测这些区域为岩浆岩分布区,为重力高、磁力高。研究区内负相关区域主要分布在研究区两侧和中部,呈条带状分布,其中东西两侧为重力高、磁力低,中部为重力低、磁力高。

由于重、磁异常客观反映了不同时期、不同深度地质体的地质属性,通过重、磁异常的对应分析,可以分析研究区不同时期的区域构造特征及构造演化特征。基于前人研究的基础,我们初步推断,辽东湾坳陷沉积层比较厚,密度低,在重力异常上表现为大面积的重力低异常,重力异常的高、低相间更多反映的是中、新生代构造的凸起和凹陷的变化。根据区域岩石磁性分析,沉积岩几乎没有磁性,磁性高的中生代火山岩跟新太古界变质岩则成为研究区内的优

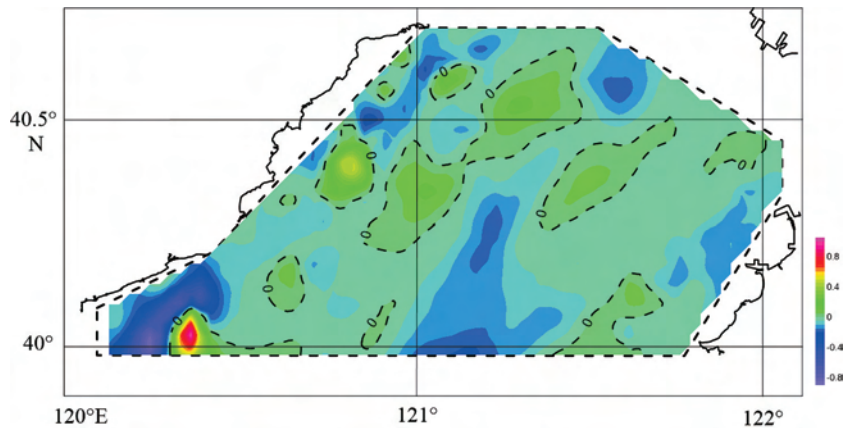


图 5 重、磁对应分析结果

Fig. 5 Result of correspondence analysis of gravity and magnetic anomalies

势磁力异常,因此研究区内大面积的磁力高反映了古老的基底构造范围,局部磁力高异常圈闭则反映中生代火山岩的分布。

### 3 区域构造分析

#### 3.1 断裂构造体系

利用重力资料划分断裂是研究区域构造特征的手段之一,重力资料可以直观反映断裂构造的展布情况,而重力异常是地下地质体重力作用叠加的综合反映,局部异常场的提取能够对构造进行更好的解释<sup>[35-37]</sup>。为了更好地突出断裂的线性构造,使其位置更容易确定,本文采用归一化总水平导数技术计算得到自由空间重力异常归一化总水平导数垂向导数(NVDR\_THDR)<sup>[38]</sup>,采用多次迭代滑动平均法计算得到研究区内剩余重力异常,为构造分区、断裂划分提供更直接的信息。本次我们主要利用

NVDR\_THDR 处理结果及其剩余重力异常,推断了研究区内断裂构造,共划分主要构造断裂 10 条(图 6)。

#### (1) F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub> 断裂

研究区内 F<sub>1</sub> 和 F<sub>2</sub> 断裂为整个辽东拗陷的边界断裂,NE 走向,断裂位于重力异常梯级带上,断裂两侧异常重力异常特征各异。F<sub>1</sub> 与前人划分的辽西 2 号断裂位置一致,F<sub>2</sub> 与前人划分的辽东断裂位置一致。在自由空间重力异常图(图 3)上,重力异常整体表现为中间低两边高的形态,不同特征重力异常之间为宽缓的异常梯级带,F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub> 断裂位于梯级带的中心位置,断裂走向与梯级带走向一致,表明 F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub> 断裂应该是研究区内两条控制构造演化的深大断裂,根据其走向及其位置,推断其为郯庐断裂在辽东湾地区的延伸。

#### (2) F<sub>3</sub>、F<sub>4</sub>、F<sub>5</sub>、F<sub>6</sub> 断裂

这几条断裂是辽东拗陷内次一级构造的边界构造,分别是辽西凸起、辽东凸起的边界,NE走向,在

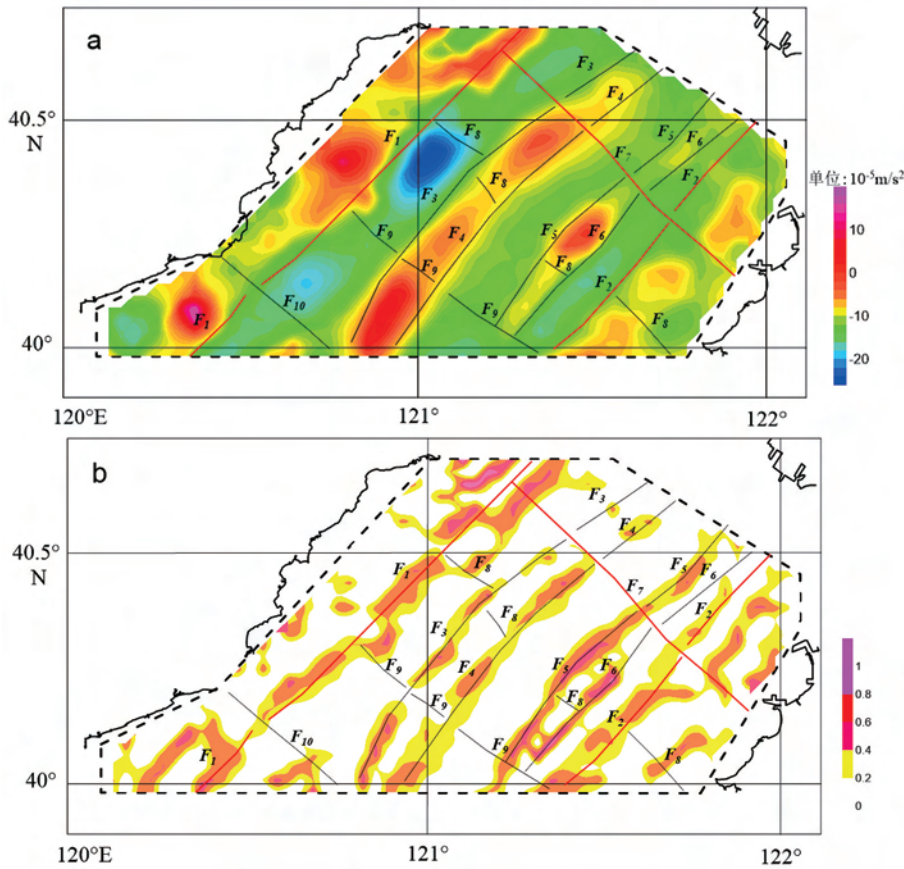


图 6 辽东湾地区断裂分布图

a. 剩余重力异常图, b. 自由空间重力异常 NVDR\_THDR 图

Fig.6 Distribution map of faults in Liaodong Bay

a. residual gravity anomaly, b. NVDR\_THDR gravity anomaly

剩余重力异常图上位于异常梯级带上,在 NVDR\_THDR 图上线性特征明显。该组断裂在化极磁力异常图上特征不明显,推断该组断裂与新生代构造密切相关。

(3)  $F_7$ 、 $F_8$ 、 $F_9$ 、 $F_{10}$  断裂

该组断裂呈 NW 向展布,与 NE 向主干断裂相互交错、互相切割。在剩余重力异常图上,该组断裂多表现为异常的错断或局部异常的不连续,控制了凹陷区内沉积中心的发育。辽东湾地区位于郯庐断裂带范围内,受 NE 向深大构造的影响,NW 向断裂在重力异常图上线性特征不明显。

在化极磁力异常图(图 4)上,研究区北端有明显的异常错断,其位置与断裂  $F_7$  一致。断裂两侧区域磁力异常特征各异,南侧为大面积的磁力高区,是新太古界古陆壳基底的表现,而北侧为高、低相间异常条带,与重力异常特征一致。推测  $F_7$  断裂应该为形成年代较早的断裂。

3.2 岩浆岩分布

从剩余化极磁力异常(图 7)可以看出,辽东湾地区广泛发育局部磁力高异常,磁异常值大致为 0~200nT,局部高达 500nT。根据前人研究得出,该区高磁异常圈闭多与中生代岩浆岩分布有关,主要分布在 NE 向郯庐断裂带两侧。

(1) 西部岩浆岩分布带,该岩浆岩带位于研究区西部, $F_1$  断裂西侧,沿断裂呈 NE 向串珠状分布,分布范围比较广,磁异常值范围多为 0~400nT,局部高达 500nT,磁性较强。该异常带在重磁异常上表现为磁力高、重力高,根据孟祥君<sup>[29]</sup>对辽东湾西岸岩石样本磁化率分析,该区岩浆岩多为安山岩、花岗岩、火山角砾岩等中基性火山岩类,平均磁化率接近  $1000 \times 10^{-5}$  SI,平均密度  $2.6 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>。据该区 BH13 钻孔资料<sup>[39]</sup>,该区磁异常对应中生代白垩纪岩浆岩。

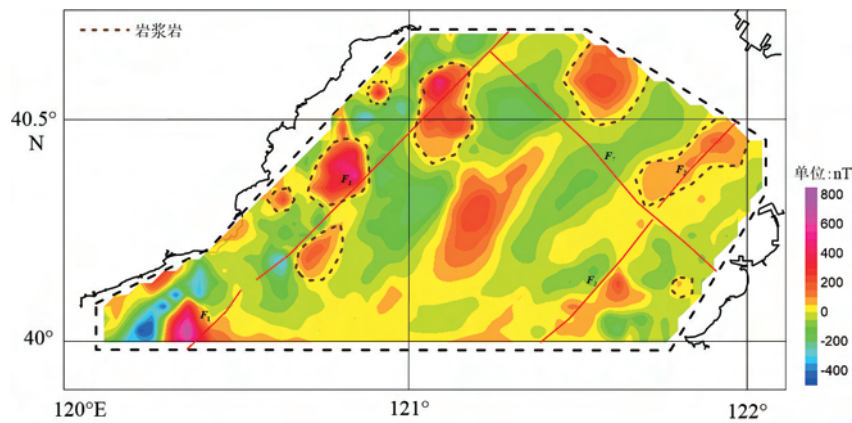


图 7 岩浆岩分布图(底图为剩余化极磁力异常图)

Fig.7 Distribution map of magmatic rock (take residual magnetic anomaly map reduced to the pole as base map)

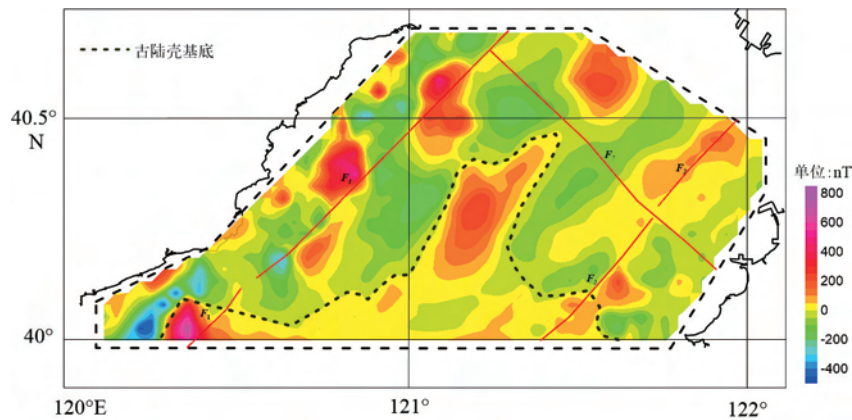


图 8 新太古界古陆壳基底分布图(底图为剩余化极磁力异常图)

Fig.8 Distribution map of Archean crust basement (take residual magnetic anomaly map reduced to the pole as base map)

(2) 东部岩浆岩分布带,该岩浆带大致分布于研究区东部,沿 $F_2$ 断裂两侧发育,北部高磁异常分布范围广,异常值范围多为 $0\sim 150\text{nT}$ 。根据孟祥君<sup>[29]</sup>对辽东湾东岸岩石样本磁化率分析,该区强磁性主要是由花岗岩引起,平均磁化率值为 $540\times 10^{-5}\text{SI}$ ,分布在北部地区;据该区BH1、BH3钻孔资料<sup>[39]</sup>,该区磁异常对应早白垩世中性岩浆岩。

### 3.3 新太古界古陆壳基底分布

根据辽东湾沿岸岩性统计<sup>[29]</sup>,辽东湾沿岸出露结晶变质岩基底,研究区内辽东凸起上也分布有太古界<sup>[8]</sup>,其中新、中元古界的变质岩基本无磁性,而新太古界岩石以火山岩和片麻岩为主,普遍具有磁性,且天然剩余磁性明显。根据岩石磁性差异,我们可以利用磁异常来推断新太古界古陆壳的分布范围。

从剩余化极磁力异常图(图8)上可以看出,在辽东湾中南部地区发育大面积的磁力高异常区,异常特征明显,异常幅值大致为 $0\sim 200\text{nT}$ ,在区域磁力异常图上,该区亦表现为独立的大面积高磁异常,近SN向展布且向南继续延伸,向北截止到 $NW$ 向 $F_7$ 断裂带。结合前人研究及该区岩石磁性特点,该高磁异常区很有可能是由该处的太古界古陆壳引起的,且分布范围较广。由于研究区有限,并未给出该磁力高异常往南的延伸情况,推测在渤海湾地区应该存在新太古界古陆壳基底且广泛分布。辽东湾太古界古陆壳的划分可以为渤海湾地区的构造演化提供重要的地球物理资料,对华北古陆在海区的延伸以及中国古大陆的发展演化也有一定的参考意义。

## 4 结论

(1) 利用最新的1:25万船载重、磁数据资料,通过对重、磁异常特征的描述及对应分析,辽东湾地区重、磁异常分区特征存在差异,其原因主要是重、磁异常客观反映不同时期、不同深度地质体的地质属性,重力异常主要体现中、新生代构造活动,而磁力异常更多反映的是新太古界基底跟中生代岩浆岩的分布。

(2) 受郯庐断裂带的影响,研究区内以NE向构造为主,整体表现为“东西分带”,其中 $F_1$ 、 $F_2$ 断裂为反映该构造异常的重要深大断裂,推测应该为郯庐断裂带在辽东湾地区的延伸;区内岩浆岩也主要分布在该断裂构造带两侧,以中生代岩浆岩为主;辽东湾地区有大面积高磁异常区,与该区新太古界古

陆壳分布密切相关,根据异常走向,推断该基底向南继续延伸,在整个渤海湾地区都有广泛分布。

### 参考文献 (References)

- [1] 徐长贵,任健,吴智平,等.辽东湾拗陷东部地区新生代断裂体系与构造演化[J].高校地质学报,2015,21(2):215-222.[XU Changgui, REN Jian, WU Zhiping, et al. Cenozoic fault system and tectonic evolution of the Eastern Liaodong Bay Depression[J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(2): 215-222.]
- [2] 吴智平,张婧,任健,等.辽东湾拗陷东部地区走滑双重构造的发育特征及其石油地质意义[J].地质学报,2016(5):848-856.[WU Zhiping, ZHANG Jing, REN Jian, et al. Development characteristic of strike-slip duplex in the eastern part of Liaodong Bay Depression and its petroleum geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2016(5): 848-856.]
- [3] 柳永军,徐长贵,吴奎,等.辽东湾拗陷走滑断裂差异性与大中型油气藏的形成[J].石油实验地质,2015,37(5):555-560.[LIU Yongjun, XU Changgui, WU Kui, et al. Different characteristics of strike-slip faults and the formation of large and medium-scaled oil and gas fields in the Liaodong Bay depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 555-560.]
- [4] 范军侠,李宏伟,朱筱敏,等.辽东湾北部地区走滑构造特征与油气富集规律[J].古地理学报,2006,8(3):415-418.[FAN Junxia, LI Hongwei, ZHU Xiaomin, et al. Characteristics of strike-slip structure and rules of hydrocarbon accumulation in northern Liaodong Bay[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 415-418.]
- [5] 李明刚,漆家福,童亨茂,等.辽河西部凹陷新生代断裂构造特征与油气成藏[J].石油勘探与开发,2010,37(3):281-288.[LI Minggang, QI Jiafu, TONG Hengmao, et al. Cenozoic fault structure and hydrocarbon accumulation in Western Sag, Liaohe Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 281-288.]
- [6] 李三忠,索艳辉,郭玲莉,等.渤海湾盆地大歧口凹陷变换构造与板内变形差异[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37(4):98-109.[LI Sanzhong, SUO Yanhui, GUO Lingli, et al. Transfer zones and differences in intra-plate deformation in Great Qikou Sag of the Bohai Bay Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(4): 98-109.]
- [7] 吕丁友,杨明慧,周心怀,等.辽东湾拗陷辽西低凸起潜山构造特征与油气聚集[J].石油与天然气地质,2009,30(4):490-496.[LU Dingyou, YANG Minghui, ZHOU Xinhui, et al. Structural characteristics and hydrocarbon accumulation in the buried hills of the Liaoxi low salient the Liaodong Bay depression[J]. Oil & Gas geology, 2009, 30(4): 490-496.]
- [8] 黄晓波,徐长贵,王丽君,等.辽东凸起潜山油气成藏条件及模式[J].特种油气藏,2013,20(5):73-76.[HUANG Xiaobo, XU Changgui, WANG Lijun, et al. Buried-hill reservoir forming conditions and models in the Liaodong uplift[J]. Special Oil and

- Gas Reservoirs, 2013, 20(5): 73-76.]
- [9] 邓吉峰, 史浩, 王保全, 等. 渤中凹陷古生界碳酸盐岩潜山气藏储层特征及主控因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(4): 15-20. [DENG Jifeng, SHI Hao, WANG Baoquan, et al. Characteristics and main controlling factors of Paleozoic carbonate buried-hill gas reservoirs in Bozhong Sag[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(4): 15-20.]
- [10] 蒋恕, 蔡东升, 朱光辉, 等. 辽东湾盆地辽中凹陷隐蔽油气藏成藏模拟[J]. 石油实验地质, 2007, 29(5): 506-511. [JIANG Shu, CAI Dongsheng, ZHU Guanghui, et al. The subtle reservoir forming modeling in the Liaozhong Sag, the Liaodong Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(5): 506-511.]
- [11] 徐长贵, 朱秀香, 史翠娥, 等. 辽东湾拗陷古近系东营组泥岩对油气藏分布的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 431-437. [XU Changgui, ZHU Xiuxiang, SHI Cuie, et al. Control of the Dongying formation mudstone upon the distribution of hydrocarbon accumulations in the Liaodong Bay Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 431-437.]
- [12] 朱筱敏, 董艳蕾, 杨俊生, 等. 辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(增刊 D): 1-10. [ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, YANG Junsheng, et al. Sequence framework and sediment system of Eogene in Liaodong Bay area[J]. Science in China (Series D), 2008, 38(SD): 1-10.]
- [13] 徐长贵, 许效松, 邱东湖, 等. 辽东湾地区辽西凹陷中南部古近系构造格架与层序地层格架及古地理分析[J]. 古地理学报, 2005, 7(4): 449-459. [XU Changgui, XU Xiaosong, QIU Dongzhou, et al. Structural and sequence stratigraphic frameworks and palaeogeography of the paleogene in central-southern Liaoxi Sag, Liaodongwan Bay area[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(4): 449-459.]
- [14] 李德江, 朱筱敏, 董艳蕾, 等. 辽东湾拗陷古近系沙河街组层序地层分析[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(6): 669-676. [LI Dejiang, ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, et al. Sequence stratigraphy and depositional system of Paleogene Shahejie Formation in Liaodong Bay Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(6): 669-676.]
- [15] 滕吉文, 张中杰, 张秉铭, 等. 渤海地球物理场与深部潜在地幔热柱的异常构造北京[J]. 地球物理学报, 1997, 40(4): 468-480. [TENG Jiwen, ZHANG Zhongjie, ZHANG Bingming, et al. Geophysical fields and background of exceptional structure for deep latent mantle plume in Bohai Sea[J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(4): 468-480.]
- [16] 徐亚, 郝天珧, 黄松, 等. 渤海湾地区壳幔结构重磁综合研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3344-3351. [XU Ya, HAO Tianyao, HUANG Song, et al. Crustal and mantle structure of the Bohai bay area based on the gravity and magnetic data[J]. Chinese J. Geophys., 2011, 54(12): 3344-3351.]
- [17] 胥颐, 汪晟, 孟晓春. 渤海海域郯庐断裂带的地震层析成像特征[J]. 科学通报, 2016, 61(8): 891-900. [XU Yi, WANG Sheng, MENG Xiaochun. Tomographic evidence of the Tan-Lu fault zone in the Bohai Sea of eastern China [J]. Chin Sci. Bull., 2016, 61(8): 891-900.]
- [18] 宋国奇. 郯庐断裂带渤海段的深部构造与动力学意义[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2007, 30(6): 663-667. [SONG Guoqi. Deep structures of the Bohai part of the Tan-Lu fault zone and their dynamic implications[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2007, 30(6): 663-667.]
- [19] 汤良杰, 陈绪云, 周心怀, 等. 渤海海域郯庐断裂带构造解析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(1): 170-176. [TANG Liangjie, CHEN Yuyun, ZHOU Xinhui, et al. Structural analysis of Tan-Lu fault zone in the Bohai Sea[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(1): 170-176.]
- [20] 徐亚, 郝天珧, 戴明刚, 等. 渤海残留盆地分布综合地球物理研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 868-881. [XU Ya, HAO Tianyao, DAI Minggang, et al. Integrated geophysics research on distribution of residual basins of Bohai Sea[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2007, 50(3): 868-881.]
- [21] 侯贵廷, 钱翔麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(6): 845-851. [HOU Guiting, QIAN Xianglin, CAI Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai in mesozoic and cenozoic time[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Ekinensis, 2001, 37(6): 845-851.]
- [22] Allen M B, Macdonald D I M, Zhao X et al. Sequence stratigraphic framework and distribution of depositional system for the Paleogene in Liaodong Bay area[J]. Science in China (Series D), 1997, 51(suppl.2): 1-10.
- [23] 汤良杰, 万桂梅, 周心怀, 等. 渤海盆地新生代构造演化特征[J]. 高校地质学报, 2008, 14(2): 191-198. [TANG Liangjie, WAN Guimei, ZHOU Xinhui et al. Cenozoic geotectonic evolution of the Bohai Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(2): 191-198.]
- [24] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 64-89. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, DAI Liming, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 64-89.]
- [25] LI Sanzhong, ZHAO Guochun, Dai Liming, et al. Cenozoic faulting of the Bohai Bay Basin and its bearing on the destruction of the eastern North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012a, 47: 80-93.
- [26] LI Sanzhong, ZHAO Guochun, Dai Liming, et al. Mesozoic basins in eastern China and their bearing on the deconstruction of the North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012b, 47: 64-79.
- [27] 贾楠, 刘池洋, 张功成, 等. 辽东湾拗陷新生代构造改造作用及演化[J]. 地质科学, 2015, 50(2): 377-390. [JIA Nan, LIU Chiyang, ZHANG Gongcheng, et al. Cenozoic multiple faulting and tectonic evolution in the Liaodong Bay depression[J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(2): 377-390.]
- [28] 赵维娜, 张训华, 孟祥君, 等. 辽东湾地区地球物理场与岩石层特征[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(5): 8-12. [ZHAO Weina, ZHANG Xunhua, MENG Xiangjun, et al. Geophysical field



- and lithosphere of the Liaodong Bay [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(5): 8-12.]
- [29] 孟祥君, 刘展, 张松, 等. 辽东湾沿岸岩石物性特征[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(5): 1-7. [MENG Xiangjun, LIU Zhan, ZHANG Song, et al. Petrophysical properties of rocks surrounding the Liaodong Bay [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(5): 1-7.]
- [30] Bremaecker, Jean-Claude De. *Geophysics: The Earth's Interior* [M]. 1985.
- [31] 刘沈衡. 重磁异常对应分析应用及评述[J]. *地质找矿论丛*, 1992, 7(3): 97-105. [LIU Shenheng. Application of correspondence analysis to interpretation of gravity and magnetic anomaly in Zalong area, Songliao basin [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 1992, 7(3): 97-105.]
- [32] 曾昭发, 吴燕冈, 郝立波, 等. 基于泊松定理的重磁异常分析方法及应用[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2006, 36(2): 279-283. [ZENG Zhaofa, WU Yangang, HAO Libo, et al. The Poisson's theorem based analysis method and application of magnetic and gravity anomalies [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(2): 279-283.]
- [33] 管志宁. *地磁场与磁力勘探* [M]. 北京: 地质出版社, 2005. [GUAN Zhining. *Geomagnetic Field and Magnetic Exploration* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.]
- [34] 杨永, 邓希光, 任江波. 南极大陆及其周缘海域重、磁异常特征及区域构造分析[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(2): 1013-1025. [YANG Yong, DENG Xiguang, REN Jiangbo. Characteristic of gravity and magnetic and regional tectonics of Antarctica and its adjacent sea [J]. *Progress in Geophys.*, 2013, 28(2): 1013-1025.]
- [35] 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 Nide iron deposit [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(12): 4181-4193.]
- [36] 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.]
- [37] 万荣胜, 张伙带, 陈洁. 插值切割法在南海重力数据处理中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(1): 175-183. [WAN Rongsheng, ZHANG Huodai, CHEN Jie. Application of interpolation cut method to gravity data processing in South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(1): 175-183.]
- [38] WANG Wanyin, PAN Yu, QIU Zhiyun. A new edge recognition technology based on the normalized vertical derivative of the total horizontal derivative for potential field data [J]. *Applied Geophysics*, 2009, 6(3): 226-233.
- [39] 吴庆勋, 王粤川, 韦阿娟, 等. 渤海海域中生代火山岩喷发旋回划分及与油气的关系[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(2): 18-26. [WU Qingxun, WANG Yuechuan, WEI Ajuan, et al. Division of the Mesozoic volcanic rock eruption cycle and its relationship with oil and gas in the Bohai sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(2): 18-26.]