

辽东湾地区地球物理场与岩石层特征

赵维娜^{1,2,3}, 张训华^{2,3,4}, 孟祥君^{2,3,4}, 吴志强^{2,3,4*}

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 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;

4 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071)

摘要:辽东湾地区是沿着郑庐断裂系发展的新生代大陆裂谷型断陷, 其深部构造制约浅部结构。总结和分析辽东湾地区重力场、磁力场、地震波场、热流场、地温分布及岩石层速度研究成果, 表明辽东湾地区具有高值深部重力、浅居里等温面、浅壳慢电性高导体、相对低热流值等特征。该区 Pn 波平均速度较低, 可能由于上地幔顶部热流物质向上侵入所致。NE 向快波方向体现的是东侧右旋走滑响应, 推测是辽东湾东部走滑作用弱于莱州湾及渤中地区, 西部更弱或者未发生走滑的结果。辽东湾地壳发生明显减薄, 居里等温面抬升区对应地壳厚度减薄区, 在地壳减薄过程中很可能发生了伸展拆离。

关键词:地球物理场; 岩石层; 辽东湾

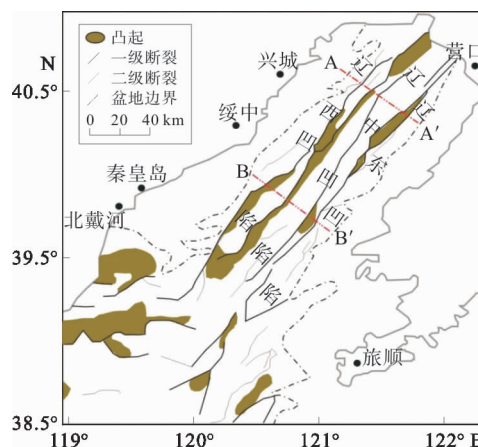
中图分类号: P313

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2016.05002

辽东湾(图 1)位于渤海东北部, 面积约为 26 000 km², 湾口北界是盖县与小凌河口连线, 南界是辽宁老铁山与河北大清河口连线。海域整体起伏小、水深浅, 个别地区水深 > 25 m, 海底地形向海湾中部小角度倾斜。从构造位置上看, 辽东湾位于古亚洲构造域向太平洋构造域转换叠加的位置, 属于下辽河断陷带在渤海海域中的延伸, 是渤海油气最富集的地区之一。近年, 很多学者系统研究了该地区的成藏条件^[1,2]、层序地层学^[3]以及断裂构造特征^[4,5], 认为深部结构的特征与大量油气断陷盆地形成演化息息相关, 深部构造制约浅部结构。深入研究辽东湾地区地球物理场

特征及岩石圈特征有助于油气资源勘查, 同时了解盆地的构造分布规律及动力学背景, 为正确解释地震剖面提供必要的地质模型。



AA', BB': 多道地震剖面

图 1 辽东湾区域位置与构造划分(据文献[6]修改)

Fig. 1 Location and geotectonic division of Liaodong Bay (modified from reference [6])

收稿日期: 2016-02-28

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(GZH201400205); 国家自然科学基金(41210005); 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: 赵维娜(1988—), 女, 在读博士, 主要从事海洋地球物理研究工作. E-mail: oucwn@163.com

* 通讯作者: 吴志强(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋油气地球物理勘探研究工作. E-mail: wuzq_1964@163.com

1 区域地质

辽东湾地区是沿着郯庐断裂系发展的新生代大陆裂谷型断陷^[4],属于渤海湾裂谷系的一部分,以断裂构造为主,断层走向多为 NE—NNE 向。郯庐断裂穿过了辽东湾地区,西支表现走滑特征不明显而东支走滑特征明显,拗陷从古近纪以来一直沉降,有厚重的第四纪盖层。辽东湾构造特征与渤海湾盆地海域部分的中部和南部地区不同,也不同于渤海湾盆地的陆域部分。它的次级单元在横向上是以 NE 向展布且近平行的,各单元之间多以陡倾的深断裂分割,在构造上具有“三凹夹两凸”的特点(图 1),从东向西依次分布着辽东凹陷、辽东凸起、辽中凹陷、辽西低凸起、辽西凹陷。辽东凹陷是一个西断东超的箕状半地堑,前身是辽中凹陷,在走滑过程中形成辽东凸起,从而形成相对独立的构造单元^[7],凹陷整体具有“南强北弱”、“东强西弱”的后期改造特征;辽东凸起位于辽东湾中东部,走滑断裂活动强烈;辽中凹陷平面上呈长条带状展布,是一个东断西超的箕状凹陷,郯庐断裂穿过了此单元,它是 3 个凹陷中面积最广、地层厚度最大、埋藏最深的单元;辽西低凸起位于辽东湾中西部,规模大于辽东凸起;辽西凹陷是一个东断西超的箕状半地堑。

前期研究关于渤海海域的构造演化主要有 2 种观点:一是经历了古近纪裂陷和新近纪拗陷 2 个阶段,其中古近纪裂陷期的特点是多旋回幕断陷作用的裂谷盆地发育^[6,8,9];二是中国东部中生代不同类型的盆地具有统一的成因联系,而非上述典型的两阶段伸展模式,其浅部构造变形是受深部动力过程的控制^[10]。

2 地球物理场特征

2.1 重磁场特征

辽东湾海域重力异常变化较为平缓,在 $-10 \sim 10$ mGal 范围内,呈条带状交替分布,总体是 NE 向展布^[11]。新生界以下剩余重力异常显示辽东湾地区是相对高值,代表结晶基底以下到莫霍面的介质差异。深部重力异常显示辽东湾是一个

自成体系、形态完整的大异常区。根据剩余重力异常计算的重力基底埋深最大位置出现在辽中凹陷地区,深度为 10 km;利用布格重力异常反演地壳厚度(图 2),湾内最薄位置是从 28 km 向东西梯度变化为 33~34 km,辽东湾是渤海湾内地壳最薄地区之一^[11-13]。

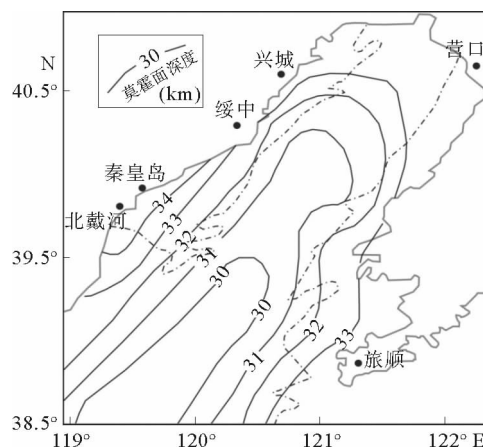


图 2 辽东湾莫霍面埋深(据文献[11]修改)

Fig. 2 Depth of Moho at Liaodong Bay
(modified from reference [11])

航磁显示辽东湾以负异常为主,在 $-350 \sim 50$ mGal 之间变化^[11],呈 NE 向展布,化极磁异常整体相似,略显平缓特征。根据航磁异常计算的居里等温面(图 3)由 16 km 梯度变化为 19 km^[12],居里等温面抬升区对应薄地壳厚度区。

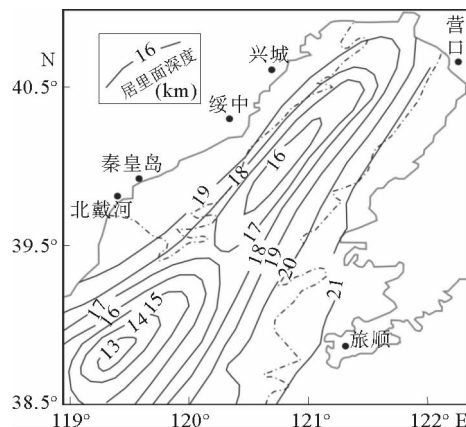


图 3 辽东湾居里面埋深(据文献[12]修改)

Fig. 3 Depth of Curie at Liaodong Bay
(modified from reference [12])

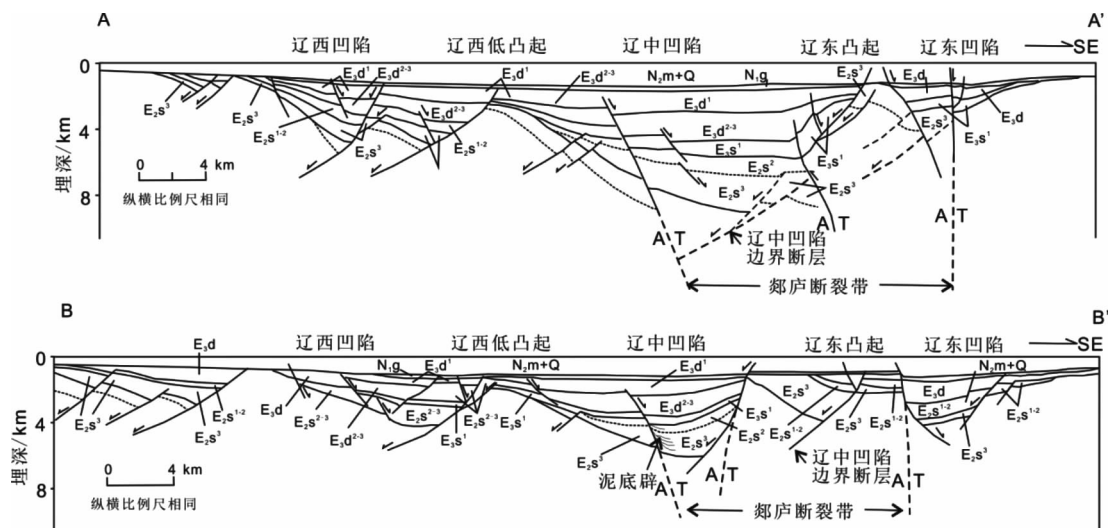
海洋阵列大地电磁测量显示辽河滩海地区凸起及其以西地区太古代基底视电阻率是 700~800

$\Omega \cdot m$, 以东地区基底视电阻率是 $1\,000\ \Omega \cdot m$, 是鞍山群与建平群的差异^[14]; 辽河滩海地区中、上元古界的电阻率是 $150 \sim 250\ \Omega \cdot m$, 中生界电阻率为 $40 \sim 90\ \Omega \cdot m$, 分别对应碳酸盐岩—砂岩、砂泥岩—火山岩; 中下地壳的电阻率为 $10 \sim 30\ \Omega \cdot m$, 比上地壳低 2 个数量级的高导层, 埋深在凸起区大, 凹陷区小且向辽东湾盆地两侧变大, 可能是拉伸过程中的拆离带; 幔内高导层位于 $60 \sim 70\ km$ 处, 电阻率是 $20 \sim 40\ \Omega \cdot m$, 高导层在隆起区埋深约 $62\ km$, 明显大于凹陷区的 $58\ km$ 埋深。

2.2 地震波组特征

根据地震数据解释^[4], 辽东湾地区新生代沉积平均埋深约为 $4\ km$, 部分地区埋深约 $8\ km$ (图 4)。漆家福等^[4]将辽东湾北部和南部 NWW 向地震反射波划分为 7 组 (部分地方缺失), 分别是上新统明化镇组和第四系 (N_2m+Q)、中新统馆陶组 (N_1g)、渐新统东营组 1 段 (E_3d^1)、渐新统东营组 2~3 段 (E_3d^{2-3})、渐新统沙河街组 1 段 (E_2s^1)、渐新统沙河街组 2 段 (E_2s^2) 及始新统沙河街组 3 段 (E_2s^3)。断陷被古近系填充, 北段沉积厚度大于南端 (辽西凹陷西段除外), 都属于正断层的上盘, 这些正断层在平面上是平行延伸的, 都为 NNE 走向。①辽东凹陷边界断层位于凹陷

西侧, 内部主要填充比较薄的渐新统, 断裂比较发育。②辽东凸起北段东侧 NE—NNE 向断层走向稳定, 近直立产状, 断层在剖面上构成典型的花状构造样式, 向上可以一直切穿第四系; 而辽东凸起西侧可以看到东陡倾或近直立的断层, 具有反转断层的特征, 剖面上表现为逆冲断层特征, 向下切割向西倾斜的正断层; 辽东凸起南段东西两侧陡倾的基底断层大致平行延伸^[4]。③辽中凹陷边界断层位于凹陷东侧, 内部填充楔形古近系, 沉积层序向西减薄、尖灭。边界断层后期被近直立的断层切割, 具有明显走滑特征, 走向稳定并延伸到辽河凹陷中。剖面显示, 高角度倾斜的逆冲断层可能并不是主控古近系填充的边界断层。郝庐断裂一个分支穿过辽中凹陷西侧, 呈现为高角度向东倾斜的基底断裂, 其上发育一条线性泥底辟构造。这是长期沉降的凹陷其上覆大密度砂岩, 下有非常厚的欠压实塑性泥岩层, 上部差异负荷及水平侧向力的作用使泥岩向相对薄弱的地方流动, 局部增厚而穿刺上部地层。泥底辟构造沿断裂发育长达 $40\ km$, 宽度为 $1\ km$ 。④辽西低凸起西侧南段要比北段破碎。⑤辽西凹陷边界断层位于凹陷东侧, 内部填充楔形古近系, 沉积层序向西减薄、尖灭, 东侧厚度小于辽中凹陷, 西侧相对厚度较大。边界断层倾角相对较小, 明显表现为铲



AA': 辽东湾北部 NWW—SEE 向剖面 (位置见图 1); BB': 辽东湾南部 NWW—SEE 向剖面 (位置见图 1)。N₂m+Q: 上新统明化镇组和第四系; N₁g: 中新统馆陶组; E₃d¹: 渐新统东营组 1 段; E₃d²⁻³: 渐新统东营组 2~3 段; E₃s¹: 渐新统沙河街组 1 段; E₂s²: 渐新统沙河街组 2 段; E₂s³: 始新统沙河街组 3 段; A 表示断块离观察者而去, T 表示断块向观察者而来

图 4 辽东湾地区构造剖面图 (据文献[4]修改)

Fig. 4 Structural section through Liaodong Bay (modified from reference [4])

式几何学特征,断裂比较发育。有研究认为郯庐断裂也穿过了辽西凹陷,但受到张家口—蓬莱断裂的阻碍,使其在新近纪及第四纪并未发生走滑^[8]。

2.3 大地热流值及地温分布特征

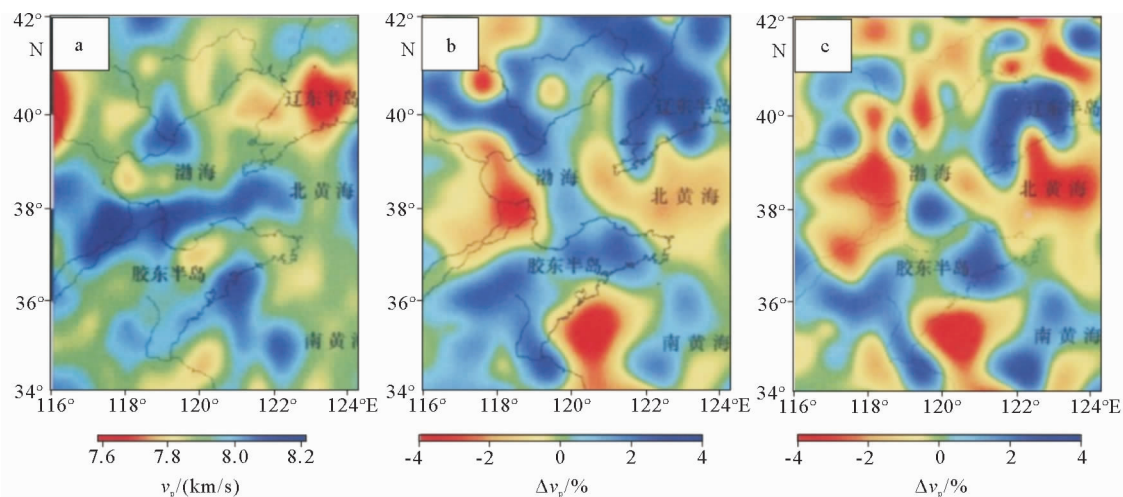
辽东湾地区在整个渤海海域为低热流区,辽西平均热流值为 60 mW/m^2 ,辽东为 55 mW/m^2 ^[15],但高于稳定地区及前寒武地盾区平均热流值,也远远高于变质基底出露区的热流值^[16-18]。地温在整个渤海海域偏低,可能是相对较厚盖层的影响,但有 3 个异常高值区,温度梯度 $< 3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ ^[19]。

3 岩石层特征

3.1 地壳速度

根据地震观测数据,通过体波地震层析成像反演的中国边缘海及邻区的纵波速度结构表明,

辽东湾地区的 Pn 波平均速度较低,多在 $7.7 \sim 7.9 \text{ km/s}$ (图 5a)。Pn 波所体现的上地幔顶部低速,主要反映的是岩石层底部的岩石物性和热状态的不均一性,与浅表层构造的联系较弱。冲绳海槽盆地、南海中央海盆及华北盆地等中生代裂谷盆地都呈现出上地幔低速异常的特征,记录了岩石张裂有关的地幔活动,有可能是上地幔顶部热流物质向上侵入所致^[20,21]。10~20 km 深度的 P 波速度结构显示辽东湾整体呈现高速,西南部速度略低(图 5b、c)。图 6 是 Pn 波各项异性分布图,反映的是岩石层地幔中的构造变形特征,从图中看出辽东湾快波方向整体为 NE 向,莱州湾及渤中地区是接近 NS 向,与周边地区各向异性快波方向具有明显差异。郯庐断裂带淮营段穿过渤海湾,古近纪活动强烈,新近纪至第四纪具有显著的右旋走滑活动。在莱州湾及渤中地区体现的是与走滑方向一致的各项异性特征,而辽东湾东部走滑作用弱于莱州湾及渤中地区,西部更弱或者未发生走滑,所以 NE 向快波方向体现的是东侧右旋走滑响应。



(a) Pn 波速度分布; (b) 10 km 深度的 P 波速度分布; (c) 20 km 深度的 P 波速度分布

图 5 辽东湾及邻区速度结构(修改自文献[20])

Fig. 5 Velocity structure of the Liaodong Bay and adjacent region (modified from reference[20])

3.2 现代构造应力场特征

通过数值模拟^[22,23]及对井壁应力研究^[24]发现,辽东湾地区现代构造应力场主压应力的优势方向具有东西分带特征,东部以 NWW 为主,西部以 NE 为

主。最大水平主应力及最小水平主应力都明显高于渤海其他地区,而最大剪切应力虽与渤海其他地区类似具有中部大,向四周递减的特性但数值明显小于其他地区,但南北向梯度较大。发生在渤海湾海域的地震相对渤中地区较少,主要集中在东侧陆地。

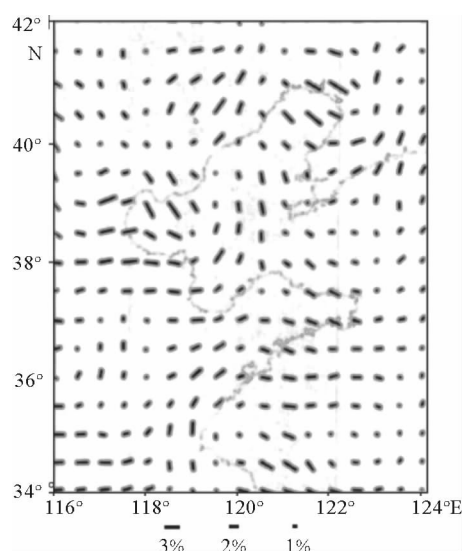


图6 辽东湾及邻区 Pn 波各向异性(据文献[20]修改)

Fig. 6 Pn wave anisotropy of the Liaodong Bay and adjacent region (modified from reference [20])

4 结论

(1) 辽东湾地区重力异常变化较为平缓,呈条带状交替分布,航磁以负异常为主,另外还具有高值深部重力、浅居里等温面、浅壳幔电性高导体、相对低热流值等特征。辽东湾并非一个现代大陆裂谷型断陷盆地,居里等温面抬升区对应地壳厚度明显减薄区,并且在地壳减薄过程中很可能发生了伸展拆离。

(2) 郯庐断裂在辽东湾东侧呈现高角度基底断裂特征,可能由于上地幔顶部热流物质向上侵入,辽东湾地区的 Pn 波平均速度较低。NE 向快波方向体现的是东侧右旋走滑响应,推测是辽东湾东部走滑作用弱于莱州湾及渤中地区,西部更弱或者未发生走滑的结果。

参考文献:

[1] 周心怀,余一欣,魏刚,等. 渤海辽东湾海域 JZ25-1S 转换带与油气成藏的关系[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 837-840.

[2] 王元君,王俊,周心怀,等. 辽东湾辽中凹陷 J27 区东营组岩性圈闭成藏条件研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(5): 523-527.

[3] 张若祥,李建平,杨波,等. 辽东湾地区古近系东二段—东三段界线的厘定及勘探意义[J]. 地层学杂志, 2013, 37

(2): 210-215.

[4] 漆家福,邓荣敬,周心怀,等. 渤海海域新生代盆地中的郯庐断裂带构造[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2008, 38(增刊): 19-29.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 吴奎. 辽东凸起南倾没端勘探地震研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2009: 1-59.

[8] 侯贵廷,钱祥麟,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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 刘光夏,赵文俊,任文菊,等. 渤海地壳厚度研究[J]. 物探与化探, 1996, 20(4): 316-317.

[13] 刘光夏,赵文俊,任文菊,等. 渤海重力三维正演研究的初步结果[J]. 地震学报, 1997, 19(1): 102-106.

[14] 王东坡,曾效箴,薛林福,等. 海洋阵列大地电磁测深法在辽东湾滩海深部地质构造研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 293-307.

[15] 王良书,刘绍文,肖卫勇,等. 渤海盆地大地热流分布特征[J]. 科学通报, 2002, 47(2): 151-155.

[16] 刘光夏,赵文俊,李志雄. 渤海第三纪裂谷扩张的地球物理分析[J]. 西北地震学报, 1996, 18(3): 18-24.

[17] 邱楠生,魏刚,李翠翠,等. 渤海海域现今地温场分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 412-419.

[18] 姜迪迪,江为为,胡卫剑. 环渤海地区地壳结构及其动力学特征研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 1729-1738.

[19] 肖卫勇,王良书,李华,等. 渤海盆地地温场研究[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(2): 105-110.

[20] 胥颐,郝天珧,李志伟,等. 中国边缘海域及其邻区的岩石层结构与构造分析[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 55-63.

[21] 李志伟,胥颐,郝天珧,等. 环渤海地区的地震层析成像与地壳上地幔结构[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 797-804.

[22] 陈晓利,陈国光,叶洪. 渤海海域现代构造应力场的数值模拟[J]. 地震地质, 2005, 27(2): 289-297.

[23] 解秋红,刘保华,李西双,等. 基于 Hooke-Jeeves 算法的渤海现今应力场优化反演[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 279-299.

[24] 徐杰,周本刚,计凤桔,等. 中国东部海域及其邻区现代构造应力场研究[J]. 地学前缘, 2012, 19(4): 1-7.

(下转第 47 页)

southeast Liaodong Peninsula and the southern North Yellow Sea. Grain size analysis indicates that the sediments are high in sand content with better sorting. It is inferred that the Yalu River, south-east coast of the Liaodong Peninsula, Changshan Archipelago, Laotieshan Channel and the relict deposits before the Holocene are provenances of the heavy minerals. The enrichment of valuable heavy sands depends upon hydrodynamic conditions, such as, a) coastal current, which effectively transported the sediments from proximal rivers; b) strong tidal current from the north Yellow Sea, which worked for the enrichment of heavy placer minerals; c) the Yellow Sea warm current, which effectively constrained the diffusion of fine grained material from the Yellow River and protected the enrichment region of valuable heavy minerals.

Key words: surface sediments; valuable heavy minerals; anomaly grade; eastern Bohai Sea; northern Yellow Sea

~~~~~  
(上接第 12 页)

## GEOPHYSICAL FIELD AND LITHOSPHERE OF THE LIAODONG BAY

ZHAO Weina<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xunhua<sup>2,3,4</sup>, MENG Xiangjun<sup>2,3,4</sup>, WU Zhiqiang<sup>2,3,4\*</sup>

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China;

3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 4 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The Liaodong bay is a Cenozoic continental rift developed along the Tanlu Fault. The deep structure constrains the shallow. A detailed summarization and an integrated analysis of gravity field, magnetic field, seismic wave, heat flow, geothermal distribution and lithosphere speed are made for the Laodong bay in the paper. The study demonstrates that the Liaodong Bay is characterized by high deep gravity, relatively low heat flow with shallow Curie isothermal surface and intra-crustal and intra-mantle high conductive layers. The lower average velocity of Pn wave in this area may owe its origin to the heat flow intrusion into the top of upper mantle. Based on the direction of fast wave towards NE-trend, it is inferred that the strike slipping of eastern Liaodong bay is weaker than that of the Laizhou Bay and the Bozhong with the western Liaodong Bay as the weakest close to zero. The crust of the Liaodong Bay is obviously thinning and the uplifted Curie isothermal surface corresponds to the crust thinning area. It is very likely that the extensional detachment occurs in the process of crust thinning.

**Key words:** geophysical field; lithosphere; Liaodong Bay