

基于重力数据的渤海湾盆地断裂-莫霍面特征分析 与富烃凹陷预测

相鹏¹, 陈学国¹, 孟令玮^{1*}, 吴微¹, 郭涛¹, 冯国志¹, 刘海涛², 李竹强¹

1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257001

2. 中国石油科学技术研究院地质所, 北京 100000

摘要:渤海湾盆地作为叠置在古生代华北克拉通拗陷之上的新生代陆内裂谷盆地, 处于三大构造域交接中心, 其含油气性与地壳结构密切相关. 本文基于渤海湾盆地的重力数据, 系统分析了盆地断裂体系、基底与莫霍面分布特征, 并通过主成分分析 (PCA) 对 59 个凹陷的油气富集潜力进行定量评价. 研究表明, 盆地断裂具有多向发育、分级控制、深浅耦合特征, 其形成受“地幔热伸展—板块边界走滑”双动力源协同驱动; 莫霍面与基底呈显著镜像响应关系, 海域莫霍面平均深度 (33.5 km) 显著浅于陆域 (42.1 km), 结晶地壳厚度呈现“陆域厚 (36.7 km)、海域薄 (25.3 km)”的空间分异特征; 渤中凹陷作为盆地内地幔隆起与地壳拉伸减薄的核心区域, 油气富集潜力综合评分达 1.00, 位列所有凹陷之首. 依据油气富集综合评分, 将 59 个凹陷划分为四类勘探靶区, 其中 I-III 类凹陷 (含渤中、东营、饶阳、惠民等 27 个凹陷) 为油气勘探有利区域, IV 类凹陷 (32 个) 因深部构造活动微弱、成藏条件受限, 勘探价值较低. 本研究成果不仅揭示了渤海湾盆地深部地壳结构与油气富集的关联机制, 更为该盆地及全球同类陆内裂谷盆地的油气资源精准勘探提供了重要的深部地质依据与技术支撑.

关键词: 渤海湾盆地; 断裂分布; 莫霍面特征; 地壳特征; 富烃凹陷

中图分类号: P618

收稿日期: 2026-1-7

Analysis of Fault-Moho Characteristics and Prediction of Hydrocarbon-Rich Sags in the Bohai Bay Basin Based on Gravity Data

Xiang Peng¹, Chen Xueguo¹, Meng Lingwei^{1*}, Wu Wei¹, Guo Tao¹, Feng Guozhi¹,

Liu Haitao², Li Zhuqiang¹

1. Exploration and Development Research Institute of Shengli Oilfield Branch, SINOPEC, Dongying 257001, China

基金项目: 油气重大专项项目 (2024ZD1400106) 资助.

作者简介: 相鹏 (1978-), 男, 高级工程师, 研究方向重磁电勘探方法、理论与应用. ORCID: 0009-0008-1753-2958. E-mail:

xiangpeng.slyt@sinopec.com

***通讯作者:** 孟令玮 (1998-), 男, 助理工程师, 研究方向重磁勘探方法、理论与应用. E-mail: menglw309.slyt@sinopec.com

Abstract: As a Cenozoic intracontinental rift basin superimposed on the Paleozoic North China Craton depression, the Bohai Bay Basin is located at the junction center of three major tectonic domains, where its hydrocarbon potential is closely related to the crustal structure. Based on the gravity data of the Bohai Bay Basin, this study systematically analyzed the basin's fault system, basement characteristics, and Moho discontinuity distribution, and quantitatively evaluated the oil and gas enrichment potential of 59 sags using Principal Component Analysis (PCA). The results show that the basin's faults are characterized by multi-directional development, hierarchical control, and deep-shallow coupling, with their formation synergistically driven by the dual dynamic sources of "mantle thermal extension and plate boundary strike-slip movement". The Moho discontinuity exhibits a significant mirror response relationship with the basement: the average depth of the Moho in the marine area (33.5 km) is significantly shallower than that in the continental area (42.1 km), and the crystalline crust thickness shows a spatial differentiation feature of "thicker in the continental area (36.7 km) and thinner in the marine area (25.3 km)". As the core area of mantle uplift and crustal stretching-thinning in the basin, the Bozhong Sag achieved a comprehensive score of 1.00 for oil and gas enrichment potential, ranking first among all sags. According to the comprehensive enrichment score, the 59 sags were classified into four types of exploration targets. Among them, Type I-III sags (including 27 sags such as Bozhong, Dongying, Raoyang, and Huimin) are favorable for oil and gas exploration, while Type IV sags (32 sags) have low exploration value due to weak deep tectonic activity and limited reservoir-forming conditions. The findings of this study not only reveal the correlation mechanism between deep crustal structure and oil-gas enrichment in the Bohai Bay Basin but also provide important deep geological basis and technical support for the precise exploration of oil and gas resources in this basin and similar intracontinental rift basins worldwide.

Key words: Bohai Bay Basin; faults; Moho characteristics; crustal characteristics; hydrocarbon-rich s

渤海湾盆地是我国关键的含油气盆地之一，其油气聚集呈现“复式”特点，发育的油气藏类型十分丰富（张功成等，2024）。虽然该地区具备良好的区域性储盖组合及优越的成藏条件，但该盆地已探明的油气储量在总资源量中的占比依旧处于较低水平，后续勘探开发

的空间仍然较大（薛永安等，2020）。在总资源量中的占比依旧处于较低水平，后续勘探开发的空间仍然较大（薛永安等，2020）。

学者通过研究发现了断裂和莫霍面这两个区域构造对于油气的聚集成藏都有重要影响（夏庆龙和徐长贵，2016）。中国含油气盆地的形成与分布都受到深大断裂的控制，可将无机成因的烃从地下深处

运移上来,统计结果表明全国 40 个具有典型代表意义的油气田的断裂对烃源岩、油气运移、油气圈闭、油气聚集、油气藏分布的各项重要控制率均在 75%以上(张文昭,1997)。断裂的复杂性与差异性直接影响了研究区内油气聚集规律(夏庆龙和徐长贵,2016):伸展活动控制生烃凹陷的形成,并使得岩浆上涌,提供热源,促进烃源岩的快速演化;走滑作用为油气运移提供输导通道,同时形成大量的构造圈闭,可起到封闭作用聚集油气。

莫霍面是地壳与地幔的一级物性分界面,其形态、深度变化记录着深部构造演化信息,对理解盆山耦合及深浅部油气系统关系意义重大。莫霍面隆起和地壳构造薄弱带易沉降成大型沉积区,助力烃源岩、储层等成藏要素的形成与保存,结晶地壳减薄及莫霍面活跃还能提供成藏物质与生烃能量(滕吉文等,1983)。这类隆起且起伏大的盆地更适找油气,可快速锁定勘探初期目标(邵学钟等,1999; Zhang et al., 2023)。莫霍面与渤海湾油气富集显著相关(陈光希,2019):其突变带对应郯庐断裂等深大断裂,切穿地壳成为深部流体通道,促进无机气与有机烃混合成藏,次级断裂助油气运移,形成“下生上储”等模式;其还关联岩石圈热状态,渤海湾热流高(渤中凹陷最显著),既促烃源岩成熟,也影响油气相态与储层演化。

地球物理勘探为开展渤海湾盆地断裂和莫霍面研究提供了多类型的数据资料,近年来对渤海盆地及其邻区的断裂分布和莫霍面深度研究取得了显著进展(Hao et al., 2013; 李祖辉等, 2015; Wang et al., 2017; 胡志伟等, 2019; Vasanthi

et al., 2021; Deng et al., 2023; Cai et al., 202; 蔡梦轲等, 2025)。该盆地内断裂极为发育,以往学者多借助地震资料开展断裂识别工作(胡志伟等, 2019; 薛永安等, 2021),近年来多位学者基于重磁数据也展开了相关研究(张菲菲等, 2019; Cai et al., 2024; 蔡梦轲等, 2025),并且对于断裂的平面分布与规模的认知也存在分歧。在渤海湾盆地的莫霍面研究方面,近些年来学者已经取得了丰富的成果,例如通过地震台网记录的数据,已采用多种手段刻画莫霍面深度的空间变化(Wang et al., 2017; Vasanthi et al., 2021; Deng et al., 2023);或是基于地震剖面资料开展了反演工作,以进一步揭示构造细节(Hao et al., 2013; 李祖辉等, 2015)。然而,受限于地震台站分布稀疏(尤其在渤海盆地内部)及地震剖面数量有限,仅依靠地震资料得到的解释结果横向分辨率有限,因此结合地震结果的约束,利用重力资料研究渤海盆地莫霍面深度更具优势。目前,学者们已尝试了包括三维反演、调和级数法、Parker-Oldenburg法等多种反演方法(Hao et al., 2013; Guan et al., 2016; Cai et al., 2024; 蔡梦轲等, 2025)。尽管部分研究已针对渤海盆地获得了大尺度反演结果,但不同研究得到的莫霍面深度仍存在差异。因此,有必要在重力异常数据源、莫霍面深度约束、莫霍重力异常提取方法及剩余密度选取等方面开展进一步研究,以获得可靠且全面的莫霍面深度信息。

富烃凹陷的预测被视为油气资源进一步精细勘探的核心问题,具有后续勘探开发的潜力(米立军等, 2023)。关于富烃凹陷的评价,研究者们提出了多种评价指标(如烃源岩生烃强度、资源丰度、资源规模、已探明储量等)(李志伟等, 2006; 杨舒越等, 2024)。不过不同学者选用的评价指标与标准

却存在显著差异, 基于这些指标难以明确界定凹陷.

综上所述, 现有工作主要聚焦于盆地尺度莫霍面深度与油气富集的关系, 但缺乏针对凹陷区莫霍面深度与油气储量的定量研究, 且莫霍面深度的精度仍显不足. 为弥补上述不足, 本文利用卫星重力数据与地形数据, 并结合沉积层分布信息, 旨在提高莫霍重力异常的提取可靠性, 进而获得渤海盆地莫霍面深度的精细分布. 同时, 本文提出采用莫霍面深度、地壳厚度, 等量化评价指标, 以刻画各凹陷深部构造活动强度及其油气潜力, 并据此预测富烃凹陷的空间位置.

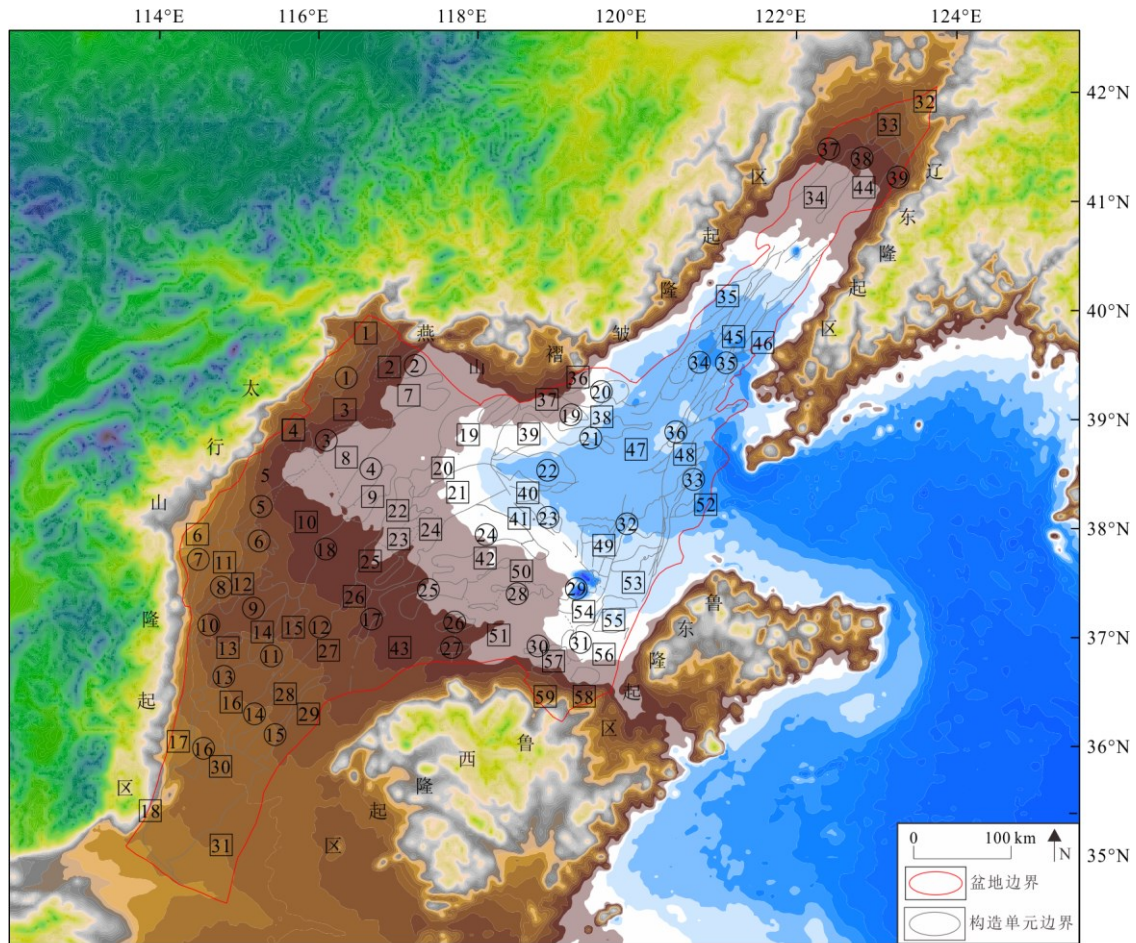
1 区域地质背景

渤海湾盆地位于中国东部, 地跨北京、天津、河北、辽宁、山东及河南等多个省市, 延伸至渤海海域, 区内包括陆地和海洋. 它是一个叠置在古生代华北克拉通拗陷之上的新生代陆内裂谷盆地 (Suo et al., 2014; 薛永安等, 2021), 处于古亚洲洋、特提斯洋和太平洋三大构造域相互作用交接的中心区域, 属于典型的拉张型盆地, 盆地东西两侧分别以太行山隆起区和辽东隆起区—鲁东隆起区为界, 南北则受燕山褶皱隆起区与鲁西隆起区所限 (叶涛等, 2022).

中生代之前, 华北克拉通作为一个统一的构造单元, 东西部具有一致的构造演化过程和沉积特征 (李晨等, 2024). 进入中生代后, 受西太平洋板块俯冲作用的影响, 区域热扰动加剧, 软流圈物质对岩石圈底部产生强烈侵蚀, 导致华北克拉通东部岩石圈发生巨大减薄, 而

渤海湾盆地是华北克拉通破坏和岩石圈减薄的中心区域. 这种岩石圈的强烈减薄为后期断裂的发育和盆地的形成提供了深部构造背景. 如图 1 所示, 渤海湾盆地内的构造共可划分 59 个凹陷和 39 个凸起. 整体具“凸凹相间、大盆地小凹陷”的特点, 其内部构造特征多样, 伸展、走滑及挤压构造均有发育.

盆地基底构造演化可分为六大阶段 (朱伟林等, 2009): (1) 太古宙—古元古代: 变质结晶基底形成, 由多个地块拼贴而成, 拼贴交汇于渤海中部; 构造呈近 EW、NNW、NE 向, 不同地体构造方向有差异. (2) 中、新元古代: 发育大陆裂谷盆地, 形成华北第一套沉积盖层 (长城系、青白口系), 沉积厚度中心在遵化、迁安一带 (上千米); 新元古代华北主体抬升, 并受到剥蚀, 但克拉通南部边缘和营口—潍坊断裂带以东发生了拉张裂陷; 该阶段构造呈 NE 向. (3) 早古生代: 受被动陆缘海盆控制, 为稳定克拉通盆地发育阶段, 寒武系、下奥陶统接受稳定沉积; 构造方向近 EW 向. (4) 晚古生代至中生代早期: 受西伯利亚板块和华南板块俯冲、碰撞的影响, 进入不稳定克拉通盆地阶段, 上奥陶统至下石炭统大部分缺失, 中、上石炭统沉积海陆交互相含煤地层, 二叠纪发育海退型陆源碎屑夹煤; 沉积构造方向近 EW 向. (5) 中生代晚三叠世至早、中侏罗世: 受板块推挤和走滑作用, 进入内陆盆地发育阶段, 发育 WNW 向或 NE 向斜列构造; 发育河、湖相火山岩、碎屑岩, 厚度差异大. (6) 中生代晚侏罗世至白垩纪: 受西太平洋板块俯冲影响, 进入裂陷盆地发育阶段, 郯庐断裂带左行平移并伴随岩浆活动, 后期转为伸展; 构造方向以 NE 或 NNE 向为主; 主要发育沉积河、湖相火山岩、碎屑岩等.



- | 高程m | | | | | | | |
|--------|---------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|
| -200 | 200 | 600 | 1000 | 1400 | 1800 | 2200 | 2600 |
| ①北京凹陷 | ②大广凹陷 | ③廊固凹陷 | ④徐水凹陷 | ⑤保定凹陷 | ⑥石家庄凹陷 | ⑦武清凹陷 | ⑧霸县凹陷 |
| ⑨里垣凹陷 | ⑩饶阳凹陷 | ⑪晋县凹陷 | ⑫束鹿凹陷 | ⑬巨鹿凹陷 | ⑭南宫凹陷 | ⑮大营镇凹陷 | ⑯丘县凹陷 |
| ⑰邯郸凹陷 | ⑱汤阴凹陷 | ⑲北塘凹陷 | ⑳板桥凹陷 | ㉑岐口凹陷 | ㉒沧东凹陷 | ㉓常庄凹陷 | ㉔盐山凹陷 |
| ㉕南皮凹陷 | ㉖吴桥凹陷 | ㉗德州凹陷 | ㉘冠县凹陷 | ㉙莘县凹陷 | ㉚元集凹陷 | ㉛东濮凹陷 | ㉜沈北凹陷 |
| ㉝大民屯凹陷 | ㉞西部凹陷 | ㉟辽西凹陷 | ㊱昌黎凹陷 | ㊲乐亭凹陷 | ㊳秦南凹陷 | ㊴南堡凹陷 | ㊵沙南凹陷 |
| ㊶埕北凹陷 | ㊷车镇凹陷 | ㊸惠民凹陷 | ㊹东部凹陷 | ㊺辽中凹陷 | ㊻辽东凹陷 | ㊼渤中凹陷 | ㊽渤东凹陷 |
| ㊾黄河口凹陷 | ㊿沾化凹陷 | ①东营凹陷 | ②庙西凹陷 | ③莱州湾凹陷 | ④青东凹陷 | ⑤莱南凹陷 | ⑥淮北凹陷 |
| ⑦牛头镇凹陷 | ⑧潍坊凹陷 | ⑨昌乐凹陷 | | | | | |
| ⑩大兴凸起 | ⑪宝坻凸起 | ⑫牛驼镇凸起 | ⑬大城凸起 | ⑭高阳低凸起 | ⑮刘村低凸起 | ⑯藁城凸起 | ⑰宁晋凸起 |
| ⑱新河凸起 | ⑲饶隆凸起 | ⑳明化镇凸起 | ㉑武城凸起 | ㉒广宗凸起 | ㉓馆陶低凸起 | ㉔堂邑凸起 | ㉕楚旺凸起 |
| ㉖宁津凸起 | ㉗献县凸起 | ㉘马头营凸起 | ㉙秦南凸起 | ㉚石白坨凸起 | ㉛沙垒田凸起 | ㉜埕北低凸起 | ㉝埕子口凸起 |
| ㉞无棣凸起 | ㉟林樊家低凸起 | ①青城凸起 | ②陈家庄凸起 | ③垦东青坨子凸起 | ④广饶凸起 | ⑤淮北凸起 | ⑥渤南低凸起 |
| ⑦庙西凸起 | ⑧辽西低凸起 | ⑨辽东凸起 | ⑩渤东低凸起 | ⑪西部凸起 | ⑫中央凸起 | ⑬东部凸起 | |

图 1 渤海湾盆地地形高程及构造单元

Fig.1 Topographic Elevation and Structural Units of the Bohai Bay Basin

2 断裂与莫霍面分布特征

2.1 数据准备

重力异常数据来源为重力场模型 SGG-UGM-2 (Liang et al.,2020), 范围为 112°E—126°E、34°N—43°N, 空间分辨率为 5'×5',

海域可达 1'×1' (图 2)。渤海湾盆地 (盆地边界内) 异常值异常幅值在 -45~20mGal 之间变化, 盆地与周边区域的异常分界清晰, 以太行山隆起区、燕山褶皱隆起区、辽东隆起区、鲁东隆起区和鲁西隆起区为界, 重力异常明显升高.盆地内重力异常整体呈现“陆负海正”的特征, 反映莫霍面自西向东系统

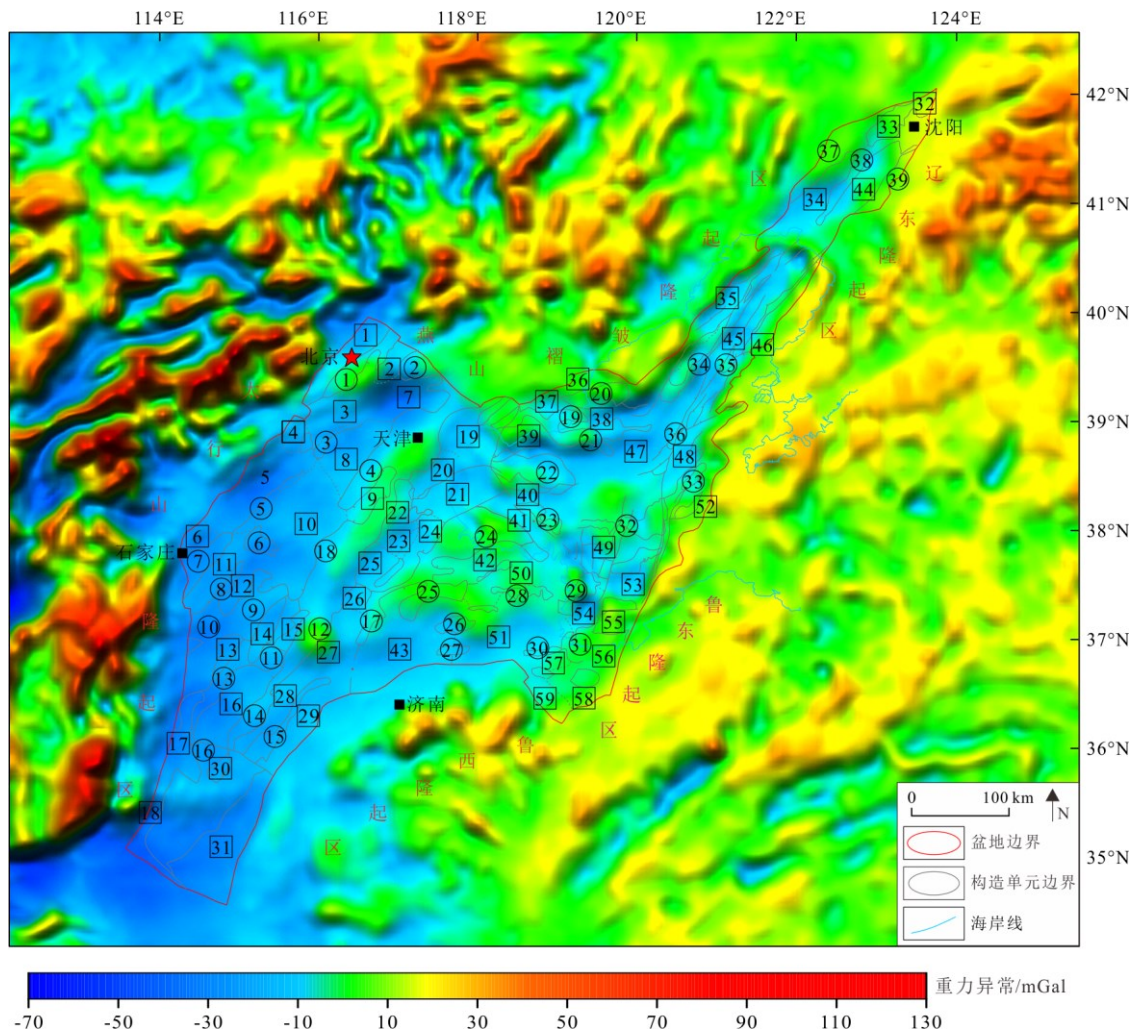


图 2 渤海湾盆地及邻域布格重力异常

Fig.2 Bouguer Gravity Anomalies in the Bohai Bay Basin and Its Adjacent Areas

性抬升.海岸线附近重力异常变化较明显,反映出地壳结构的强烈差异,是构造活动较活跃的地带,也可能是断裂带的分布区域,对油气、矿产的聚集意义重大.

2.2 渤海湾盆地断裂特征

渤海湾盆地位于华北克拉通东部,是我国典型的克拉通破坏区与富油气盆地集中区.其断裂体系的形成演化与克拉通破坏、板块作用、地幔活动等密切相关,对油气的生成、运移和富集具有关键控制作用(李三忠等,2010).以下从断裂刻画解释及形成机制等方面进行系统分

析.

2.2.1 断裂刻画与解释

对获取的渤海湾盆地布格重力异常进行归一化总水平导数(THDR)处理,以THDR的脊值连线或脊值错断位置作为断裂平面位置的主要识别标志(图3a).从断裂识别结果来看,太行山断裂和郯庐断裂是控制渤海湾盆地构造走向的关键断裂,二者共同构成了盆地的东西边界,主导了盆地NE向的构造格局.此外,霸县—束鹿—邯鄲断裂、兰聊—盐山断裂也在盆地构造演化中发挥重要作用,而新发现的盆地南部NW向断裂则对盆地南部边界的形成具有明显控制作用.张家

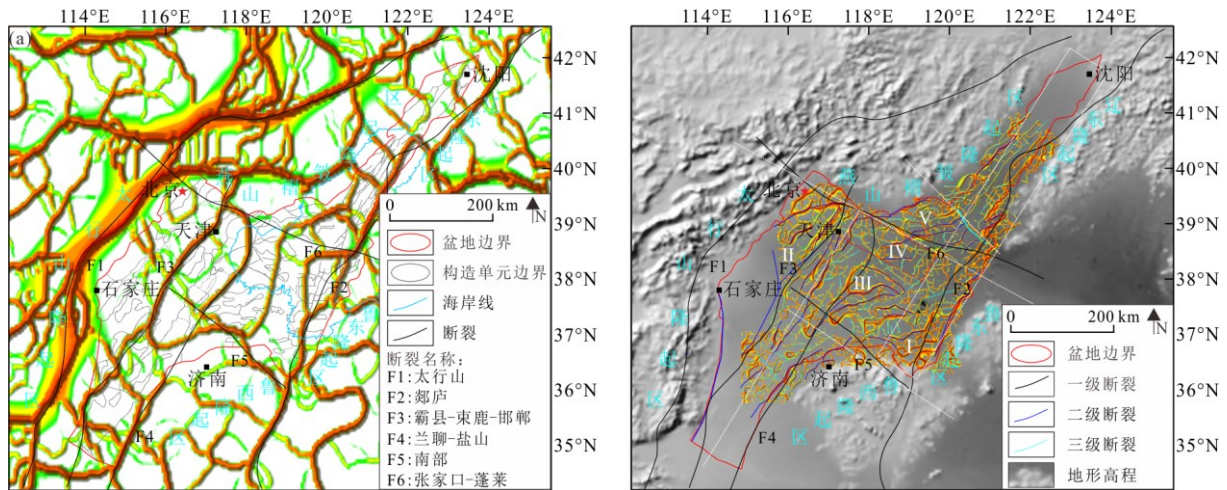


图3 渤海湾盆地断裂识别结果

Fig.3 Fault Identification Results of the Bohai Bay Basin

a.凹陷级断裂识别图；b.渤海湾盆地断裂体系

口—蓬莱断裂走滑性强，连续性较差，通过北东向断裂的错断解释出来。

研究表明这些断裂均为基底断裂，其中霸县—束鹿—邯郸断裂是走滑型断裂(杨克基等，2016)，太行山断裂为伸展型断裂(张功成等，2024)，而郟庐断裂、兰聊—盐山断裂和张家口—蓬莱断裂则属于走滑—伸展复合型断裂(胡志伟等，2019)。这些断裂的形成与板块相互作用、地幔动力活动紧密相关。华南板块与华北板块的挤压碰撞是太行山断裂形成的直接动力；板块边界的作用力向盆地区传递，促使兰聊—盐山断裂、霸县—束鹿—邯郸断裂的形成；同时，地幔隆起扩张产生的水平拉张作用，在渤海湾盆地中部形成了以多条断裂为边界的断陷盆地，进一步塑造了盆地的宏观结构。

在盆地断裂格架的约束下，进一步解释了次级断裂(图3b)。在兰聊—盐山断裂以东区域断裂结构复杂，主要发育北西、北东和近东西三个方向的断裂。在印支期的挤压逆冲作用下，形成了北西向的断裂；在燕山期的走滑作用下，形成北东向为主的断裂；在喜山期的拉张与走

滑共同作用下，形成近东西向为主的断裂。其中济阳坳陷形成“七纵四横”的构造格局。

结合前人成果与认识，在重力资料解释基础上，建立了渤海湾超级盆地的断裂体系。在深部地幔动力与板块边界力共同作用下，具有显著的多向发育、分级控制、深浅耦合特征，总结为以下几点：

(1) 断裂发育方向复杂，包括北东向、北西向和近东西向，反映出多期应力场的叠加作用。其中，北东向断裂是主体，控制盆地总体构造格局；

(2) 一级断裂：控制盆地边界，深切基底；二级断裂：继承多期老断裂特征，控制坳陷与隆起的分布；三级断裂：发育于沉积盖层中，走向一致，反映区域应力场；

(3) 盆地中存在大量“隐性断裂带”，在沉积盖层中表现为断续小断层，深部往往对应大型基底走滑断裂，体现深浅构造的耦合关系。

基于NW、NE向深大断裂的分区效应，依据盆内结构及构造变形的差异性，可将渤海湾盆地分为3带2区：东部走滑带(I)、西部拆离断陷带(II)、中部叠合断陷带(III)、NW(NWW)向转换区(IV)、NW(NWW)-NNE共轭转换区(V)。

2.2.2 断裂形成的动力学机制 渤海湾地区断裂体系的形成是“伸展—走滑双动力源”共同作用的结果.地幔热作用作为伸展动力源,控制了盆地的裂陷伸展过程,太行山前断裂等伸展型断裂的形成与此密切相关;而板块边界作用力传递到盆地区形成的区域应力场则作为走滑动力源,促使郑庐断裂、兰聊—盐山断裂等发生走滑活动.

在构造演化时序上,印支期受华南与华北板块近 ENE 向碰撞挤压,形成大量近 EW 向或 WNW 向逆冲断裂;燕山期受东侧太平洋板块近 WNW 向挤压应力影响,形成大量 ENE 向走滑逆冲构造,并在近 NW-SE 向伸展应力作用下叠加发育伸展构造;印支期 WNW—EW 向断裂体系与燕山期 ENE 向断裂体系叠加,共同主导形成了渤海湾盆地中生代东西分带、南北分块的基底构造格局(李三忠等, 2010).古近纪时,在地幔隆起扩张导致的 NW-SE 向水平拉张作用下,沿着燕山期形成的 NNE 至 ENE 向逆冲断裂拉张滑脱,发育断陷盆地.因此

盆地内主要发育 NNE—NE 向和 WNW—NW 向两组断裂.

此外,华北克拉通东部岩石圈韧性层与刚性层的相互作用也对断裂形成产生重要影响.区域剪切应力场下,刚性层先大面积破裂,韧性层蠕动变形;随着变形加剧,韧性层被剪切断层弱化,部分断层发育成较大断裂系,断裂系间距约 150~250 km.这些断裂系区域弧后拉张应力场共同作用,在渤海湾盆地形成雁列式走滑拉分盆地群.

2.3 渤海湾盆地基底与莫霍面特征

本文采用多界面深度和密度同时反演技术得到沉积层底面(基底)、上结晶地壳底面、莫霍面等多个界面.受持续伸展作用影响,渤海湾盆地整体位于区域性莫霍面隆起和地壳拉伸减薄的位置(胡志伟等, 2019).

基底被盆地级断裂分割,兰聊—盐山断裂和霸县—束鹿—邯郸断裂为界,基底由西向东呈“上隆—下凹”变化特征,沉积层厚度呈“西薄—东厚”特征,在海陆区域表现出不同的控沉积与控油气作

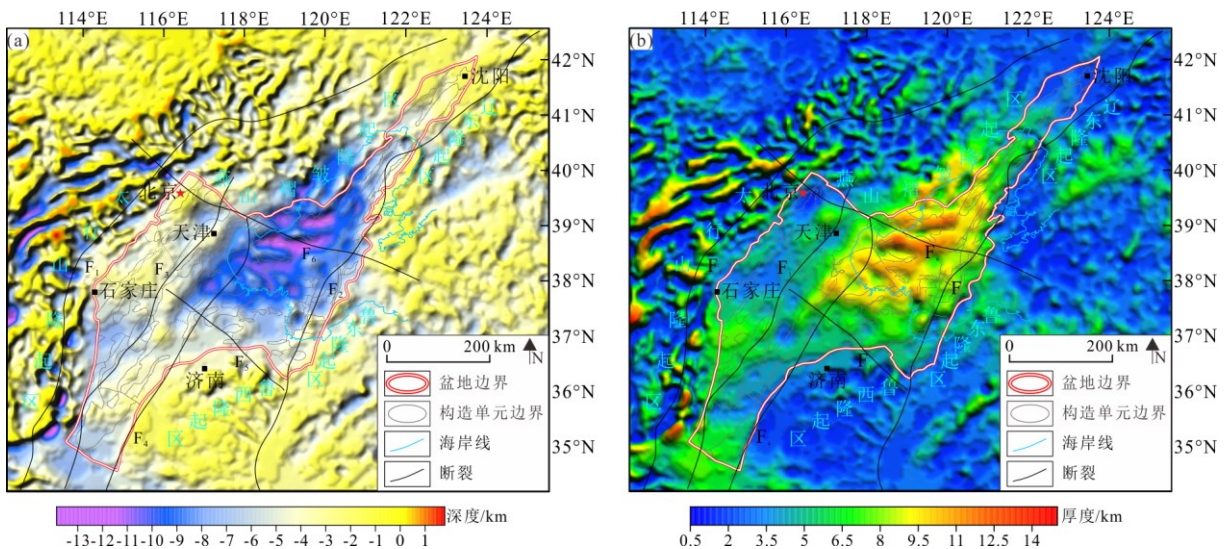


图4 渤海湾盆地沉积层结构特征

Fig.4 Structural characteristics of the sedimentary layer in the Bohai Bay Basin
a.沉积层底面(基底)深度图; b.沉积层厚度图

用(图4).兰聊—盐山断裂以西的陆域,基底深度3.5-6.5 km(图4a),构造走向NE向,沉积层厚度较薄且横向变化平缓(图4b),烃源岩发育受单一断陷控制,生烃中心相对固定;断裂以东的海域,基底深度5.5-12.5 km(图4a),渤中凹陷基底最深,构造走向以NW和WE向为主,沉积层厚度大且横向变化剧烈(图4b),多期断陷叠加形成多个生烃中心(如渤中、辽

中凹陷),生烃潜力远超陆域.

在上结晶地壳底面图(图5)上有一条明显的褶皱带,褶皱带南段与太行山断裂重合,中段形成太行山山前断裂,北段与前人研究的太行山断裂走向一致,应为太行山断裂北段分支(卢造勋等,1999).盆地断裂格架与深层构造有较好的对应关系,证实所解释的深大断裂切穿地壳,为深部热物质与流体上升提供通道.

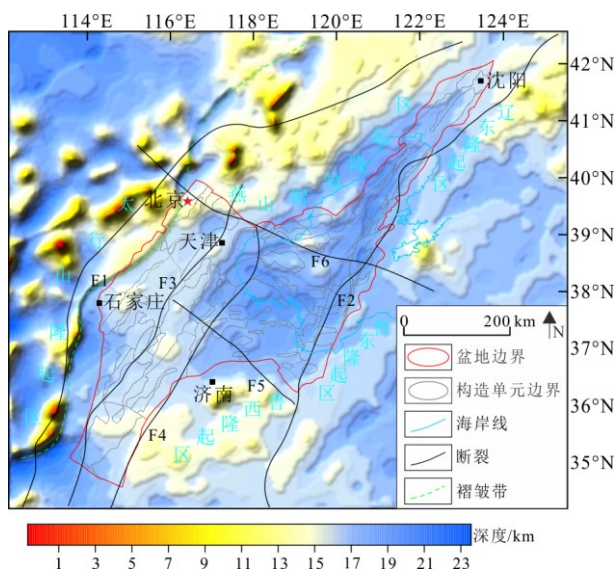


图5 上结晶地壳底面深度图

Fig.5 Depth Map of the Bottom Surface of the Upper Crystalline Crust

如图6a所示,渤海湾盆地莫霍面具有与基底结构镜像的特征.由于华南板块向北推挤与华北板块碰撞并横向挤入,太行山断裂在莫霍面反映明显,从到太行山断裂到兰聊-盐山断裂之间的区域,莫霍面埋深变大,地壳变厚,厚度范围在40~48km之间(图6a、图7a).以渤中坳陷为中心,以兰聊—盐山断裂、郯庐断裂和南部断裂为边界的区域,莫霍面显著抬升,地壳减薄,厚度范围在23~30km之间,形成巨型地幔柱(图6a、图7a).

同时,莫霍面起伏变化显示盆地的海域、陆域部分存在一定差异.陆域莫霍面深度27.4~47.4 km,平均深度为42.1 km,地壳厚度16.9~44.9 km,

平均厚度为36.7 km;海域莫霍面深度23.8~43.5 km,平均深度为33.5 km,地壳厚度12.1~40.2 km,平均厚度为25.3 km.因此,总体上表现为莫霍面深度呈现“陆域深,海域浅”的特征,而结晶地壳厚度呈现“陆域厚,海域薄”的特征.为进一步量化分析,本文对渤海湾盆地范围内的陆域凹陷与海域凹陷(海陆边界处凹陷除外)分别进行了统计,重点分析其莫霍面深度的最小值、平均值、最大值与地壳厚度的最小值、平均值、最大值的分布特征(图6b、图7b).统计结果显示,海域与陆域在上述指标上存在显著差异,揭示了海域与陆域地区在地壳结构及深部构造活动方面

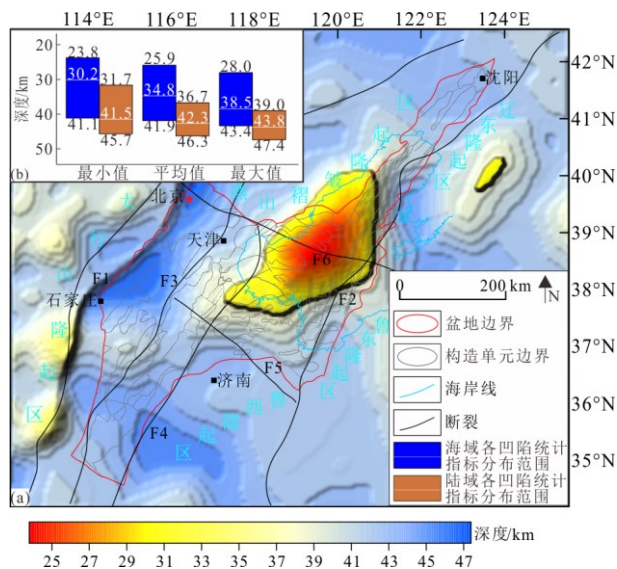


图 6 莫霍面深度图

Fig.6 Moho Depth Map

a.莫霍面深度；b.海域凹陷和陆域凹陷莫霍面深度统计结果

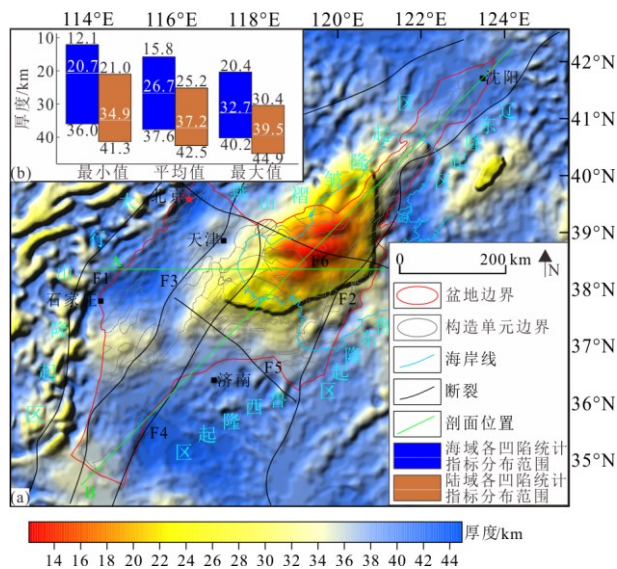


图 7 地壳厚度图

Fig.7 Crustal Thickness Ma

a.地壳厚度；b.海域凹陷和陆域凹陷地壳厚度统计结果

的复杂性.

图 6b 显示海域凹陷莫霍面最小深度的平均值为 30.2 km, 明显浅于陆域凹陷的 41.5 km; 其平均深度 (34.8 km) 与最大深度 (38.5 km) 的平均值亦显著小于陆域凹陷 (分别为 42.3 km 和 43.8 km). 这表明无论是在莫霍面顶界、平均界面还是底界深度上, 海域凹陷均表现出整体

抬升的特征. 此外, 海域凹陷的最小莫霍面深度可低至 23.8 km, 远小于陆域凹陷的 31.7 km, 进一步证实海域凹陷的莫霍面顶界埋深更浅, 地幔隆起更为显著. 图 7b 显示海域凹陷的地壳厚度同样呈现系统性减薄特征. 其海域最薄地壳厚度的平均值为 20.7 km, 显著小于陆域凹陷的 34.9 km; 平均地壳厚度 (26.7 km) 及最厚地壳厚度 (32.7 km) 的平均值亦

明显薄于陆域凹陷(分别为 37.2 km 和 39.5 km)。海域凹陷最薄地壳厚度的最小值仅为 12.1 km，也低于陆域凹陷的 15.8 km，表明海域凹陷的地壳拉伸减薄程度更为剧烈，深部构造活动性更强。

莫霍面与基底的镜像结构在剖面上反映更清晰(图 8)，巨型地幔柱在东西方向涵盖渤中拗陷和黄骅拗陷两个一级构造单元，在北东方向涵盖济阳拗陷、渤中拗陷和辽河拗陷三个一级构造单元。莫霍面隆起导致地壳减薄，引起地壳沉降形成大型沉积

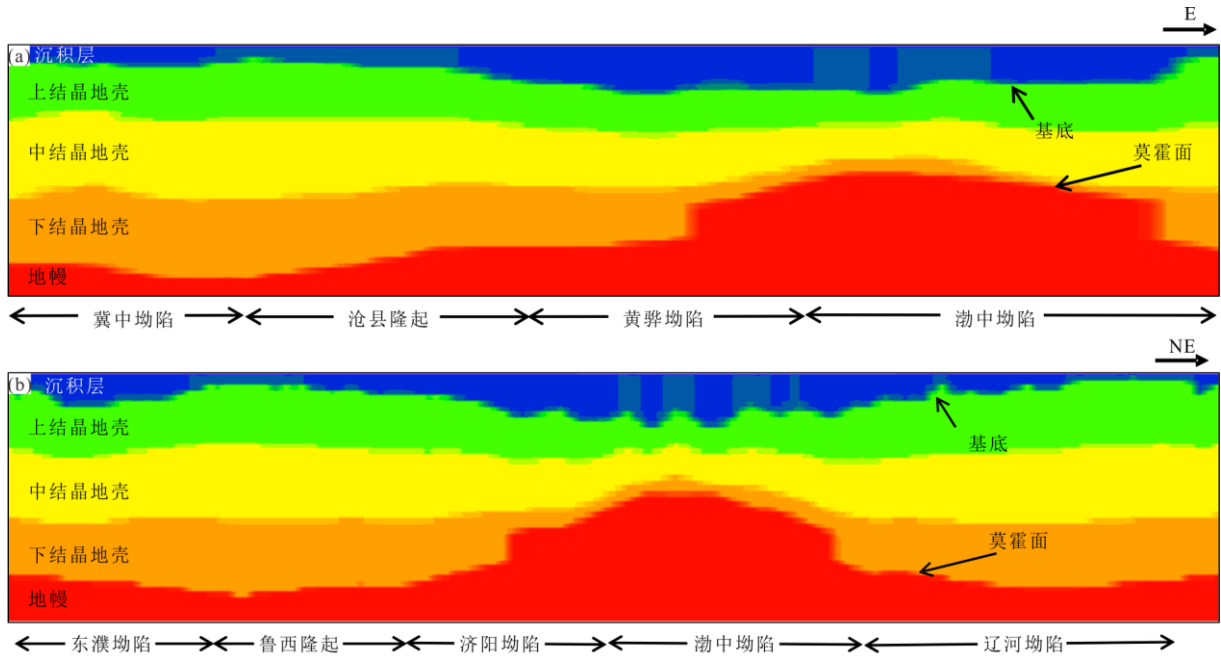


图 8 剖面分层结构图
Fig.8 Layered Structure of Cross-Section
a.剖面 A; b. 剖面 B

区，有利于烃源岩、储集层、盖层和各类圈闭等成藏要素的形成和保存。莫霍面突变对应控制渤海湾盆地构造格局的深大断裂，断裂切穿地壳，构成深部流体上升通道，促进幔源 CO₂ 等无机气与有机烃类的混合成藏(薛永安等，2025)。同时，深大断裂诱发的次级断裂系统为油气运移提供了重要通道。深部热物质上涌引起的热沉降也是控制新近纪以来盆地沉积中心迁移的关键因素，决定了油气晚期成藏与保存条件。

上述莫霍面抬升与地壳减薄特征，也体现

在莫霍面拉张因子和地壳拉张因子上。本文计算得到渤海湾盆地莫霍面拉张因子和地壳拉张因子，分别如图 9a 和图 9b 所示。莫霍面拉张因子和地壳拉张因子在陆域的变化程度较小，但在海域的变化显著。例如海域的渤中凹陷位于郯庐断裂和张家口-蓬莱断裂交汇位置，二者均属于沟通地幔的岩石圈断裂，周边断层活动强烈，提供了良好的“强断陷”条件，莫霍面拉张因子和地壳拉张因子强，位于渤海湾盆地内莫霍面隆升和地壳拉张减薄的程度最剧烈的位置，为优质烃源岩发育提供了有利条件，同时提供热源以促进生排烃。

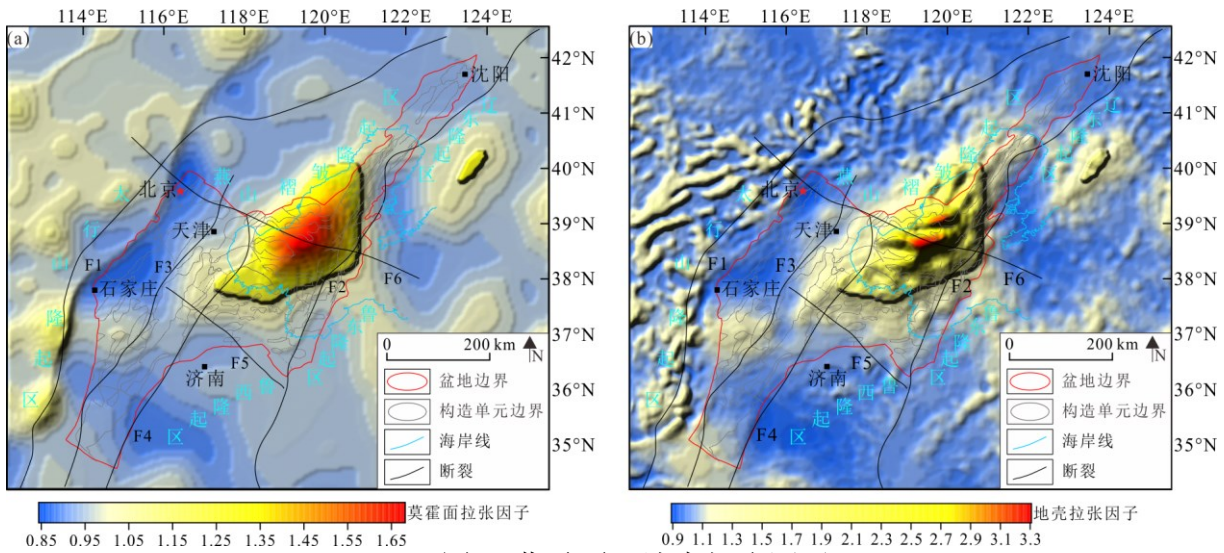


图 9 莫霍面及地壳拉张因子

Fig.9 Moho Stretching Factor and Crustal Stretching Factor

a.莫霍面拉张因子; b.地壳拉张因子

3 富烃凹陷预测

大型油气田的形成是一个受多种因素控制的复杂过程，这些因素包括优质烃源岩、有利储层、有效盖层的存在，以及烃源岩—储层或烃源岩—储层—盖层组合的特定配置（邵学钟等，1999）。然而，在油气勘探中仅考虑沉积盖层条件是不够的，深部地壳构造特征对油气的形成与运移也具有重要影响。研究表明，盆地内油气储量分布与深部地壳构造特征存在密切关联，这些特征通常表现为结晶地壳较薄、地幔对地壳的影响较强（邵学钟等，1999）。渤海伸展盆地的形成，可归因于不同时期太平洋板块向东亚大陆的俯冲作用，该过程导致岩石圈拆沉、软流圈上涌、地壳拉伸及地壳减薄（Liang et al., 2016）。在这一地质过程中，地壳与地幔物质沿深大断裂以底辟作用向上运移，为油气形成提供了丰富的物质与能量（Cox and Engebretson, 1985; Maruyama et al., 1997）。

渤海盆地内地壳运动的非均一性，导致不同构造单元在莫霍面深度、地壳厚度、莫霍面拉伸系数和地壳拉伸系数等深部地壳构造分布特征上存在显著差异，这些差异反映了油气储量地质条件的不均衡分布（Cai et al., 2024）。Zhang et al.（2023）在近期研究中强调，莫霍面深度的波动是导致不同盆地油气储量分布差异的关键因素。本研究重点对渤海盆地内各凹陷的面积，以及深部地壳构造特征的最大值、最小值和平均值进行统计分析，旨在筛选出与现有地质信息具有强一致性的指标。随后，采用主成分分析（PCA）方法，对各凹陷的油气储量赋存程度进行定量评价。

3.1 各凹陷莫霍面深度和地壳厚度的统计及分析

本研究计算了各凹陷的莫霍面深度与地壳厚度（图 10a 和图 10b），其最大值和最小值反映了各凹陷内莫霍面深度的变化范围及地壳减薄或增厚程度。不同凹陷的莫霍面深度与地壳厚度分布存在显著差异，其中渤中凹陷的特征最为突出：其莫霍面最小深度为 23.8 km，浅于所有其他凹陷；地壳最小厚度

为 12.1 km, 表明该区域地壳减薄显著. 这表明渤中凹陷处于渤海盆地内地幔隆起、地壳拉伸与减薄的中心位置.

秦南凹陷的莫霍面最小深度为 24.4 km, 地壳最小厚度为 12.6 km, 两项指标在渤中凹陷之外均优于 (即更浅/更薄) 其他所有凹陷, 指示

该凹陷具有较为显著的莫霍面隆起和地壳拉伸减薄特征. 另外, 乐亭凹陷、南堡凹陷、辽中凹陷、沙南凹陷、辽西凹陷、渤东凹陷、昌黎凹陷、辽东凹陷、埕北凹陷和黄河口凹陷的莫霍面也相对较浅 (最小深度小于 30 km), 且地壳厚度较薄 (最小厚度小于 21 km). 与之相反, 石家庄、大广、深县和元集

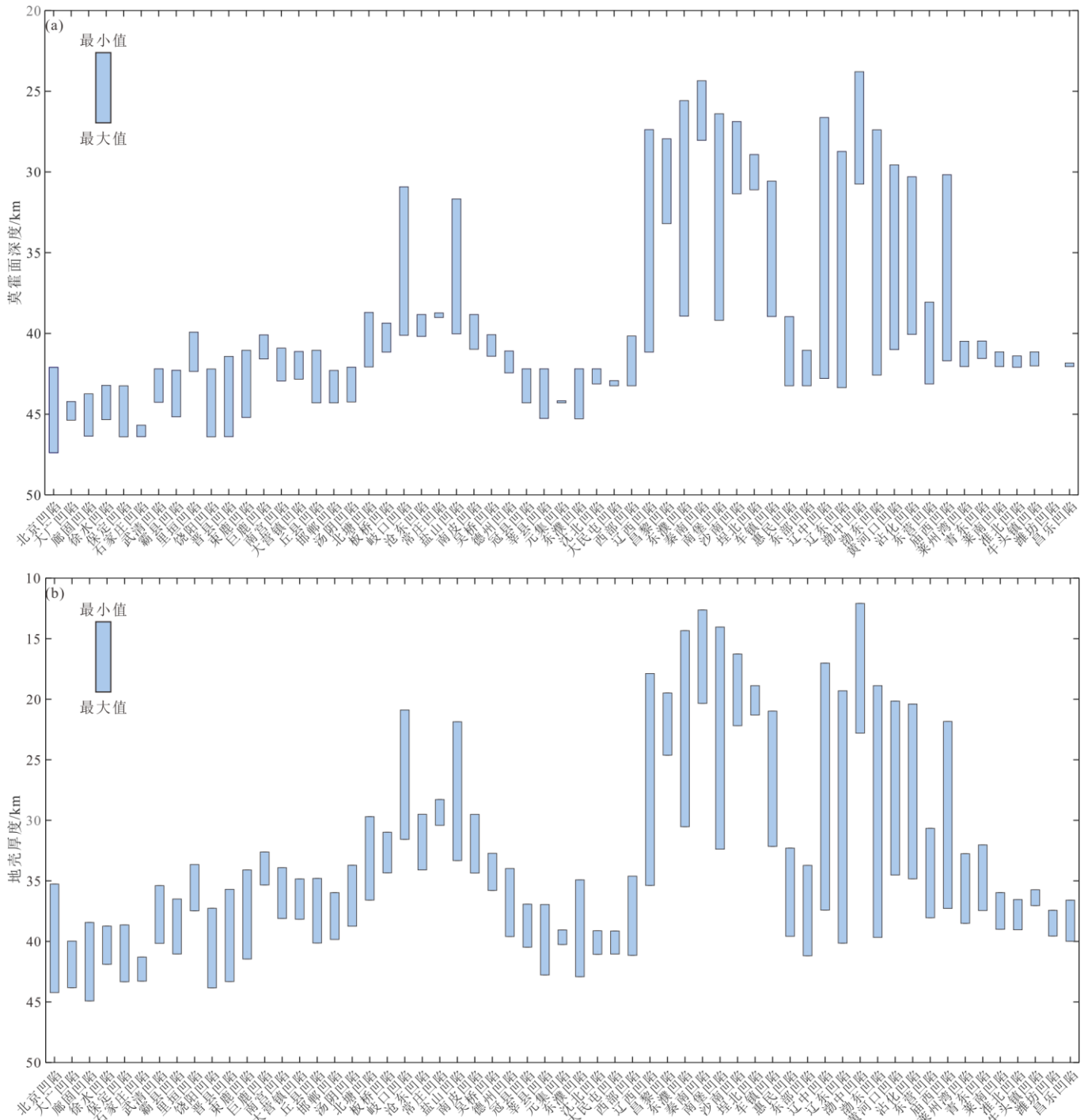


图 10 各凹陷内部莫霍面深度及地壳厚度的统计结果

Fig.10 Statistical Results of Moho Depth and Crustal Thickness Inside Each Sag

a.各凹陷内部地壳厚度的统计结果; b.各凹陷内部地壳厚度的统计结果

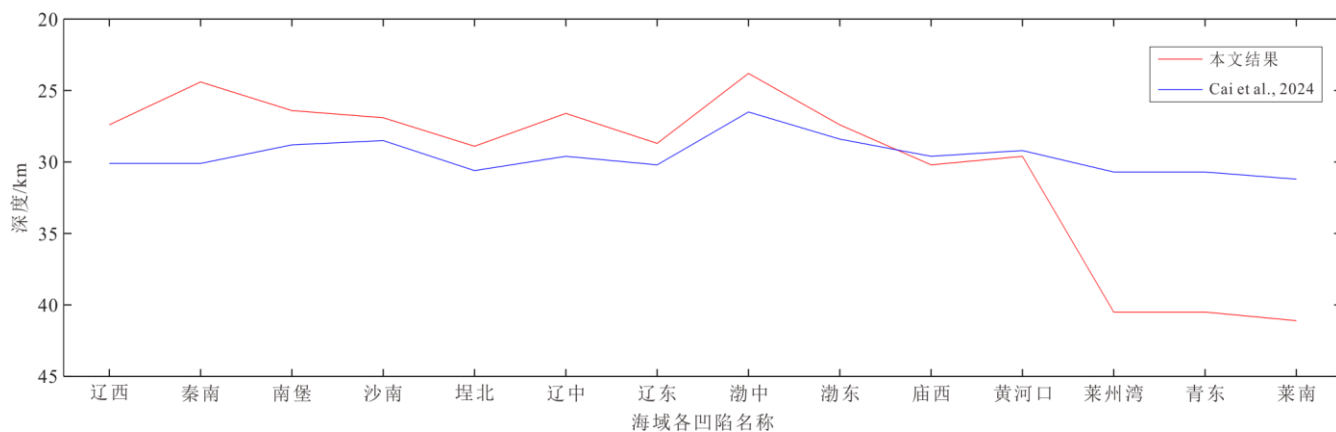


图 11 渤海湾盆地海域凹陷莫霍面最小值统计对比

Fig.11 Statistical Comparison of Moho Minimum Values in Offshore Sags of the Bohai Bay Basin

等凹陷的莫霍面隆起与地壳减薄程度较低，且整体变化幅度小，表明这些区域的深部地壳构造活动较弱。这些变化可归因于古太平洋板块的俯冲作用以及华北克拉通的后续改造，最终导致克拉通东部段的破坏和局部化地壳结构差异的出现（朱日祥等，2012）。

为验证本文基于重力数据反演得到的莫霍面深度的可靠性，将各凹陷的莫霍面最小值与已有研究成果进行对比分析。

首先，本文结果与李祖辉等（2015）利用 OBS2013 剖面地震数据建立的地壳结构模型具有良好的对应关系。OBS2013 剖面结果显示，莫霍面在渤中凹陷处埋深最浅，约为 25.5 km，并向鲁东隆起方向逐渐加深至 30 km。这一变化趋势与本文在相应区域观测到的莫霍面自海域向陆地逐渐加深的规律一致，且渤中凹陷的莫霍面深度值（23.8 km）与地震结果较为接近。考虑到重力数据与地震数据在原理和分辨率上的固有差异，两者结果可视为相互印证，表明本文反演结果在宏观趋势上具有可靠性。

其次，将海域各凹陷的莫霍面最小值与 Cai et al.（2024）的研究结果进行对比（图 11）。从

数据分布形态来看，两组数据在大部分凹陷表现出相似的变化趋势。渤中凹陷作为盆地内地幔隆起中心，在本文和 Cai et al.（2024）的结果中莫霍面最小值分别为 23.8 km 和 26.5 km，均为全区最浅。其中，渤东、庙西、黄河口三个凹陷的差值均在 1 km 以内；辽西、南堡、沙南、埕北、辽中、辽东、渤中七个凹陷的差值在 3 km 以内，表明在盆地主体凹陷，两组数据的吻合度较高。然而，两组数据仍存在一定差异，以莱州湾、青东、莱南三个凹陷差异最为显著，差值接近 10 km。从定量评价指标来看，全部 14 个凹陷的均方根误差（RMSE）为 5.08 km，显示两组数据在整体上较为接近；剔除位于盆地边缘且构造特征较为复杂的莱州湾、青东、莱南三个凹陷后，剩余 11 个凹陷的 RMSE 显著降低至 2.54 km，降幅约 50%，一致性进一步提升。

综合上述对比分析，本文结果与李祖辉等（2015）的地震剖面及 Cai et al.（2024）的反演结果在盆地主体凹陷的莫霍面最小值分布上具有较好的一致性，证明本文反演结果在整体趋势上是可靠的。边缘凹陷的显著差异可能反映了不同数据源及反演方法对复杂构造区域的适应性差异，

值得后续结合更多深部地球物理资料进一步研究和约束。

本研究还计算了各凹陷的莫霍面拉张因子和地壳拉张因子.每个计算点的拉张因子反映了莫霍面或地壳的起伏程度.每个凹陷内所有计算点的拉张因子之和,综合反映了莫霍面和地壳的三维变

化程度.这些因子的幅度和平均值分布如图 12a 和图 12b 所示.其中渤中凹陷的数值最为突出.渤中凹陷的莫霍面拉张因子最大值和总和总和分别为 1.68 和 2297,在所有凹陷中最为显著.同样,渤中凹陷的地壳拉张因子最大值和总和分别为 3.31 和 3730,也远高于其他凹陷.这些指标进一步表明,

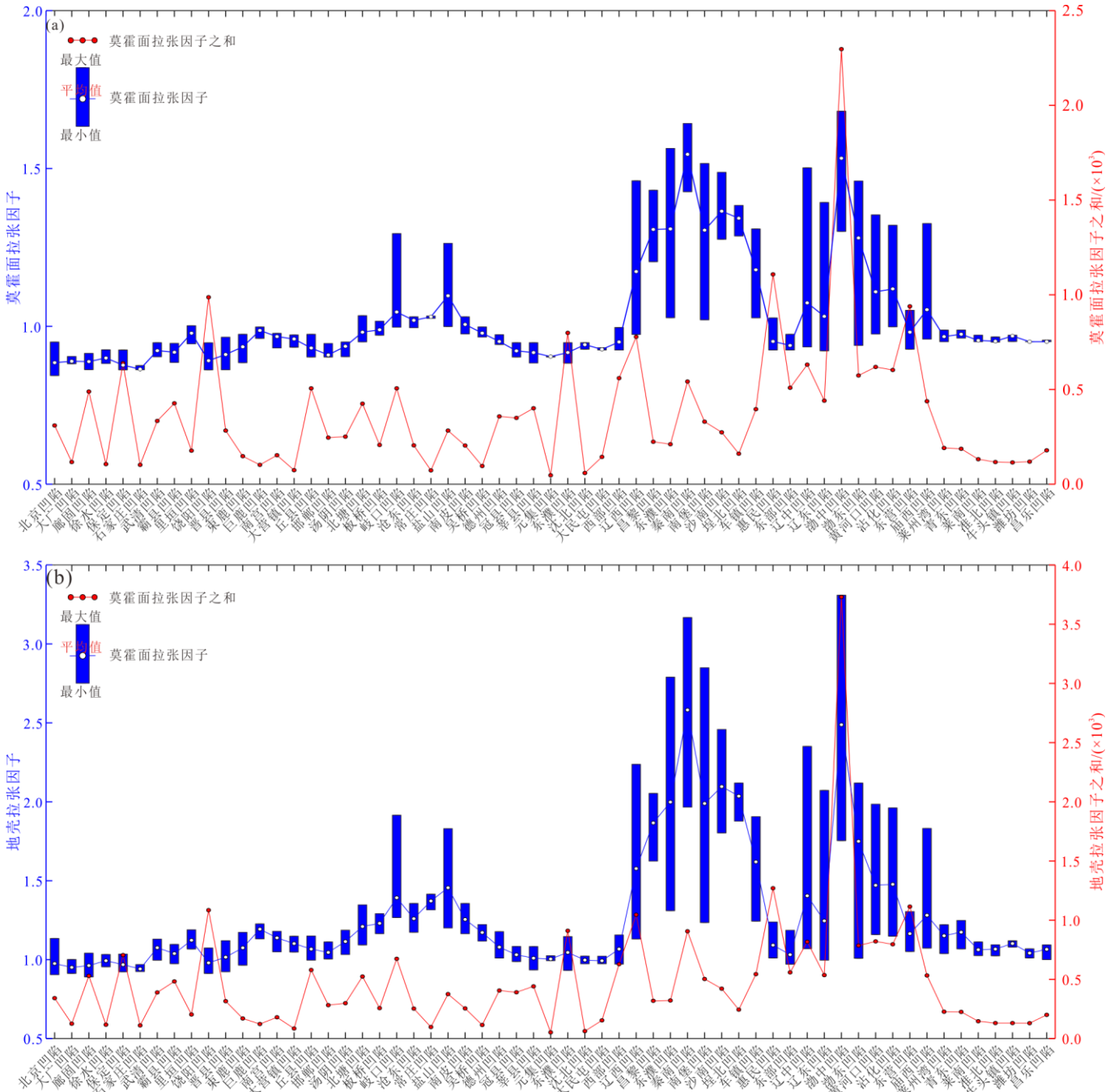


图 12 各凹陷内部莫霍面及地壳拉张因子的统计结果

Fig.16 Statistical Results of the Moho Stretching Factor and Crustal Stretching Factor Inside Each Sag

a.各凹陷内部地壳伸展因子的统计结果; b.各凹陷内部地壳伸展因子的统计结果

渤中凹陷位于渤海盆地的中心区域, 该区域上地幔隆起显著, 地壳拉伸减薄现象突出. 尽管秦南凹陷的莫霍面和地壳拉伸因子最大值不如渤中凹陷, 但其莫霍面和地壳的整体变化程度仅次于渤中凹陷 (莫霍面和地壳拉伸系数总和分别为 542 和 906). 此外, 惠民凹陷、东营凹陷、饶阳凹陷、辽西凹陷和东濮凹陷的莫霍面和地壳拉伸系数也存在显著变化 (莫霍面拉伸系数总和 ≥ 770 , 地壳拉伸系数总和 ≥ 910). 相比之下, 深县凹陷、涧河凹陷、沈北凹陷和元集凹陷的莫霍面深度和地壳厚度变化极小 (莫霍面拉伸系数总和 ≤ 70 , 地壳拉伸系数总和 ≤ 80). 这些指标进一步印证了该区域内莫霍面起伏和地壳厚薄变化的非均质性.

基于上述统计结果, 显然渤中凹陷位于渤海盆地内的上地幔隆起和地壳拉伸减薄中心. 该凹陷的莫霍面隆起和地壳拉伸减薄变化最为显著, 表明其深部地壳构造活动强烈. 秦南凹陷、惠民凹陷、东营凹陷、饶阳凹陷、辽西凹陷和东濮凹陷是地幔隆起与地壳拉伸减薄的次级中心, 这些凹陷的莫霍面隆起及地壳拉伸减薄变化也相对显著. 与之相反, 深县凹陷、涧河凹陷、沈北凹陷和元集凹陷的莫霍面隆起与地壳减薄程度较低, 且整体变化幅度小, 表明这些区域的深部地壳构造活动较弱.

3.2 富烃凹陷预测

渤中凹陷是渤海湾盆地内最重要的富烃凹陷 (张功成等, 2000; 薛永安等, 2020). 在本研究采用的统计指标中, 该凹陷的油气富集特征体现得尤为明显, 主要表现为地壳厚度 (莫霍面深度) 最小值最低, 以及地壳 (莫霍面)

拉伸系数总和最高. 基于上述四项指标, 本文采用主成分分析 (PCA) 方法, 对盆地内 59 个凹陷的油气富集程度进行综合评分. 评分越高, 表明该凹陷的深部地壳构造活动越强, 油气聚集潜力越大.

本研究通过协方差矩阵的奇异值分解 (SVD) 实现主成分分析 (Cai et al., 2024): 先将每个指标减去其均值, 再计算协方差矩阵; 通过奇异值分解求解 4×4 协方差矩阵的特征值与特征向量, 选取与最大特征值对应的特征向量作为主成分, 该主成分可解释大部分数据变异. 将协方差矩阵的特征向量与 59×4 的统计指标矩阵相乘, 得到一维向量; 对该向量进行 K 均值归一化, 即可得到油气富集评分.

基于各凹陷的油气富集评分, 通过 K 均值聚类得到四组结果 (图 13): 第一组 (I 类) 的聚类中心为 1.00, 仅包含渤中凹陷 (评分 1.00); 第二组 (II 类) 的聚类中心为 0.39, 包含东营凹陷 (0.47)、饶阳凹陷 (0.42)、惠民凹陷 (0.39)、东濮凹陷 (0.34)、辽西凹陷 (0.33); 第三组 (III 类) 的聚类中心为 0.20, 包含保定凹陷 (0.26)、辽中凹陷 (0.26)、黄河口凹陷 (0.25)、沾化凹陷 (0.25)、渤东凹陷 (0.23) 等 21 个凹陷; 第四组 (IV 类) 的聚类中心为 0.05, 包含北京凹陷 (0.12)、晋县凹陷 (0.11)、盐山凹陷 (0.11)、沙南凹陷 (0.10)、汤阴凹陷 (0.09) 等 32 个凹陷.

其中, I 类、II 类和 III 类凹陷表现出活跃的深部构造活动, 地幔上涌为油气生成提供了丰富的物质和能量; 地壳拉伸减薄作用使沉积层增厚, 为油气生成和聚集创造了有利条件. 因此, 这些凹陷的油气富集评分较高, 是油气勘探和生产最有利的区域 (图 14). 值得注意的是, 渤中凹陷的富集

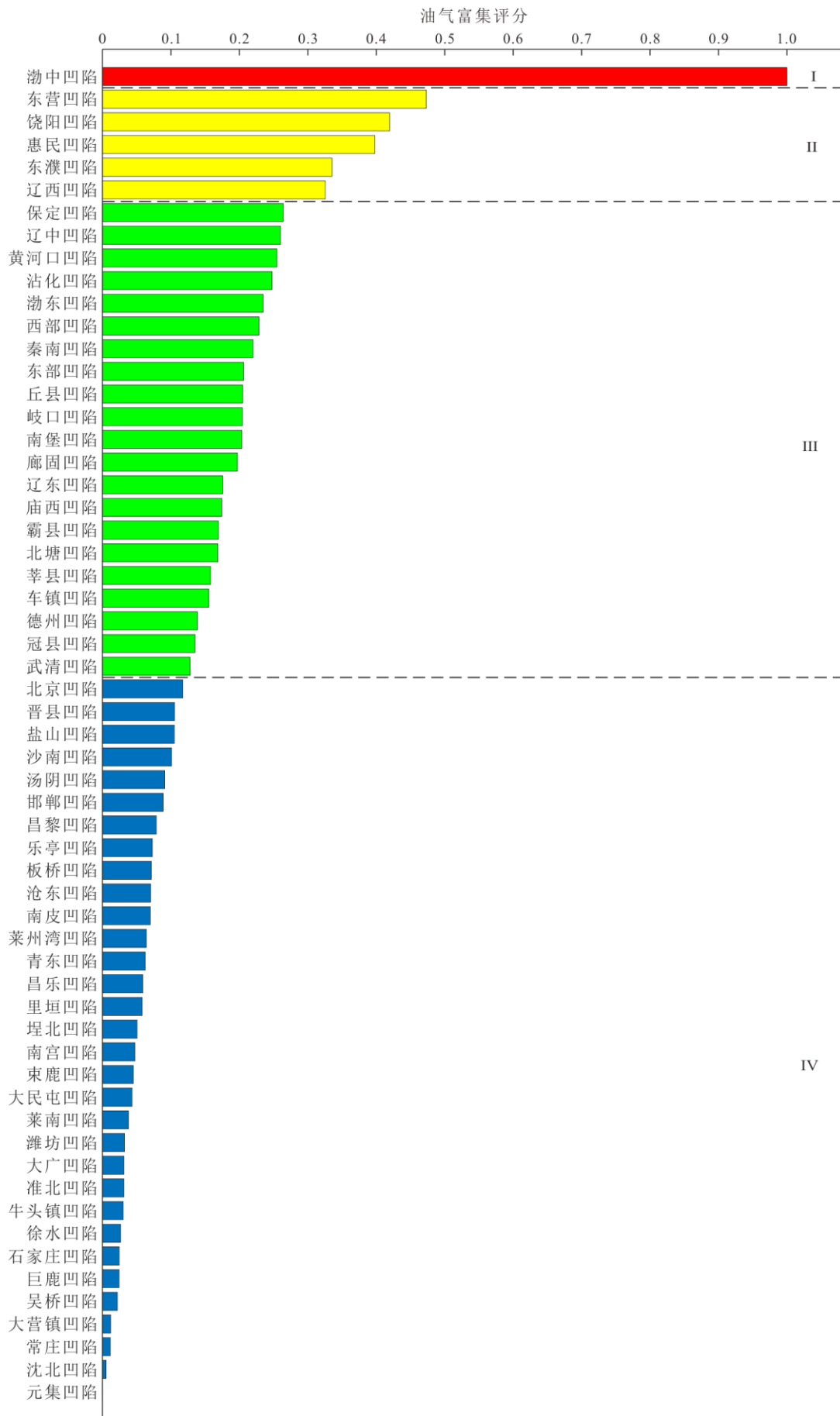


图 13 各凹陷油气评价分区柱状图

Fig.13 Histogram of Oil and Gas Evaluation Zoning for Each Sag

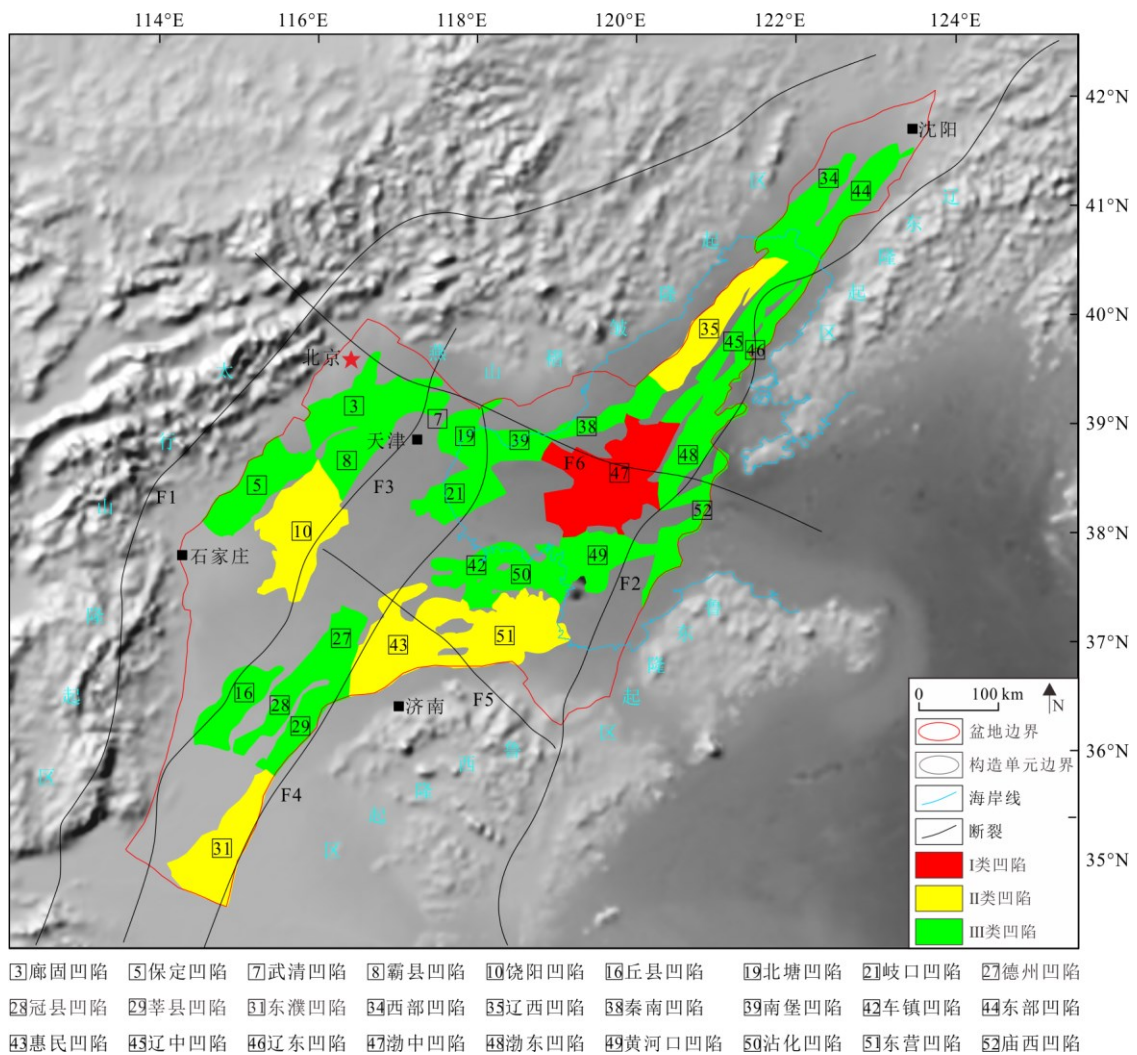


图 14 含油气评价分区平面分布

Fig.14 Planar Distribution of Oil and Gas Evaluation Zoning

评分显著高于其他凹陷，这与其在实际勘探中作为渤海盆地最富烃凹陷的认知一致。而 IV 类凹陷的深部构造活动较弱，油气富集程度较低，因此可考虑减少这些凹陷的生产投入。

张功成等（2000）指出，受深大断裂影响，渤海盆地的油气主要分布在渤中凹陷、辽中凹陷、黄河口凹陷、歧口凹陷等富烃凹陷内。基于资源丰度指标和盆地资源规模预测，袁选俊和谯汉生（2002）将辽西凹陷、辽东凹陷、南堡凹陷和歧口凹陷确定为富烃凹陷。张功成等（2013）通过油源对比和地震相分析识别潜在富烃凹陷，证实辽西凹陷为富烃凹陷。基于富烃凹陷烃源岩生成与演

化的研究，于彪等（2021）证实渤东凹陷和庙西凹陷具有良好的勘探前景。上述具有较好勘探前景的凹陷主要集中在 I 类、II 类和 III 类凹陷，表明研究成果与前人认识基本一致，I 类、II 类和 III 类凹陷适合进行勘探投入。

本研究基于深部地壳构造活动评价发现，油气富集程度较高的凹陷具有明显的断裂带控藏特征，主要沿三条断裂带分布（图 14）：北北东向的郯庐断裂、北东向的兰聊—燕山断裂以及霸县—束鹿—邯郸断裂。其中，沿郯庐断裂带分布的凹陷包括渤中、辽中、辽东、黄河口、辽西、东部、渤东、庙西及西部凹陷；沿兰聊—燕山断裂分布

的凹陷包括北塘、南堡、岐口、车镇、惠民、冠县、莘县、德州及东濮凹陷；沿霸县—束鹿—邯郸断裂分布的凹陷则包括丘县、饶阳、霸县及武清凹陷。

4 结论

(1) 渤海湾盆地断裂体系受“伸展—走滑双动力源”驱动形成，具有多向发育、分级控制、深浅耦合的显著特征，依据断裂分区效应可划分为5个构造单元，深大断裂与次级断裂共同构成了油气运移的重要通道。

(2) 盆地莫霍面与基底呈镜像结构，深部地壳构造存在明显的海陆差异，海域莫霍面更浅、结晶地壳更薄，地幔活动更强烈，为油气生成提供了良好的深部条件。

(3) 基于主成分分析的定量评价结果显示，渤中凹陷是盆地内油气富集潜力最优的凹陷，东营、饶阳等II类凹陷和保定、辽中等III类凹陷为有利勘探区域，具有进一步勘探价值。

(4) 深部地壳构造特征（如莫霍面深度、地壳厚度、拉张因子等）与油气富集程度密切相关，可作为渤海湾盆地及类似盆地油气勘探的重要参考指标，为资源精准勘探提供深部地质依据。

References

Cai, M. K., Wang, W. Y., Zhang, Y. M., et al., 2025. The influence of faults and the Moho interface on the differential hydrocarbon accumulation between marine and terrestrial areas in the Bohai Bay basin. *Acta Geologica Sinica*, 99(5): 1554-1575 (in Chinese with English abstract).

Cai, M. K., Zhang, G. C., Wang, W. Y., et al., 2024. Study on crustal thickness and the prediction of

prolific depressions: The Bohai basin as an example. *Acta Oceanologica Sinica*, 43(5): 1-13.

Chen, G. X., Zhang, M. H., Zhang, S., 2019. Constraint interface inversion with variable density model used in the study of deep structure of Bohai. *Progress in Geophysics*, 34(6): 2406-2413 (in Chinese with English abstract).

Cox, A., Engebretson, D., 1985. Change in motion of Pacific plate at 5 Myr BP. *Nature*, 313(6002): 472-474.

Deng, X. F., Li, H. Q., Gao, R., 2023. Depth migration of crustal-scale seismic reflection profiles: A case study in the Bohai Bay basin. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1-12.

Guan, D. L., Ke, X. P., Wang, Y., 2016. Basement structures of East and South China Seas and adjacent regions from gravity inversion. *Journal of Asian Earth Sciences*, 117: 242-255, doi:10.1016/j.jseaes.2015.12.017.

Hao, T. Y., You, Q. Y., Liu, L. H., et al., 2013. Joint land-sea seismic survey and research on the deep structures of the Bohai Sea areas. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(12): 13-24, doi:10.1007/s13131-013-0383-4.

He, T., Wang, W. Y., Bai, Z. Z., et al., 2023. Integrated gravity and magnetic study on patterns of petroleum basin occurrence in the China seas and adjacent areas. *Acta Oceanologica Sinica*, 42(3): 201-214, doi:10.1007/s13131-022-2139-5.

Hu, Z. W., Xu, C. G., Wang, D. Y., et al., 2019. Superimposed characteristics and genetic mechanism of strike-slip faults in the Bohai Sea, China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(2): 254-267 (in Chinese with English abstract).

Li, C., Chen, S. Y., Pu, X. G., et al., 2024. Stratigraphic Subdivision and Correlation of the Mesozoic in the Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 49(3): 1119-1143 (in Chinese with English abstract).

Li, S. Z., Suo, Y. H., Dai, L. M., et al., 2010. Development of the Bohai Bay basin and destruction of the North China craton. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 64-89 (in Chinese with English abstract).

- Li, Z. H., Zheng, Y. P., Zhi, P. Y., et al., 2015. The new progress of deep seismic survey and crustal structure in southeast of Bohai Sea: Based on the data processing and analysis of OBS2013 line. *Progress in Geophysics*, 30(3): 1402-1409 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. W., Xu, Y., Hao, T. Y., et al., 2006. Seismic tomography and velocity structure in the crust and upper mantle around Bohai Sea area. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(3): 797-804 (in Chinese with English abstract).
- Liang, J. T., Wang, H. L., Bai, Y., et al., 2016. Cenozoic tectonic evolution of the Bohai Bay basin and its coupling relationship with Pacific Plate subduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 127: 257-266.
- Liang, W., Li, J., Xu, X., et al., 2020. A High-Resolution Earth's Gravity Field Model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, Satellite Altimetry, and EGM2008. *Engineering*, 6(8): 860-878, doi:10.1016/j.eng.2020.05.008.
- Lu, Z. X., Jiang, X. Q., Bai, Y., et al., 1999. Structural characteristics of crust and upper mantle and inhomogeneity of the medium in Jiaoliao and Bohai regions. *North China Earthquake Sciences*, 17(2): 43-51 (in Chinese with English abstract).
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G., et al., 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6(1): 121-142, doi:10.1111/j.1440-1738.1997.tb00043.x.
- Mi, L. J., Zhang, G. C., Liu, Z. F., et al., 2023. Discussion on the development mechanism of lacustrine high-quality source rocks in oil-rich sags in offshore China. *Acta Petrolei Sinica*, 44(3): 405-419, 509 (in Chinese with English abstract).
- Qi, J. F., Zhang, Y. W., Lu, K. Z., et al., 1995. Extensional pattern and dynamic process of the Cenozoic rifting basin in the Bohai Bay. *Experimental Petroleum Geology*, 17(4): 316-323 (in Chinese with English abstract).
- Shao, X. Z., Zhang, J. R., Yin, X. H., 1999. Oil-gas exploration and study of deep crustal structure. *Petroleum Exploration and Development*, 26(2): 11-14 (in Chinese with English abstract).
- Suo, Y. H., Li, S. Z., Yu, S., et al., 2014. Cenozoic tectonic migration and basin evolution in East Asia and its continental margins. *Journal of Asian Earth Sciences*, 88: 28-40.
- Teng, J. W., Wang, Q. S., Liu, Y. L., et al., 1983. The characteristics of geophysical field and the distribution and formation of oil-and gas-bearing basin in eastern China. *Chinese Journal of Geophysics*, 26(4): 319-330 (in Chinese with English abstract).
- Vasanthi, A., Santosh, M., 2021. Overview of regional gravity field computation models and application of a novel method in imaging the lithospheric architecture and destruction of the North China craton. *Earth-Science Reviews*, 215: 103548.
- Xia, Q. L., Xu, C. G., 2016. New geological understandings and major hydrocarbon discoveries in the complex fault zone of Bohai Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 37(S1): 22-33 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y. A., Wang, F. L., Tang, G. M., et al., 2020. Geological condition and exploration prospect of shale oil and gas in the Bohai Sea. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 696-709 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y. A., Lü, D. Y., Hu, Z. W., et al., 2021. Tectonic development of subtle faults and exploration in mature areas in Bohai Sea, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(2): 233-246 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y. A., Hu, A. W., Wan, L., et al., 2025. Accumulation Process and Phase Control Factors of Large Natural Gas Reservoirs in the Oil-Prone Bohai Bay Basin, East China. *Earth Science*, 50(2): 377-387 (in Chinese with English abstract).
- Yang, K. J., Qi, J. F., Yu, Y. X., et al., 2016. Fault-related folds in Bohai Bay and its significance of hydrocarbon accumulation. *Oil Geophysical Prospecting*, 51(3): 625-636+420 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Jiang, F. J., Wen, S. Y., 2024. Statistical characteristics and prediction model of oil and

- gas resource abundance in key basins in China. *China Petroleum Exploration*, 29(3): 170-180 (in Chinese with English abstract).
- Ye, T., Wang, D. Y., Niu, C. M., et al., 2022. Mesozoic tectonic evolution of the southwestern Bohai Sea and its dynamic mechanism: Implications for the destruction of the North China craton. *Earth Science Frontiers*, 29(5): 133-146 (in Chinese with English abstract).
- Yu, B., Liu, J. L., Yang, G. L., et al., 2021. Hydrocarbon generation characteristics and significance of source rock in different oil-rich depressions in the eastern part of the Bohai Sea. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(4): 104-114, 130 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, X. J., Qiao, H. S., 2002. Exploration of subtle reservoir in prolific depression of Bohai Bay basin. *Oil & Gas Geology*, 23(2): 130-133 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. F., Meng, X. J., Han, B., et al., 2019. Gravity-magnetic anomalies of Liaodong Bay and their tectonic implications. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(3): 104-112 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., 2000. Tectonic framework and prolific hydrocarbon depressions in Bohai Bay. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 14(2): 93-99 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Liang, J. S., Xu, J. Y., et al., 2013. An evaluation method of potential hydrocarbon-rich sags and their source rock identification offshore China. *China Offshore Oil and Gas*, 25(1): 13-19 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Tong, D. J., Chen, K., et al., 2024. Tectonic evolution and source rocks development of the super oil-rich Bohai Bay Basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(3): 1-15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. Z., 1997. Major Nonmarine Oilfields of China. Beijing: Petroleum Industry Press, 32-36 (in Chinese).
- Zhang, Y. M., Wang, W. Y., Li, L. Z., et al., 2023. Influence of the Moho surface distribution on the oil and gas basins in China seas and adjacent areas. *Acta Oceanologica Sinica*, 42(3): 167-188, doi:10.1007/s13131-022-2136-8.
- Zhu, R. X., Xu, Y. G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1565-1587.
- Zhu, W. L., Mi, L. J., Gong, Z. S., et al., 2009. Oil and Gas Reservoir Formation and Exploration in the Bohai Sea Region. Beijing: Science Press, 11-12 (in Chinese).

中文参考文献

- 蔡梦轲, 王万银, 张义蜜, 等, 2025. 渤海湾盆地断裂与莫霍面对油气富集海陆差异性的影响. *地质学*, 99(5): 1554-1575.
- 陈光希, 张明华, 张盛, 2019. 约束变密度界面反演法在渤海深部结构研究中的应用. *地球物理学进展*, 34(6): 2406-2413.
- 胡志伟, 徐长贵, 王德英, 等, 2019. 渤海海域走滑断裂叠合特征与成因机制. *石油勘探与开发*, 46(2): 254-267.
- 李晨, 陈世悦, 蒲秀刚, 等, 渤海湾盆地中生代地层划分与对比. *地球科学*, 49(3): 1119-1143.
- 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等, 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏. *地学前缘*, 17(4): 64-89.
- 李祖辉, 郑彦鹏, 支鹏遥, 等, 2015. 渤海东南部深地震探测与地壳结构研究新进展——OBS2013剖面数据处理分析. *地球物理学进展*, 30(3): 1402-1409.
- 李志伟, 胥颐, 郝天珧, 等, 2006. 环渤海地区的地震层析成像与地壳上地幔结构. *地球物理学报*, 49(3): 797-804.
- 卢造勋, 蒋秀琴, 白云, 等, 1999. 胶辽渤海地区地壳上地幔结构特征与介质的横向非均匀性. *华北地震科学*, 17(2): 43-51.
- 米立军, 张功成, 刘志峰, 等, 2023. 中国近海富油凹陷湖相优质烃源岩发育机制. *石油学报*, 44(3): 405-419, 509.
- 漆家福, 张一伟, 陆克政, 等, 1995. 渤海湾新生代裂陷盆地的伸展模式及其动力学过程. *石油实验地质*, 17(4): 316-323.
- 邵学钟, 张家茹, 殷秀华, 1999. 油气勘探与地壳深部构造研究. *石油勘探与开发*, 26(2): 11-14.
- 滕吉文, 王谦身, 刘元龙, 等, 1983. 中国东部地

- 区的地球物理场特征与含油气盆地的分布和形成.地球物理学报, 26 (4): 319-330.
- 夏庆龙, 徐长贵, 2016. 渤海海域复杂断裂带地质认识创新与油气重大发现.石油学报, 37 (S1): 22~33.
- 薛永安, 王飞龙, 汤国民, 等, 2020.渤海海域页岩油气地质条件与勘探前景.石油与天然气地质, 41(4):696-709.
- 薛永安, 吕丁友, 胡志伟, 等, 2021.渤海海域隐性断层构造发育特征与成熟区勘探实践.石油勘探与开发, 48 (2): 233-246.
- 薛永安, 胡安文, 万琳, 等, 2025.渤海湾油型盆地深层大型气藏成藏过程与相态控制因素.地球科学, 50(2): 377-387.
- 杨克基, 漆家福, 余一欣, 等, 2016.渤海湾地区断层相关褶皱及其油气地质意义.石油地球物理勘探, 51 (3): 625-636, 420.
- 杨舒越, 姜福杰, 温思远, 2024.中国重点盆地油气资源丰度统计特征及预测模型建立.中国石油勘探, 29 (3): 170-180.
- 叶涛, 牛成民, 王德英, 等, 2022.渤海西南海域中生代构造演化、动力学机制及其对华北克拉通破坏的启示.地学前缘, 29 (5): 133-146.
- 于彪, 刘建良, 杨贵丽, 等, 2021.渤海海域东部不同富油凹陷烃源岩生烃特征差异及意义.地质科技通报, 40(4): 104-114, 130.
- 袁选俊, 谯汉生, 2002.渤海湾盆地富油气凹陷隐蔽油气藏勘探.石油与天然气地质, 23(2):130-133.
- 张菲菲, 孟祥君, 韩波, 等, 2019.辽东湾地区重、磁异常特征及其区域构造分析.海洋地质与第四纪地质, 39 (3): 104-112.
- 张功成, 2000.渤海海域构造格局与富生烃凹陷分布.中国海上油气(地质), 14(2):93-99.
- 张功成, 梁建设, 徐建永, 等, 2013.中国近海潜在富烃凹陷评价方法与烃源岩识别.中国海上油气, 25(1):13-19, 102.
- 张功成, 佟殿君, 陈凯, 等, 2024.渤海湾超级油盆构造演化及其烃源岩发育.石油勘探与开发, 51 (3): 1-15.
- 张文昭, 1997.中国陆相大油田.北京: 石油工业出版社, 32-36.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等, 2012.华北克拉通破坏.中国科学: 地球科学, 42 (8): 1135-1159.
- 朱伟林, 米立军, 龚再升, 等, 2009.渤海海域油气成藏与勘探.北京: 科学出版社, 11-12.

作者贡献度说明 相鹏: 负责概念构思、方法设计与数据分析工作, 撰写论文初稿; 陈学国: 主导项目管理, 参与概念构思及论文审阅修订; 孟令玮: 承担数据分析与可视化呈现任务, 参与论文初稿撰写; 吴微: 协助开展数据收集、数据分析, 参与论文修订; 郭涛: 参与数据分析与可视化呈现相关工作; 冯国志: 参与数据分析与可视化呈现相关工作; 刘海涛: 提供技术支持并给出关键反馈意见; 李竹强: 参与方法设计与数据分析工作.