

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.442>



# 渤海海域低熟油特征及发育前景：以辽西南洼为例

李 威, 高玉飞\*, 李友川

中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

**摘要:** 渤海湾盆地渤海海域油气地球化学参数显示部分构造带普遍发育低熟油气, 但是一直被忽略而未系统开展低熟油气成因及资源潜力的研究. 选取辽东湾坳陷作为研究对象, 结合不同构造单元油藏, 系统分析低熟油特征, 研究烃源岩生成低熟油气的潜力和前景. 结果表明: (1) 辽东湾坳陷发育低熟油, 其中以辽西南洼陡剖带油藏低熟油最为典型, 具有高密度、高酸值、高胶质+沥青质的特征, 奇偶优势明显, 倍半萜烷系列完整, 伽马蜡烷指数较高, 与辽西凸起带、辽中中洼带油藏具有明显差异, 低熟油主要来源于紧邻的辽西南洼咸水湖相烃源岩; (2) 咸水烃源岩具有独特的双峰生排烃特征, 在低成熟演化阶段就生成大量富含胶质、沥青质的液态烃, 具备丰富的低熟油资源潜力和广阔前景.

**关键词:** 渤海海域; 辽东湾坳陷; 低熟油藏; 倍半萜烷; 双峰生烃; 石油地质学.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2025)01-172-09

收稿日期: 2022-09-23

## Characteristics and Development Prospect of Low-Mature Oil in Bohai Sea: A Case Study of South Liaoxi Depression

Li Wei, Gao Yufei\*, Li Youchuan

CNOOC Research Institute Co. Ltd., Beijing 100028, China

**Abstract:** Organic geochemical analysis in Bohai Sea area of Bohai Bay Basin reveals that low-mature oil and gas are widely found in some structural belts, but the genesis and resource potential of low-mature oil and gas have been ignored and not systematically studied. Taking Liaodong Bay Depression as the research object, the characteristics of low-mature oil are systematically analyzed in combination with different structural unit reservoirs, and the potential and prospect of low-mature oil and gas generation from source rocks are studied. The results show that: (1) Low-mature oil is developed in the Liaodong Bay Depression. The reservoirs in the steep slope belt of South Liaoxi Depression are characterized as belonging to the typical low-mature oil reservoir, with the characteristics of the high density, high acid value, high colloid and high asphaltene, odd-even obvious advantages, and the C<sub>14</sub>-C<sub>16</sub> sesquiterpenes series are complete, with higher gammacerane index. It is obviously different from the reservoirs in the Liaoxi uplift belt and the Liaozhong Depression, immature oil mainly source from saltwater lacustrine source rocks in South Liaoxi Depression. (2) The saltwater source rocks have unique characteristics of double peak hydrocarbon generation, and a large amount of liquid hydrocarbon rich in colloid and asphaltene is generated in the low mature evolution stage, which has rich potential and broad prospects of low mature oil resources.

**Key words:** Bohai Sea; Liaodong Bay Depression; low-mature oil reservoir; sesquiterpenes; double peak hydrocarbon generation; petroleum geology.

**基金项目:** 中海油重大专项 (No. KJGG2021-0300); 中海油研究总院科技课题 (No. 2020-KT-ZYZL-5); 中海油青年科技与管理创新研究课题 (No. JZTW2019KJ02).

**作者简介:** 李威 (1988-), 男, 博士, 从事油气藏形成与分布方面的研究. ORCID: 0000-0002-1173-2675. E-mail: liwei173@cnooc.com.cn

\* **通讯作者:** 高玉飞, E-mail: gaoyf5@cnooc.com.cn

**引用格式:** 李威, 高玉飞, 李友川, 2025. 渤海海域低熟油特征及发育前景: 以辽西南洼为例. 地球科学, 50(1): 172-180.

**Citation:** Li Wei, Gao Yufei, Li Youchuan, 2025. Characteristics and Development Prospect of Low-Mature Oil in Bohai Sea: A Case Study of South Liaoxi Depression. *Earth Science*, 50(1): 172-180.

## 0 引言

辽东湾是渤海海域重要的油气产区和未来增长量的后备区之一,30余年勘探在辽西低凸起上发现多个油气田和含油气构造.在紧靠辽西南洼的辽西低凸起南部油气藏呈带状、块状分布,油藏紧邻辽西大断层.对于辽西低凸起南部富集的油藏,国内外众多学者对其油气成因和来源开展了相关研究(肖锦泉等,2014;张友等,2014;杨宝林等,2015;王飞龙等,2016,2019;徐长贵等,2016;王冰洁等,2017,2019;黄雷等,2019),油源层系判别上普遍认为油气主要来源于沙河街组烃源岩,而对于断层两侧不同油藏的异同以及平面上的供烃次洼来源则一直没有准确、清晰的认识.目前辽西南洼钻井较少且油气显示较弱,普遍认为辽西南洼资源潜力有限.

笔者利用成熟度参数分别对辽西大断层两侧油藏、辽中中洼油藏原油成熟度进行计算,发现辽西大断层西侧油藏主要为低熟油,而辽西大断层东侧油藏、辽中中洼油藏原油主要为成熟原油,即紧邻辽西南洼的辽西大断层西侧油藏具有低熟油属性,具备发育低熟油气的潜力和前景.据此,本文对典型低熟油藏深入分析研究,并通过纵横向与相邻构造带油藏进行对比,进而总结低熟油的特征及其与相邻构造带成熟油气的差异;同时对辽东湾坳陷烃源岩进行整体评价,分析辽东湾坳陷低熟油发育的条件和潜力,客观评价低熟油气资源潜力,为渤海海域未来的勘探领域和方向提供一定的理论支撑.

## 1 地质概况

辽西凹陷位于渤海湾盆地辽东湾坳陷西部,是下辽河西部凹陷向渤海海域的自然延伸,呈北东-南西走向的箕状凹陷,属于渤海湾盆地北部的一个Ⅲ级构造单元,面积约3500 km<sup>2</sup>;东断西超,东侧依次为辽西低凸起、辽中凹陷、辽东凸起及辽东凹陷,辽西凹陷和辽中凹陷为辽东湾的2个主力生烃凹陷(李强等,2018;牛成民等,2019;赵婷婷等,2020;刘艺萌等,2022).郯庐断裂带营潍段经过辽中凹陷,其西支发育的辽西1号、辽西2号和辽西3号3条大断裂将辽西凹陷和辽中凹陷分隔开来,形成相对独立的2个生烃凹陷,辽西凹陷可进一步分为北部洼陷、中部洼陷和南部洼陷3个次级构造单元(张婧等,2017;李伟等,2019)(图1a).各洼陷均经历了断陷期、断拗期和拗陷期3个演化阶段(郑荣才等,2009),从早到晚依次发育古近系沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组和平原组,其中烃源岩主要是沙河街组第四段、第三段、第一段(分别简称为“沙四段、沙三段、沙一段”)和东营组第三段(简称“东三段”)泥岩(图1b).辽西南洼油藏主要发育在辽西大断层两侧,分别为SZ36油藏、LD5油藏、LD4油藏,3个油藏主力油层分布在东二段下亚段,原油密度在0.96 g/cm<sup>3</sup>左右,主要为稠油,含蜡量为2.3%左右,属于低蜡高密度稠油(王飞龙等,2019).SZ36油藏、LD5油藏、LD4油藏赋存深度及平面分布有所差异,LD5油藏、LD4油藏位于辽西大断层西侧,SZ36油藏位于辽西大断层东侧(图1),油藏纵向赋存层位及深度上,LD4、LD5东二段下亚段油藏位于SZ36油藏之下(图2).

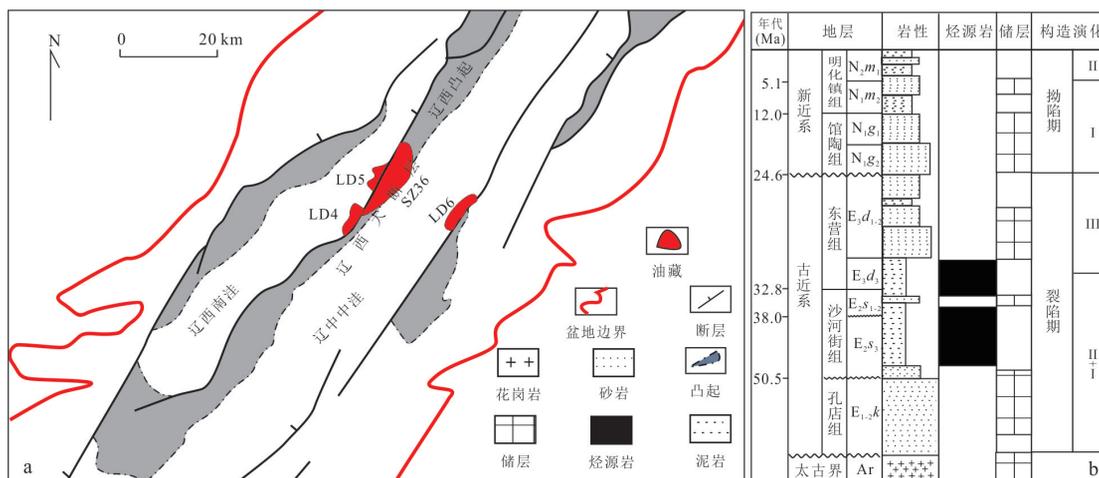


图1 辽西南洼区域分布图(a)及地层柱状图(b)

Fig.1 Regional distribution map (a) and stratigraphic columnar map (b) in South Liaoxi Depression

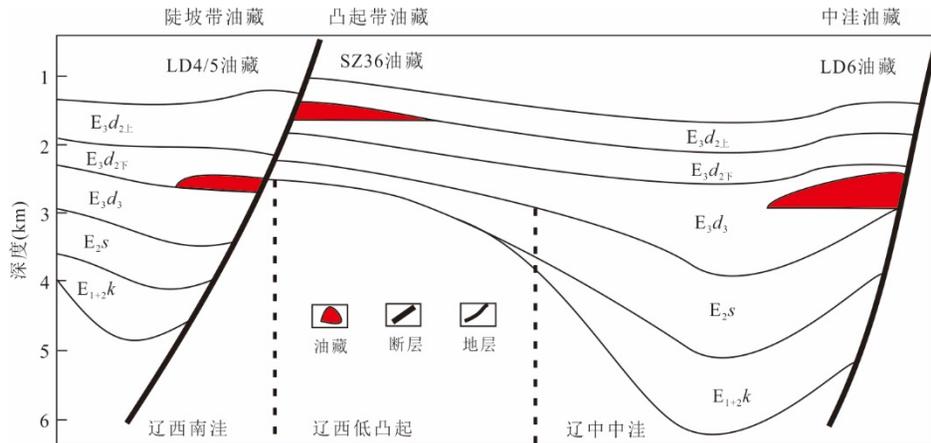


图2 辽西南洼、辽中中洼油藏剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram of reservoir profile in South Liaoxi Depression and Central Liaozhong Depression

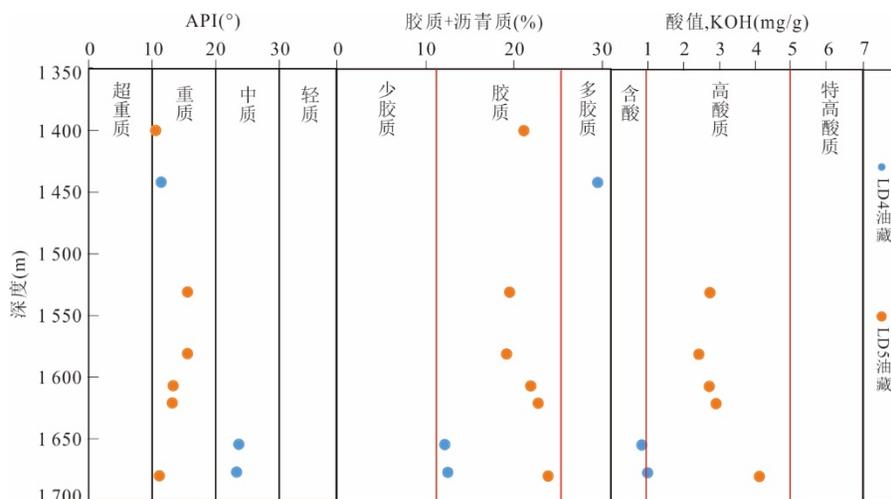


图3 辽西南洼陡坡带油藏物性分布

Fig.3 Reservoir property distribution of steep slope belt in South Liaoxi Depression

## 2 实验样品及方法

围绕辽西南洼、辽中中洼油藏群,选取了辽西南洼陡坡带LD4油藏3个原油样品、辽西南洼陡坡带LD5油藏东二段下亚段3个原油样品、辽西低凸起SZ36油藏5个原油样品和辽中中洼LD6油藏4个原油样品;所有样品统一开展饱和烃色谱、饱和烃色谱-质谱等地球化学实验分析.实验过程据李威等(2021b).饱和烃色谱-质谱分析条件:Agilent 6890N-5975IMSD色谱/质谱仪,色谱柱为HP-5MS,30 m×0.25 mm×0.25 μm;汽化室温度为300℃,脉冲不分流进样;载气为N<sub>2</sub>,流速为1.0 mL/min;升温程序为50℃恒温1 min,以20℃/min升至100℃,再以3℃/min至315℃,恒温18 min;质谱采用EI电离方式,电子能量为70 eV.

## 3 结果与讨论

### 3.1 低熟油特征

发育于辽西大断层西侧的辽西南洼陡坡带LD4、LD5东二段下亚段油藏原油API分布在10°~25°之间,密度大,属于中质-重质稠油系列,酸值分布在1~3 mgKOH/g,属于含酸-高酸值原油,含蜡量小于10%,属于低蜡-含蜡原油,富含胶质、沥青质,胶质+沥青质含量分布在10%~30%之间.从原油物性和深度关系图上可以看出,原油密度、含蜡量、酸值、胶质+沥青质与深度没有明显的相关性,表明原油没有经历气洗等次生改造作用(图3).从原油总离子流图来看(图4),正构烷烃完整、基线平直,表明原油保存完好、未遭受降解作用,结合前文原油“三高”物性的描述,说明原油高密度、高酸

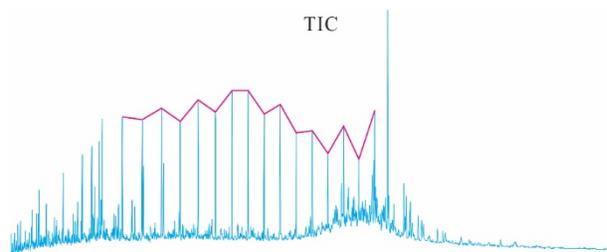


图 4 辽西凹陷陡坡带油藏原油总离子流图

Fig.4 TIC of oil reservoir in steep slope zone in Liaoxi Depression

值、高胶质+沥青质,属于原生成因;从总离子流图上也可以看出正构烷烃呈锯齿状,奇偶优势明显, OEP=1.3,属于低熟油,萜烷系列、甾烷系列等分子化合物在总离子流图上清晰可见,也说明原油成熟度不高.因此综合判断,陡坡带原油属于原生低熟稠油,胶质、沥青质、高酸值具有明显的母源继承性,原油总离子流图中高含量的萜烷系列、甾烷系列化合物为胶质、沥青质中生物标志物的表现.

### 3.2 不同构造带油藏对比

自西向东对辽西南洼陡坡带 LD4、LD5 东二段下亚段油藏、辽西低凸起带 SZ36 油藏、辽中中注

LD6 油藏进行解剖对比,三者油藏之间的位置关系如图 2.LD4、LD5 东二段下亚段油藏(下文统一称为“陡坡带油藏”)位于辽西大断裂西侧紧邻辽西南洼, SZ36 油藏位于辽西低凸起上(下文统一称为“凸起带油藏”),油藏东部分布在辽中中注斜坡带、西部以辽西大断层为界与辽西南洼相接, LD6 油藏位于辽中中注东斜坡带(下文统一称为“辽中中注油藏”).本文主要利用倍半萜烷、萜烷、甾烷等生物标志化合物系列进行精细区分和对比(图 5).在萜烷系列和倍半萜烷系列组合中,陡坡带油藏原油都表现出倍半萜烷系列含量明显高于凸起带油藏和辽中中注油藏原油,而该组合中 3 个油藏带原油萜烷系列均表现出以 C<sub>30</sub>H 为主峰的分布趋势.在甾烷系列和倍半萜烷系列组合中也表现出辽西陡坡带油藏原油倍半萜烷系列相对含量更高.在倍半萜烷系列中,3 个油藏带表现出更明显的差异性,其中陡坡带油藏原油具有完整的倍半萜烷系列,发育 C<sub>14</sub>倍半萜烷系列峰(峰①)、C<sub>15</sub>倍半萜烷系列前峰(峰②)、C<sub>15</sub>倍半萜烷系列+补升烷系列峰(峰③)、升补升烷系列峰(峰④),共计 4 个峰型且均是正态型.但是在辽西凸起带、辽中中注带油藏缺失 C<sub>14</sub>倍半萜烷系列

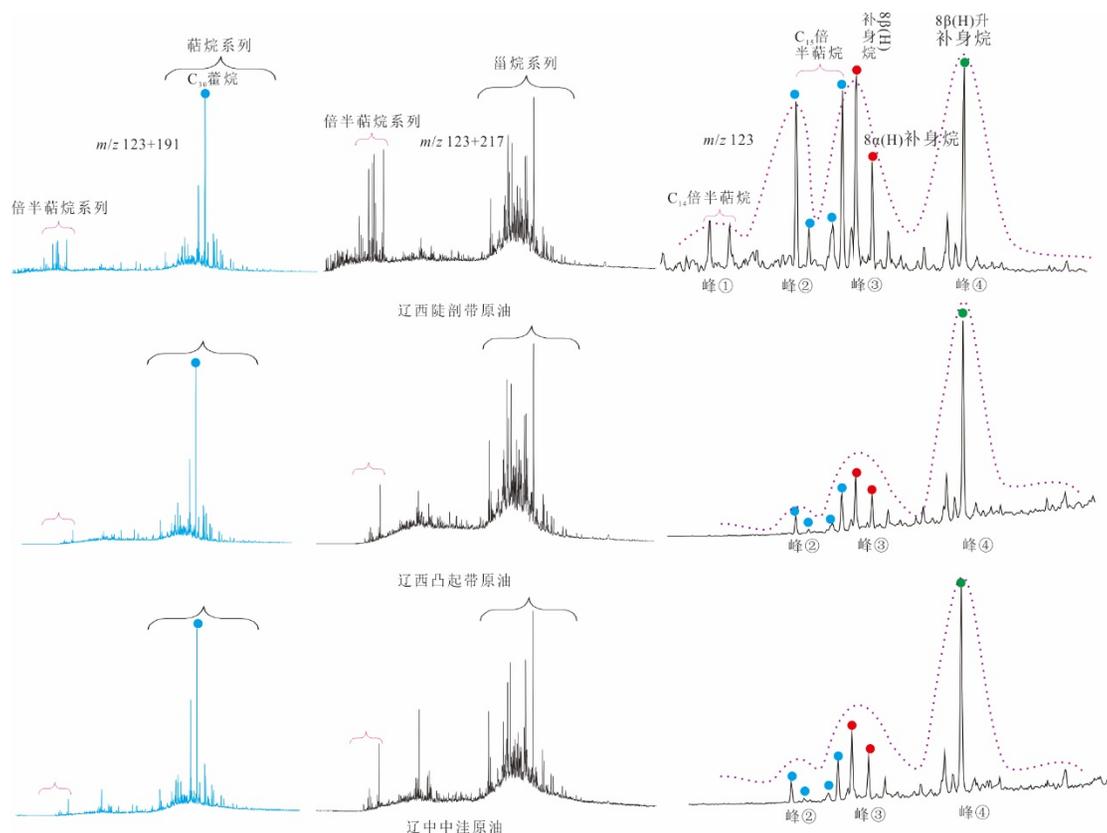


图 5 辽西南洼陡坡带、辽中中注、辽西凸起带原油色谱-质谱图

Fig.5 GC-MS of crude oil in South Liaoxi Depression, Central Liaozhong Depression and uplift zone of Liaoxi Depression

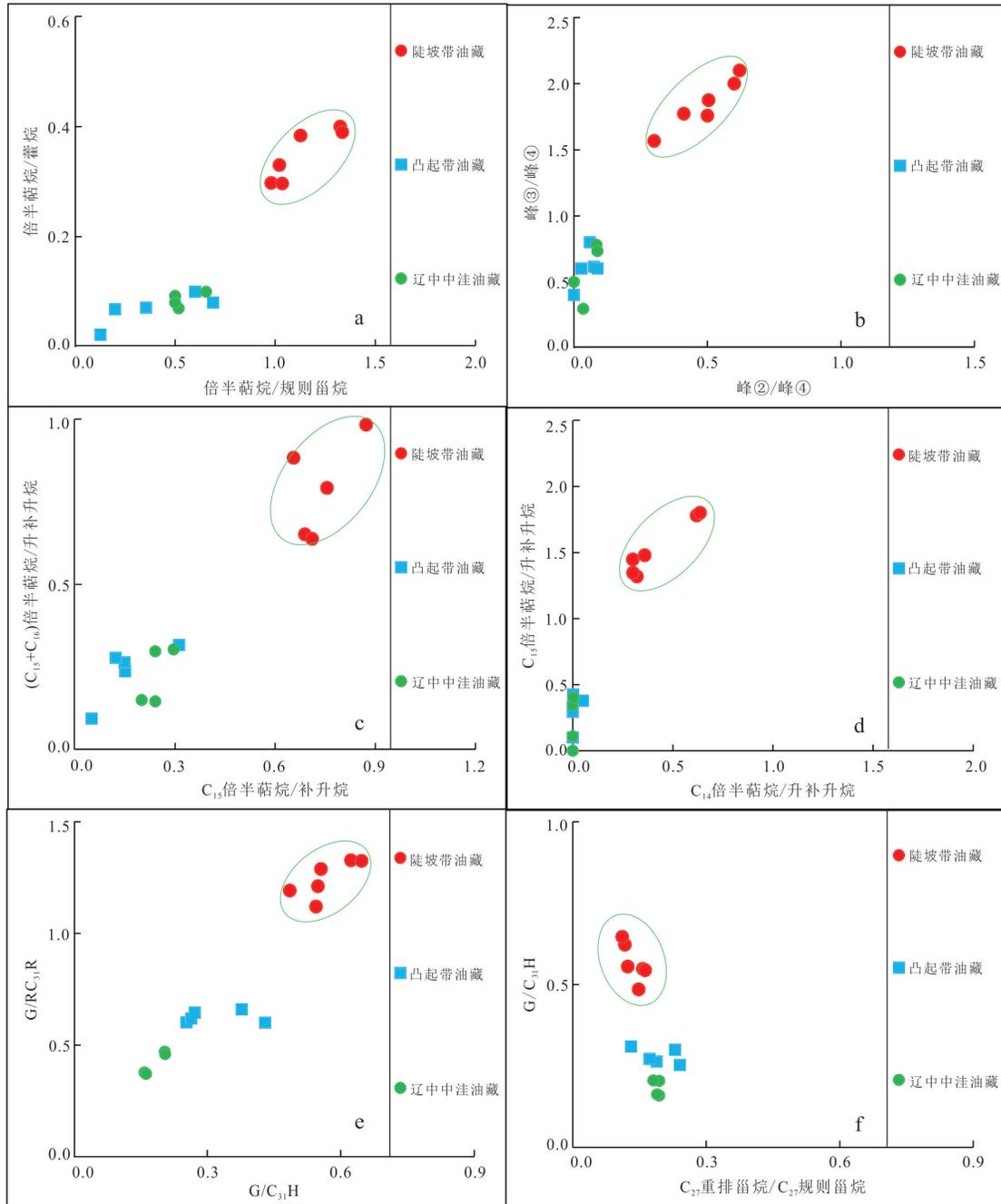


图 6 辽西南洼陡坡带、辽中中洼、辽西凸起带原油地化参数对比

Fig.6 Comparison of geochemical parameters of crude oil in South Liaoxi Depression, Central Liaozhong Depression and uplift zone of Liaoxi Depression

峰,即图中峰①,而 $C_{15}$ 倍半萜烷系列前峰(峰②)含量也明显低于辽西南洼陡坡带油藏原油.在 $C_{15}$ 倍半萜烷系列+补升烷系列构成的峰③中,虽然均是正态型分布,但是相较于峰面积所构成的含量比例也明显低于辽西南洼陡坡带油藏原油.

进一步利用倍半萜烷系列、萜烷系列、甾烷系列参数对3个油藏带进行分析对比.3个油藏带在倍半萜烷系列与藿烷系列、甾烷系列的整

体含量上差异明显(图6a),位于辽西南洼的陡坡带油藏倍半萜烷/藿烷参数值高于0.3、倍半萜烷/规则甾烷参数值高于1.0,而位于辽西低凸起带的SZ36油藏和辽中中洼的LD6油藏倍半萜烷/藿烷参数值一致,均低于0.2,倍半萜烷/规则甾烷参数值均低于0.9,即辽西南洼陡坡带油藏倍半萜烷在萜烷系列、甾烷系列中的含量明显高于辽西低凸起带油藏和辽中中洼油藏.

从图5色谱-质谱图直观对比中发现3个油藏带的倍半萜烷系列中各峰之间的差异更加明显,辽西南洼陡坡油藏带发育 $C_{14}$ 倍半萜烷系列峰(峰①),而辽西低凸起带油藏和辽中中洼油藏不发育峰①,且其他3个峰的含量差异也比较明显.以升补升烷系列峰(峰④)为标准,利用3个峰的相对比值对油藏进行对比(图6b),发现辽西南洼陡坡带油藏峰②/峰④参数值高于0.3,而辽西低凸起带油藏和辽中中洼油藏峰②/峰④参数值低于0.1.进一步利用峰③/峰④参数进行对比,发现辽西南洼陡坡带油藏原油参数高于1.5,而辽西低凸起带油藏和辽中中洼油藏原油参数低于1.0.利用 $C_{14}$ 倍半萜烷系列、 $C_{15}$ 倍半萜烷系列、 $C_{15}$ 倍半萜烷系列+ $C_{16}$ 倍半萜烷系列与补升烷、升补升烷系列的相对比值参数对3个油藏带进行区分(图6c、6d),辽西南洼陡坡带油藏具有高含量的 $C_{14}$ 倍半萜烷系列、 $C_{15}$ 倍半萜烷系列、 $C_{15}$ 倍半萜烷系列+ $C_{16}$ 倍半萜烷系列、 $C_{15}$ 倍半萜烷+ $C_{16}$ 倍半萜烷/升补升烷参数值高于0.5, $C_{15}$ 倍半萜烷/升补升烷参数值高于1.0;而辽西低凸起带油藏和辽中中洼油藏中相关参数均表现为相对较低值.同时在藿烷系列、甾烷系列中3个油藏带也具有较为明显的差异(图6e、6f),辽西南洼陡坡带油藏表现出较高含量的伽马蜡烷(G),重排甾烷系列含量相对较低;而辽西低凸起带油藏和辽中中洼油藏中相关参数正好相反.

综合分析认为,辽西南洼陡带油藏普遍发育倍半萜烷, $C_{14}$ 倍半萜烷系列、 $C_{15}$ 倍半萜烷系列、 $C_{16}$ 倍半萜烷系列完整,发育高碳数长链三环萜烷,藿烷系列中伽马蜡烷发育,甾烷系列中重排甾烷系列含量相对较低. $C_{14}$ - $C_{16}$ 倍半萜烷往往表征细菌等有机来源(Bao *et al.*, 2016),高碳数长链三环萜烷表征低等水生生物来源,伽马蜡烷代表水体盐度分层或者水体偏咸,低重排甾烷表明沉积时期水体黏土含量较低(李威等, 2017, 2021a, 2021b, , 2022),即物源供给不充足,主要为自源型生物;由此认为辽西南洼陡带油藏综合表现出的生物标志化合物组合代表了其有机质母源形成时期水体咸,形成烃源岩的主要生物为低等水生生物,沉降后期受细菌活动改造强烈.

从LD5东二段下亚段油藏、LD4东二段下亚段油藏赋存空间来看(图2),在辽西大断层作为通源断层的作用下,辽西南洼烃源岩对分布在辽西大断层西侧陡坡带连片分布的油藏具有天然的优势;而

位于辽西低凸起带的SZ36油藏成熟度明显高于陡坡带LD5东二段下亚段油藏、LD4东二段下亚段油藏,且油藏属于常压系统、存在25-降藿烷系列,盖层质量一般,油气通过辽西低凸起带往下运移进入陡坡带的可能性大大降低;陡坡带LD5东二段下亚段油藏、LD4东二段下亚段油藏表现出的低熟油特征代表了辽西南洼的重要贡献.同时对辽西南洼失利井进行分析,发现失利井基本都位于远离凹陷的西南凸起带或者西部斜坡带,鉴于低熟油气生排烃的独特性,低熟油气往往具有就近运移成藏的特征.从源控的角度来看,辽西南洼发育的咸水烃源岩在早期发生了一次大规模的生排烃活动,生成了大量的低熟油气,并就近聚集成商业性油气藏.

### 3.3 低熟油潜力

渤海湾盆地渤海海域烃源岩主要发育沙三段、沙一段、东三段烃源岩,其中沙一段沉积时期,蒸发作用较强,水体较咸,广泛发育咸水烃源岩,且该时期碎屑等物源供给不充分,有机质来源主要为咸水环境下的浮游生物等.前人研究认为渤海海域沙一段烃源岩普遍发育高含量的甲藻甾烷(傅宁, 1995);也证实了在沙一段沉积期主要为咸水环境,形成烃源岩的有机质主要以自生浮游藻类为主.选取辽东湾坳陷沙一段烃源岩,利用生烃潜力、沥青“A”与 $R_o$ 的相关关系分析其生排烃特征.生排烃自然演化图显示(图7),随着热演化程度的增加,自上而下沥青“A”、总烃、总烃/TOC含量迅猛增加,随后逐渐下降,之后再次增加,然后再次下降,表现出两升两降的特征;对应于热演化 $R_o$ 上,高值点分布在 $R_o < 0.6\%$ 、 $R_o > 0.6\%$ 两个区间.对于国内外广泛发育的淡水湖相烃源岩,沥青“A”、总烃、总烃/TOC往往都只在 $R_o > 0.6\%$ 的区间上有一个高峰,即成熟阶段的生油高峰;与之对比,辽东湾凹陷沙一段烃源岩( $E_2s^1$ )沥青“A”、总烃、总烃/TOC含量在演化早期单独存在一个明显的生排烃高峰.从演化剖面来看,烃源岩处于未熟-低熟阶段(0.4%~0.6%),该时期沙一段烃源岩埋深较浅,对应深度在1400m左右;说明辽东湾凹陷发育于咸水环境下的沙一段烃源岩具备早生早排低熟油的特征,代表了沙一段咸水湖相烃源岩相较于传统的淡水湖相烃源岩的单峰生排烃,具有独特的双峰生排烃特征.

结合前文来看,辽东湾坳陷在辽西南洼一带已发现商业性低熟油气藏LD4、LD5东二段下亚段油藏,表明辽东湾为代表的渤海海域具备

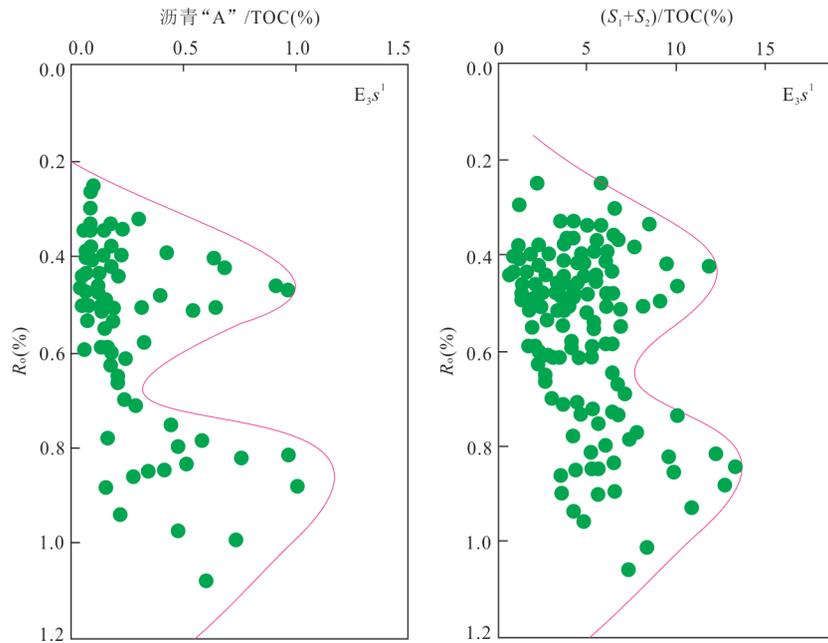


图 7 辽东湾坳陷烃源岩生排烃演化图

Fig.7 Natural hydrocarbon generation and expulsion profile of source rocks in Liaodong Bay Depression

丰富的低熟油资源潜力和广阔前景。

## 4 结论

辽西南洼陡剖带油藏属于典型的低熟油藏,普遍发育倍半萜烷系列, $C_{14}$ 倍半萜烷、 $C_{15}$ 倍半萜烷、 $C_{16}$ 倍半萜烷完整,伽马蜡烷发育,重排甾烷系列含量相对较低。辽西凸起带、辽中中洼带油藏缺失 $C_{14}$ 倍半萜烷系列,倍半萜烷系列含量明显低于辽西南洼陡坡带油藏。

辽东湾坳陷咸水烃源岩沥青“*A*”、总烃、总烃/TOC含量随着演化程度的增加在未熟-低熟、成熟阶段均发育有生烃高峰,具有独特的双峰生排烃特征,具备丰富的低熟油资源潜力和广阔前景。

致谢:感谢审稿专家对论文的悉心指导和有益建议,一并致以诚挚谢忱!

## References

- Bao, J. P., Chen, X. W., Zhu, C. S., 2016. Novel  $C_{15}$  Sesquiterpanes and Their Origin in Different Crude Oils from the Pearl River Mouth Basin of China. *Science China Earth Sciences*, 59(8): 1622–1632. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5453-2>
- Fu, N., 1995. Detection and Study of  $C_{30}$  Dinosteranes in Liaodong Bay. *China Offshore Oil and Gas*, 7(5): 9–14 (in Chinese with English abstract).
- Huang, L., Liu, C.Y., Wang, F.L., et al., 2019. Strike-Slip Fault System and Its Geological Significance in the North Part of the Liaoxi Graben, Offshore the Bohai Bay Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 49(2): 258–267 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Tian, X.P., Zhang, J.R., et al., 2018. Hydrocarbon Accumulation Conditions and Distribution Characteristics of LD21 Oilfield, South of Liaozhong Sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 25(3): 11–19 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., 2021. Origin of Condensate Gas in Bozhong 19-6 Gas Field in Bohai Bay Basin. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 49(3): 458–466 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Dou, L.R., Wen, Z.G., et al., 2017. Buried-Hill Hydrocarbon Genesis and Accumulation Process in Bon-gor Basin, Chad. *Acta Petrolei Sinica*, 38(11): 1253–1262 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Dou, L.R., Wen, Z.G., et al., 2021a. Rearranged Hopane: Molecular Tracers for Filling Pathway in Oil Reservoirs. *Earth Science*, 46(7): 2507–2514 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Li, Y.C., Lan, L., et al., 2021b. Genetic Type of Condensates Oil and Oil-Gas Relationship in the Bozhong 19-6 Gas Field, Bohai Bay Basin. *Acta Geologica Sinica*, 95(3): 913–923 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Dou, L.R., Wen, Z.G., et al., 2022. Genetic Ori-

- gin of CO<sub>2</sub>-Rich Oil Reservoirs and Pool-Forming Period in Melut Basin, Southern Sudan. *Earth Science*, 47(4): 1459—1469 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Qi, J.Q., Zhou, D.H., et al., 2019. Formation and Evolution of Liaoxi Dome, Liaodong Bay Depression. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(5): 911—923 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.M., Du, X.F., Huang, X.B., et al., 2022. Characteristics and Genesis Analysis of Oil-Water Interface Inconsistency of Extra-Heavy Oil Reservoir with High Porosity and High Permeability: Taking LD5 Reservoir in Liaodongwan Depression as an Example. *Earth Science*, 47(5): 1669—1683 (in Chinese with English abstract).
- Niu, C.M., Wang, B.J., Wang, F.L., et al., 2019. Reservoir-Forming Condition and Mechanism of the Member 2 of Shahejie Formation in Jinzhou JZ20-2N Oilfield, Liaoxi Depression, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 46(6): 667—677 (in Chinese with English abstract).
- Wang, B.J., Xu, C.G., Wu, K., et al., 2017. Quality Distribution and Origin of Super Heavy Crude in LX Structure of the Liaoxi Sag, Bohai Sea. *Oil & Gas Geology*, 38(1): 79—89 (in Chinese with English abstract).
- Wang, B.J., Xu, C.G., Wu, K., et al., 2019. The Neogene Extra-Super Heavy Oil Reservoir Characteristics and Formation Mechanism in Liaodong Bay Depression. *Earth Science*, 44(9): 3088—3100 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F.L., Wang, D.Y., Yan, G., et al., 2019. Geochemical Characteristics and Oil Source Correlation of Crude Oil in Liaoxi Depression, Bohai Sea, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 46(5): 566—574 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F.L., Xu, C.G., Zhang, M., et al., 2016. Application of Biomarker Quantitative Superposition Parameter Recovery Method for Oil-Source Correlation of Heavy Oil in Bohai Oilfields. *China Offshore Oil and Gas*, 28(3): 70—77 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, J.Q., Li, K., Hu, H.W., et al., 2014. Tectonic Feature and Hydrocarbon Accumulation of Jinxianl-1 Oil Field at Liaozhong Sag in Liaodongwan Depression. *Natural Gas Geoscience*, 25(3): 333—340 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C.G., Wang, B.J., Wang, F.L., et al., 2016. Neogene Extra Heavy Oil Accumulation Model and Process in Liaodong Bay Depression: A Case Study of Lüda 5-2 N Oilfield. *Acta Petrolei Sinica*, 37(5): 599—609 (in Chinese with English abstract).
- Yang, B.L., Ye, J.R., Liu, Y.M., et al., 2015. Hydrocarbon Accumulation Conditions of North Sub-Sag and Central Sub-Sag in Liaoxi Sag, Liaodong Bay Depression. *Xinjiang Petroleum Geology*, 36(1): 25—29 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Wu, Z.P., Li, W., et al., 2017. Cenozoic Tectonic Characteristics and Evolution of Liaodong Bay Depression. *Marine Geology Frontiers*, 33(11): 9—17 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Yang, B., Huang, X.B., et al., 2014. Tectonic Characteristics and Accumulation Study in Oil and Gas Reservoirs in Steep Slope Belt—With LD6 Structure in Bohai Oil Field as an Example. *Offshore Oil*, 34(3): 22—26 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, T.T., Luo, X.P., Wu, P., et al., 2020. Geochemical Characteristics and Source Analysis of Crude Oil from Archean Buried Hill JZ25-1S in Liaoxi Low Uplift. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(6): 981—990 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R.C., Hu, C., Dong, X., 2009. Analysis of Internal Structure and Reservoir-Forming Conditions of Palaeo-Buried Hill, Western Liaohe Sag. *Lithologic Reservoirs*, 21(4): 10—18 (in Chinese with English abstract).

### 中文参考文献

- 傅宁, 1995. 辽东湾地区 C<sub>30</sub> 甲藻甾烷的检出及其地质意义. *中国海上油气(地质)*, 7(5): 9—14.
- 黄雷, 刘池洋, 王飞龙, 等, 2019. 渤海海域辽西凹陷北部走滑断裂特征及地质意义. *西北大学学报(自然科学版)*, 49(2): 258—267.
- 李强, 田晓平, 张婕茹, 等, 2018. 辽中凹陷南洼旅大 21 油田油气成藏条件及分布特征. *油气地质与采收率*, 25(3): 11—19.
- 李威, 2021. 渤海湾盆地渤中 19-6 气田凝析气成因研究. *同济大学学报(自然科学版)*, 49(3): 458—466.
- 李威, 窦立荣, 文志刚, 等, 2017. 乍得 Bongor 盆地潜山油气成因和成藏过程. *石油学报*, 38(11): 1253—1262.
- 李威, 窦立荣, 文志刚, 等, 2021a. 重排藿烷: 示踪油藏充注途径的分子标志物. *地球科学*, 46(7): 2507—2514.
- 李威, 李友川, 兰蕾, 等, 2021b. 渤海湾盆地渤中 19-6 气田凝析油特征及油气关系. *地质学报*, 95(3): 913—923.
- 李威, 窦立荣, 文志刚, 等, 2022. Melut 盆地富含 CO<sub>2</sub> 油气藏的成因及期次. *地球科学*, 47(4): 1459—1469.
- 李伟, 戚建庆, 周东红, 等, 2019. 辽东湾坳陷辽西凸起的形成与演化. *大地构造与成矿学*, 43(5): 911—923.
- 刘艺萌, 杜晓峰, 黄晓波, 等, 2022. 高孔高渗型特稠油藏油水界面不统一特征及成因: 以辽东湾坳陷旅大 5 油藏为

- 例. 地球科学, 47(5): 1669—1683.
- 牛成民, 王冰洁, 王飞龙, 等, 2019. 辽西凹陷锦州 20-2 北油田沙二段油气成藏条件与成藏过程. 成都理工大学学报(自然科学版), 46(6): 667—677.
- 王冰洁, 徐长贵, 吴奎, 等, 2017. 渤海海域辽西凹陷陡坡带 LX 构造特稠油藏内部油品品质分布及成因. 石油与天然气地质, 38(1): 79—89.
- 王冰洁, 徐长贵, 吴奎, 等, 2019. 辽东湾坳陷新近系特-超稠油油藏特征及形成机理. 地球科学, 44(9): 3088—3100.
- 王飞龙, 王德英, 燕歌, 等, 2019. 渤海辽西凹陷原油地球化学特征及地质意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 46(5): 566—574.
- 王飞龙, 徐长贵, 张敏, 等, 2016. 生物标志物定量叠加参数恢复法在渤海油田稠油油源对比中的应用. 中国海上油气, 28(3): 70—77.
- 肖锦泉, 李坤, 胡贺伟, 等, 2014. 辽东湾坳陷辽中凹陷金县 1-1 油田构造特征与油气成藏. 天然气地球科学, 25(3): 333—340.
- 徐长贵, 王冰洁, 王飞龙, 等, 2016. 辽东湾坳陷新近系特稠油成藏模式与成藏过程: 以旅大 5-2 北油田为例. 石油学报, 37(5): 599—609.
- 杨宝林, 叶加仁, 刘一茗, 等, 2015. 辽东湾坳陷辽西凹陷北部和中部洼陷油气成藏条件. 新疆石油地质, 36(1): 25—29.
- 张婧, 吴智平, 李伟, 等, 2017. 辽东湾坳陷新生代构造特征及演化. 海洋地质前沿, 33(11): 9—17.
- 张友, 杨波, 黄晓波, 等, 2014. 陡坡带油气藏构造特征与油气聚集规律: 以渤海油田旅大 6 构造为例. 海洋石油, 34(3): 22—26.
- 赵婷婷, 罗小平, 吴飘, 等, 2020. 辽西低凸起 JZ25-1S 太古界潜山原油地球化学特征及来源分析. 石油实验地质, 42(6): 981—990.
- 郑荣才, 胡诚, 董霞, 2009. 辽西凹陷古潜山内幕结构与成藏条件分析. 岩性油气藏, 21(4): 10—18.