

https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.169



渤海湾盆地低勘探程度凹陷特殊地质条件、成因类型及油气勘探意义

刘海涛¹, 沈传波², 于海涛^{3*}, 肖阳⁴, 孟涛⁵, 董晓伟⁶, 李聪⁷,
吴路路⁸, 葛翔², 李婷婷¹

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074
3. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318
4. 中国石油华北油田公司, 河北任丘 062550
5. 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257015
6. 中国石油大港油田公司, 天津 300280
7. 中国石油冀东油田公司, 河北唐山 063000
8. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南焦作 454003

摘要: 为破解渤海湾盆地富油气凹陷储量接替压力, 推动新区油气资源快速转化, 本研究通过系统梳理各低勘探程度凹陷勘探与研究现状, 结合地质分析与多维度分类评价方法, 剖析其特殊地质条件、类型分布及勘探意义。结果表明, 低勘探程度凹陷具备咸化湖盆优质烃源岩、深大断裂与异常热流改善成藏条件、与富油气凹陷协同演化等优势, 基于主观原因、实施效果、结构类型、沉降类型、生烃机制、与主力凹陷协同演化关系等多维度可划分为多种类型, 平面分区特征明显。结论认为, 低勘探程度凹陷勘探前景良好, 不同类型凹陷地质与勘探难点差异显著, 经多维度分类评价与精准部署, 通过揭示优势成藏条件有望实现油气突破, 推动盆地油气资源有效接替。

关键词: 渤海湾盆地; 超级盆地; 低勘探程度凹陷; 地质条件; 分类方案; 勘探潜力; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2026)05-1619-17

收稿日期: 2026-02-24

Special Geological Conditions, Genetic Types, and Significance of Petroleum Exploration in Low Exploration Degree Depressions of Bohai Bay Basin

Liu Haitao¹, Shen Chuanbo², Yu Haitao^{3*}, Xiao Yang⁴, Meng Tao⁵, Dong Xiaowei⁶, Li Cong⁷,
Wu Lulu⁸, Ge Xiang², Li Tingting¹

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China
2. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China
3. College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China
4. Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu 062550, China

基金项目: 油气重大专项(No.2024ZD1400100); 黑龙江省自然科学基金项目(No.LH2024D007)。

作者简介: 刘海涛(1978—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事油气成藏及综合地质评价研究。E-mail: liu_haitao@petrochina.com.cn

***通讯作者:** 于海涛, ORCID: 0000-0002-9940-1861. E-mail: yuhaitao.125@163.com

引用格式: 刘海涛, 沈传波, 于海涛, 肖阳, 孟涛, 董晓伟, 李聪, 吴路路, 葛翔, 李婷婷, 2026. 渤海湾盆地低勘探程度凹陷特殊地质条件、成因类型及油气勘探意义. 地球科学, 51(5): 1619-1635.

Citation: Liu Haitao, Shen Chuanbo, Yu Haitao, Xiao Yang, Meng Tao, Dong Xiaowei, Li Cong, Wu Lulu, Ge Xiang, Li Tingting, 2026. Special Geological Conditions, Genetic Types, and Significance of Petroleum Exploration in Low Exploration Degree Depressions of Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 51(5): 1619-1635.

5. SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying 257015, China
6. Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280, China
7. Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan 063000, China
8. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

Abstract: To address the pressure of reserve replacement in the oil-rich sags of the Bohai Bay basin and promote the rapid conversion of oil and gas resources in new areas, this study systematically reviews the exploration and research status of various low exploration degree depressions, and analyzes their special geological conditions, type distribution, and exploration significance by combining geological analysis with multi-dimensional classification evaluation methods. The results indicate that low exploration depressions possess advantages such as high-quality hydrocarbon source rocks in salinized lake basins, improved reservoir-forming conditions due to deep faults and abnormal heat flow, and co-evolution with oil-rich sags. Based on multiple dimensions including subjective reasons, implementation effects, structural types, subsidence types, hydrocarbon generation mechanisms, and co-evolution relationships with major depressions, various types can be classified, with distinct planar zoning characteristics. It is concluded that low exploration degree depressions have good exploration prospects, and there are significant differences in geological and exploration difficulties among different types of depressions. Through multi-dimensional classification evaluation and precise deployment, it is expected to achieve oil and gas breakthroughs by revealing advantageous reservoir-forming conditions, thereby promoting effective succession of oil and gas resources in the basin.

Key words: Bohai Bay basin; Super basin; low exploration degree depression; geological conditions; classification scheme; exploration potential; petroleum geology.

0 引言

渤海湾盆地是全球 25 个超级盆地之一(吕建中等, 2019; Baptista *et al.*, 2023; Sternbach and Merrill, 2023; Tari *et al.*, 2023; Albriki *et al.*, 2024; Jiang *et al.*, 2026), 全盆地石油资源、储量及年产量占全国均约 1/3 左右, 是全国原油稳产 2 亿吨的压舱石。几代石油地质工作者深耕基础地质与油气成藏研究, 创立了“复式油气聚集区(带)”、“富油气凹陷”等核心陆相石油地质理论, 有效推动了盆地持续规模增储上产。近年来, 依托风险勘探、集中勘探、精细勘探及效益勘探, 在富油气凹陷的深凹区(陈家旭等, 2025; 张筱杨等, 2025)、页岩油(倪良田等, 2024; 李军亮等, 2025; 魏永波等, 2025)、潜山(李卓奕和谢敏, 2025; 王清斌等, 2025; 王文庆等, 2025; 张宏伟等, 2025)等多个领域持续突破, 落实多个亿吨级储量区带, 证实渤海湾盆地剩余油气资源依然巨大, 具备保障国家能源安全的坚实基础。

历经 60 余年勘探, 作为渤海湾盆地主战场的富油气凹陷已进入高勘探程度阶段, 资源探明率主体为 40%~60%, 储量品位逐年变差, 1991 年以来, 陆上低渗与非常规储量合计占比从 26% 升至 60%, 勘探对象日趋隐蔽化与复杂化, 储量接替面临巨大压力。渤海湾盆地作为典型的断陷盆地, 发育 54 个凹陷, 超 60% 的凹陷勘探程度较

低, 近年来, 庙西凹陷及周缘新近系浅层发现多个亿吨级油气田, 保定凹陷东营-馆陶组浅层新增储量超亿吨, 武清凹陷沙四段深层、莘县凹陷沙三段页岩油获重要勘探苗头。勘探实践证明, 创新成盆机制、沉积模式、成烃/供烃条件、控藏规律等认识, 加大地球物理技术攻关, 低勘探程度凹陷仍具良好勘探前景(雷闯等, 2024; 徐田武等, 2026)。需要注意的是, 渤海湾盆地低勘探程度凹陷具有“自身小又浅、分布广而散、资料少且差”等特点(冯德浩等, 2020; 余秋华等, 2024), 凹陷面积为 160~4 950 km², 基底埋深为 2.8~14 km, 陆上 30 个凹陷主要分布在控盆或控拗断裂周缘, 大部分凹陷仅有少量的钻井和二维地震资料。这些凹陷成因机制与地质条件差异较大, 由于前期勘探成效低, 投入少, 导致认识程度较低, 因此, 加快低勘探程度凹陷油气资源转化已迫在眉睫。

本文对比富油气凹陷成熟探区勘探现状, 将低勘探程度凹陷定义为“具有探井密度小于 0.15 口/km², 资源探明率小于 40%, 三维地震覆盖率小于 60% 特征的凹陷”。基于低勘探程度凹陷地质特点与勘探现状, 区分其与成熟探区在资料品质、研究思路及配套技术上的差异, 厘定低勘探程度凹陷分类, 明确其分布特征, 开展凹陷综合评价与排队优选, 有望支撑该类凹陷持续突破, 推动实现盆地油气资源有效接替, 保障渤海湾超级盆地增储稳产。

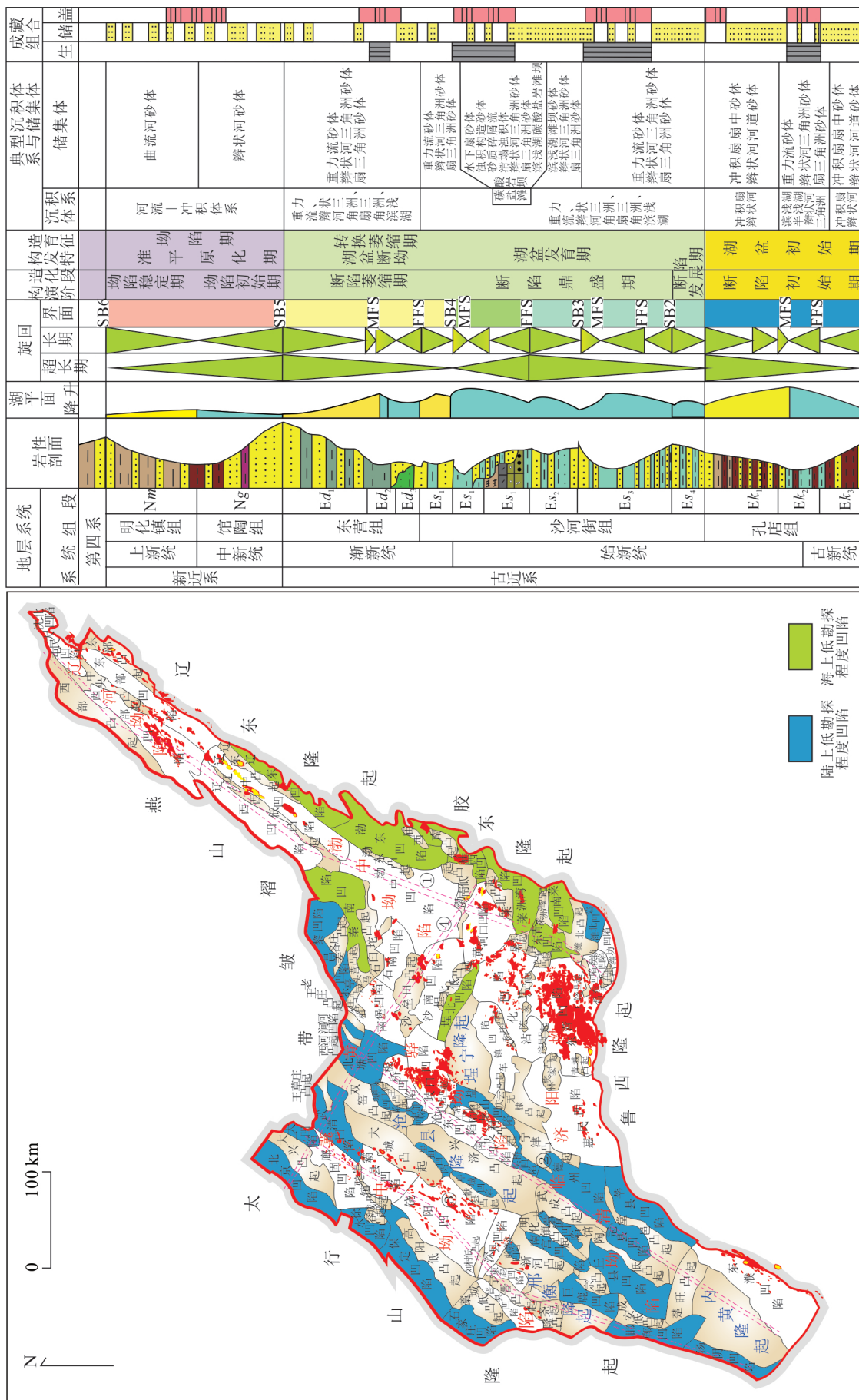


图 1 渤海湾超级盆地低勘探程度凹陷分布及地层柱状图

Fig.1 Distribution of low exploration degree depression in Bohai Bay Super Basin and stratigraphic system map

① 营口—潍坊走滑断裂带; ② 黄骅—东濮走滑断裂带; ③ 霸县—汤阴走滑断裂带; ④ 张家口—蓬莱走滑断裂带

1 区域地质概况

渤海湾盆地是发育在华北克拉通上的新生代裂陷盆地,前新生代盆地基底经历了太古宙至中生代复杂的构造演化,经历了多种原型盆地的叠加复合过程,新生代在区域主体伸展背景下形成先断后拗双层结构,其中古近纪强断陷期发育了孔店组、沙河街组四段、沙河街组三段、沙河街组一段和东营组等多套烃源岩,是渤海湾盆地最主要的烃源岩层系,全盆地从太古界至新生界均已发现油气(赵珊等, 2019). 由于盆地主形成期古近纪控凹断层的构造活动强烈,盆地形成了典型的多隆多凹相间分布的格局,发育了构造格局、沉积充填、成藏要素组合各异的 54 个凹陷,各凹陷勘探和认识程度差异大. 目前,勘探主要集中在饶阳、歧口、南堡、沧东、东营、西部、大民屯、东濮等 13 个主要凹陷,即富油气凹陷. 这些富油气凹陷均已发现亿吨级大油田,探明储量丰度大于 $10 \times 10^4 \text{ t/km}^2$, 优质烃源岩储集体同生圈闭有机配置并发育多套生油层系. 除了上述 13 个主要凹陷以外,其它凹陷勘探程度低,油气规模发现少,为低勘探程度凹陷,主要分布在盆地西部、西北部、西南部及东部海域附近(图 1).

2 低勘探程度凹陷特殊地质条件

低勘探程度凹陷受盆地周缘西部太行山隆起、北部燕山褶皱带、盆内营口-潍坊走滑断裂带、黄骅-东濮走滑断裂带及霸县-汤阴走滑断裂带等控制,尽管呈分散状分布(滕长宇等, 2014),但部分凹陷仍具备油气成藏与富集的特殊地质条件(侯明才等, 2019; 徐长贵等, 2019; 田立新等, 2020; 庞小军等, 2023; 李威等, 2025).

2.1 古气候与湖盆环境

近年来勘探实践证实,渤海湾盆地富油气凹陷古近系(如东营凹陷沙三中-沙四上亚段、东濮凹陷沙三段、歧口凹陷沙三段、沧东凹陷孔二段等)发育咸化湖盆烃源岩,并证实古气候演化主导湖盆咸化过程,干旱-半干旱气候与盆地多旋回构造演化耦合,促成封闭性,有利于有机质保存的(胡涛等, 2021; 方正等, 2021; Wu *et al.*, 2021; 于乐丹等, 2024). 同时咸化湖富有机质藻源岩生烃活化能低,生排烃门限浅,易于低温演化阶段大量生烃及后期多期生烃,资源潜力评价得以大幅度提升.

近年来保定、莘县等凹陷勘探证实,低勘探程

度凹陷亦发育咸化湖盆烃源岩. 如保定凹陷,沙一下亚段优质烃源岩厚度可达 50~120 m,以 I-II₁ 型为主,TOC 为 0.8%~3.5%,研究表明其形成于干旱-半干旱、强还原、盐度分层的沉积环境, Sr/Ba 为 0.8~2.5,伽马蜡烷/C₃₀藿烷=0.4~0.8,沙一下亚段优质烃源岩可低温早熟生排烃(图 2),贡献浅层东营组大规模低熟油藏(李志军等, 2024).

渤海湾盆地古近系咸化湖盆整体受控于古气候与洼槽封闭性等因素控制(表 1). 从古气候来看,古近纪发育多期干热-温湿交替旋回(沙四段-沙三下、沙一段两期干热气候),蒸发强烈、水体分层明显,形成强还原沉积环境,有利于有机质保存,沙三中-沙二段温湿气候带来充足陆源营养输入,促进藻类等低等生物大量繁殖,提高有机质生产力. 从湖盆环境来看,凹陷内部继承性深洼槽具有半封闭-封闭特点,水体交换弱、盐度易升高,形成咸化-半咸化湖相环境. 因此,低勘探程度凹陷只要具备古近系沙四段、沙三下、沙一段沉积记录,且内部存在长期稳定的深洼槽,在干热气候+封闭咸化湖盆的共同控制下,就具备形成厚度大、丰度高、类型好、成熟度适中的优质烃源岩的有利条件,是未来油气勘探的重要潜力区.

2.2 深大断裂与异常热流

深大断裂作为热通道,与岩石圈壳幔伸展减薄的结构共同控制地幔热源上涌,决定了渤海湾盆地异常热流的发育与分布,而异常热流作用对烃源岩形成与转化、储层改善等具有重要的影响作用(Zhu and Huang, 2026; 朱光有等, 2026). 一是促进有机质富集,沿深大断裂不断上涌的热液流体不仅能提供丰富的营养物质(如 N、P 等元素)和金属元素(如 Fe、Cu、Mn),促进古生产力的提高,其携带的大量盐类及还原性气体还会促使底层水体形成缺氧环境,为有机质的富集提供良好的保存条件(杨海风等, 2025). 如东营凹陷沙河街组热液流体活动可以提高湖盆底部水体的盐度,促进湖水分层的形成,有利于缺氧环境的发育和优质烃源岩的形成. 二是加速有机质成熟演化,促进生烃转化. 庙西凹陷勘探突破表明,“薄地壳+走滑断裂+幔源热流”形成高地温梯度,加速烃源岩的热演化过程,生烃门限显著变浅,庙西南洼陷的排烃门限在 2 250 m(赵野等, 2020). 三是改善储层质量,如庙西凹陷,热流与走滑断裂共同作用,形成裂缝-溶蚀双重增孔体系,改善新生界储层连通性,为盆缘小凹陷成藏关键因

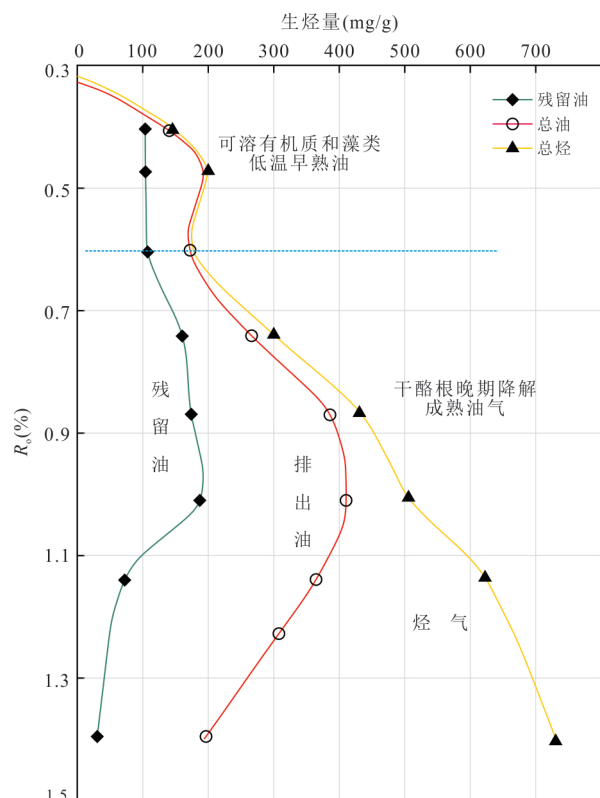


图2 保定凹陷沙一段下亚段富藻源岩的生烃演化模式(据李志军等, 2024)

Fig.2 Hydrocarbon generation evolution of algae-rich source rock in the lower submember of member 1 of Shahejie Formation of Baoding depression (from Li *et al.*, 2024)

素(侯中帅等, 2019)。总之,异常热流降低生烃门限、加速成熟、扩大生油窗,形成早熟/低熟油,提升排烃效率,同时热流驱动有机酸溶蚀+热裂缝发育,形成次生孔隙与裂缝网络,显著改善储层物性。

渤海湾盆地整体为高热流背景,主体受岩石圈伸展减薄、深大断裂导热、基底与盖层热物性差异、幔源热流叠加控制。从平面分布来看,平面上呈东高西低、凸高凹低格局。受渤海湾盆地东南缘岩石圈减薄(图3a)、地幔上涌、与走滑断裂带强烈走滑活动相伴生的火山喷发、火山岩体侵入等因素影响,盆地东南缘及东部郟庐断裂带附近大地热流值升高(图3b),平均地温梯度远高于全盆的平均地温梯度(赵野等, 2020)。从热流演化史来看,纵向古近纪热流最高、新近纪-现今逐步降低,盆地西部冀中、临清等拗陷热流峰期出现的早,而盆地东部渤海海域及辽河拗陷热流达峰期的时间较晚(Liu *et al.*, 2016a, 2016b, 2018, 2022; 刘琼颖和何丽娟, 2019)。

保定、石家庄、武清、德州、莘县等渤海湾盆地

低勘探程度凹陷,虽热流低于盆地中心,整体为中等-偏高,由于处于盆地及拗陷二级构造单元的周缘,深大断裂十分发育,局部存在异常热流,有利热背景,既保证烃源岩有效成熟、长期生油,又与咸化湖盆环境耦合形成优质烃源岩,并改善储层条件,是极具勘探潜力的低勘探程度凹陷。

2.3 与富油气凹陷具备协同演化关系

渤海湾盆地具有多凹陷、多凸起的复杂构造格局,近年来研究表明,这些低勘探程度凹陷在古近纪特定演化阶段,与相邻富油气凹陷曾为统一凹陷、统一湖盆,共享优质烃源岩发育的地质条件,这一发现彻底重塑了低勘探凹陷的油气勘探认知,显著提升了其勘探潜力。

近期关于冀中拗陷北部整体研究发现沙一下时期是冀中拗陷最大湖侵期,保定凹陷(低勘探程度)与饶阳、霸县凹陷(富油气凹陷)在沙一段沉积期为统一湖盆(张保卫等, 2022;图4)。孔店-沙二段沉积期,保定-饶阳为两个分异型湖盆,保定凹陷处于快速沉降、山前过补偿沉积,由于南北沉降、沉积速率差异,凹陷沉积中心整体向东、北偏移,沉降、沉积中心不一致。沙一段沉积时期,断陷构造运动作用减弱,保定凹陷与饶阳凹陷一同进入拗陷沉积阶段,沉降、沉积中心在保北地区逐渐一致,发育局部次洼,最大湖泛期与饶阳凹陷相通。从地层分布来看,两凹陷沙一段地层呈连续分布,标志层发育一致且可精准对比,整体具有西薄东厚的特征,厚度分布连续无突变;从沉积特征来看,作为冀中拗陷最后一次湖侵,保定-饶阳-霸县南部形成统一汇水湖盆,凹陷中心均发育深湖-半深湖相,边缘为滨浅湖相及混积滩坝沉积。沙一段统一湖盆认识为饶阳凹陷充足油气资源沿斜坡方向远距离运移至保定凹陷提供有利依据,支撑了保定凹陷中浅层亿吨级油田的发现(张锐锋等, 2023; 李熹微等, 2025)。

渤海湾盆地全盆构造演化的重新认识表明石家庄-晋县-束鹿沙一段、沧东-吴桥-德州孔二段时期均发育统一湖盆,进一步拓展了盆地低勘探凹陷的勘探范围。以往研究认为黄骅拗陷南部孔二段发育三个独立深凹。经过地震资料处理和成像品质提升,新发现Tg界面上覆一套低频、连续强反射,推测为孔二段源岩地层。该认识将孔二段分布范围向南拓展560 km²。凹陷发育史分析表明,孔二期为弱断陷湖盆沉积,四个深凹孔二段地层相连、特征一致、厚度稳定,具有统一成盆环境;孔一段开始差异

表 1 渤海湾超级盆地主要低勘探程度凹陷不同层位源岩指标参数

Table 1 Source rock index parameters for different horizons in the main low exploration degree sag of the Bohai Bay Super basin

层位	构造时期	古气候	凹陷名称	烃源岩厚度(m)	TOC含量(%)	有机质类型	母质来源	古盐度	古氧相	富集模式
沙一段	断陷 IV幕	炎热 干旱	大中旺	200~	1.58~	II 1、	低等水生生物	咸水	还原	凉爽湿润、盐度分层、 还原条件、较高水生生产率
			凹陷	450	3.2	II 2型				
			保定	75~	0.4~	II 1、	混合	半咸水	还原	凉爽湿润、盐度分层、 还原条件、混合来源输入
凹陷	200	2.03	II 2型	来源						
沙三段	断陷 III幕	温暖 湿润	北塘	0~	0.75~	I、	混合	咸水	弱还原	温暖潮湿、盐度分层、 弱还原条件、较高水生生产率
			凹陷	1 200	1.5	II 1型	来源			
			青东	0~	0~	I、	混合	淡水	弱氧化-弱还原	温暖潮湿、温度分层、弱氧化、 还原条件、较高水生生产率
凹陷	400	3.88	II 1型	来源						
沙四段	断陷 II幕	炎热 干旱	大厂	0~	0.67~	II 1、	混合	淡水	弱氧化-弱还原	温暖潮湿、温度分层、弱氧化、 还原条件、较高水生生产率
			凹陷	1 100	2.17	II 2型	来源			
			青东	200~	1.58~	I、	低等水生生物	咸水	还原	炎热干旱、盐度分层、 还原条件、较高水生生产率
凹陷	450	3.2	II 1型	来源						
孔店组	断陷 I幕	炎热 干旱	保定	10~	0.8~	III型	混合	咸水	还原	炎热干旱、盐度分层、 还原条件、混合来源输入
			凹陷	400	1.68	III型	来源			
			潍北	100~	1.74~	III型	低等水生生物	半咸水-	还原	炎热干旱、盐度分层、 还原条件、较高水生生产率
凹陷	700	16.85	III型	来源	咸水					
孔店组	断陷 I幕	炎热 干旱	保定	0~	0.73~	III型	混合	咸水	还原	炎热干旱、盐度分层、 还原条件、混合来源输入
			凹陷	380	0.94	III型	来源			

沉降,各凹陷开始分割形成独立凹陷,馆陶组沉积前定型;晚期构造活动弱,各凹陷同期发育、演化一致。

3 低勘探程度凹陷类型与分布特征

渤海湾盆地低勘探程度凹陷之所以勘探程度低,核心原因在于前期普遍认为这类凹陷构造破碎、断裂复杂,且凹陷规模小、演化进程早衰,油气成藏条件不佳。加之部分凹陷不具备良好的地面勘探条件,导致勘探投入不足,钻井及三维地震资料匮乏,进而制约了对成藏要素的深入认识,由此形成“资料短缺-认识不足-投入有限”的不良循环,进一步阻碍了勘探推进。基于此,开展低勘探程度凹陷的分类研究(图5),剖析不同类型凹陷的成藏潜力,明确各凹陷的优势与短板,可为排队优选、精准投入提供科学依据,助力低勘探程度凹陷实现油气突破,推动盆地整体勘探均衡发展。

3.1 按勘探程度较低的主观原因分类

一是地面工程因素,如北京周边、石家庄凹陷等经济核心区,以及涧河、乐亭凹陷等生态敏感区,导致地质勘探工作难以顺利开展;二是地质条件因素,主要是早期勘探实践中已部署探井,但未钻获油气,具体表现为汤阴、莱南等凹陷未钻遇烃源岩,乐亭、白塘口等凹陷揭示烃源岩供烃能力有限等。

受地面工程因素限制的凹陷,主要分布于北京周边及东部沿海区域;受地质条件限制的凹陷,主要集中在盆地内部(图5a),受黄骅-东濮走滑断裂带、霸县-汤阴走滑断裂带及盆内局部物源影响,其中盆地西南部的丘县、巨鹿等凹陷已完成早期钻探,但未发现油气及优质烃源岩,盆地中部的北塘、莘县等凹陷则需进一步加强地震资料部署,开展整体研究与综合评价。

3.2 按勘探程度与实施效果分类

近年来,保定、沧东、武清、莘县等凹陷相继取得突破,同步也得到了大量地震及钻井方面工作量的投入(图6),根据勘探工作量及发现油气情况,将低勘探程度凹陷研究划分3类。一类凹陷为已发现油气的凹陷,如保定、北塘、潍北、青东等凹陷;二类凹陷为有重要勘探苗头的凹陷,如武清、德州、莘县等凹陷;三类凹陷为其它凹陷,如南宫、巨鹿、吴桥等凹陷。

勘探成效与钻井数、探井密度及三维覆盖率整体呈正相关关系,二类、三类凹陷主要分布在北京周边、东部沿海及盆地西南部(图5b),整体规律与按勘探程度较低的原因分类平面分布特征基本相一致。

3.3 按凹陷结构类型分类

根据控注断层的展布特征和组合形式,低勘探程度凹陷可分为五种类型(图5c)。控注断层为单条

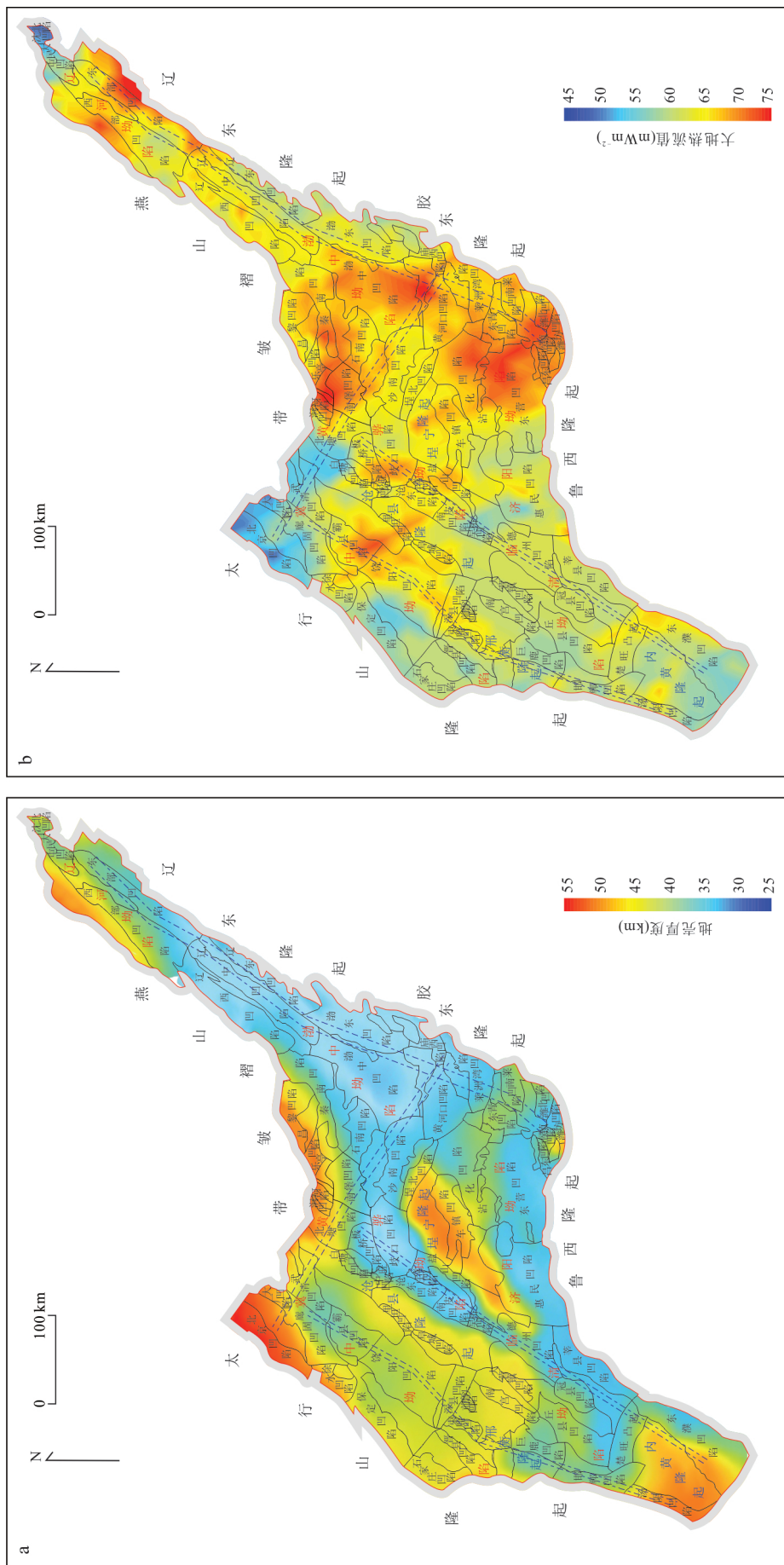


图3 渤海湾超级盆地地壳厚度与大地热流分布
Fig.3 Hydrothermal distribution map of Bohai Bay Super-basin
a.地壳厚度(据徐长贵等(2019)修改); b.大地热流(据张功成等(2024)修改)

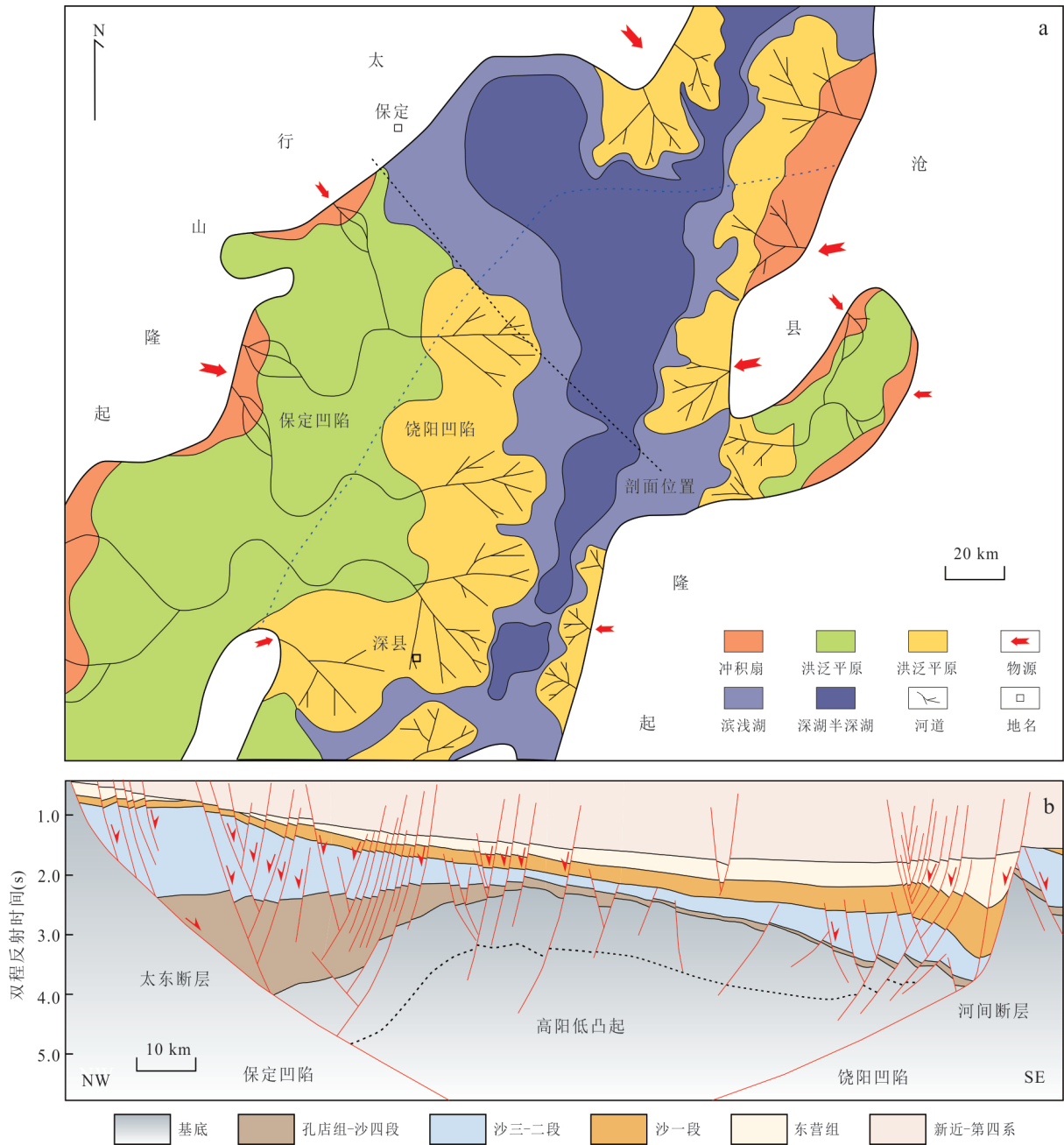


图4 保定-饶阳凹陷沙一段沉积相与地层展布特征剖面(据张锐锋等(2023)修改)

Fig.4 Sectional map of sedimentary facies and stratigraphic distribution characteristics of the first member of Shahejie Formation in Baoding-Raoyang depression (from Zhang *et al.*, 2023)

a. 沙一段沉积相图; b. 地层对比图

正断层时,形成单断式半地堑,如石家庄、保定、大厂、乐亭等凹陷;为多条斜交正断层时,形成斜交式半地堑,如大中旺、武清等凹陷;当控洼断层倾向相反且平行排列时,形成地堑,如吴桥凹陷;为多条倾向相同的正断层时,形成多米诺式、断阶式半地堑,统称多断式半地堑,如北塘、秦南等凹陷;为多条不同属性断层时,形成复合凹陷结构,其中青东、潍北凹陷统称为伸展-走滑复合型半地堑。

平面分布上,各类凹陷呈现明显分区特征:单断式半地堑发育于盆地西部;斜交式半地堑数量较少,仅分布于盆地西北部;结构较复杂的多断式半地堑集中发育于盆地中北部;地堑结构凹陷主要分布在盆地西南部。以上四类凹陷的控洼断层均以正断层为主,裂隙期走滑分量极小,可忽略不计。伸展-走滑复合型凹陷主要分布于盆地东缘郟庐断裂带上,其结构受走滑属性断层改造,具有伸展-走滑复合特征。总体来

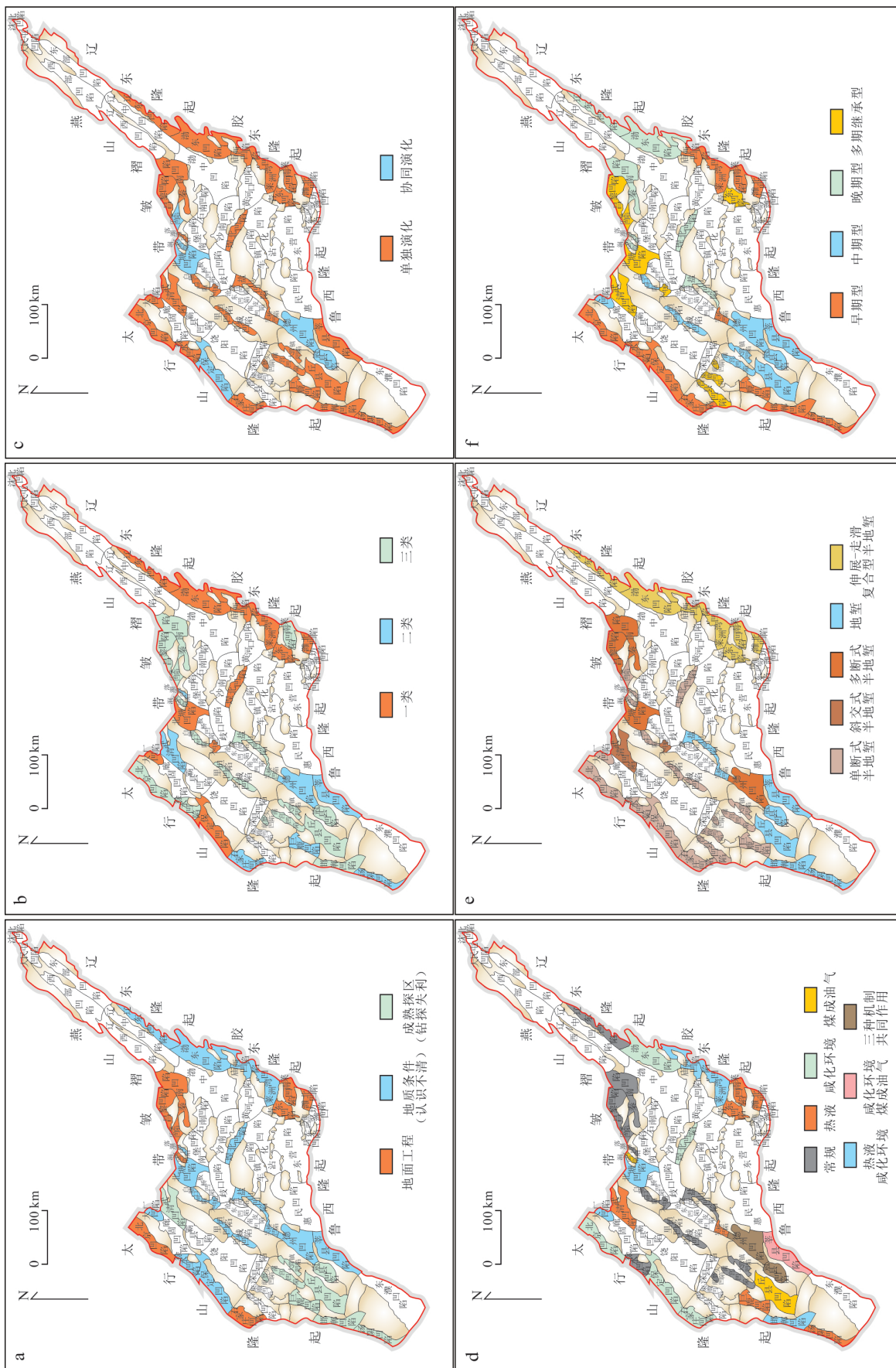


图 5 渤海湾超级盆地不同类型低勘探程度凹陷类型划分

Fig. 5 Plan distribution map of different types of low exploration degree depressions in the Bohai Bay Super basin
a. 按低勘探程度较低的原因分类; b. 按勘探效果分类; c. 按凹陷结构类型分类; d. 按沉降机制分类; e. 按与主力凹陷协同演化关系分类; f. 按与主力凹陷协同演化关系分类

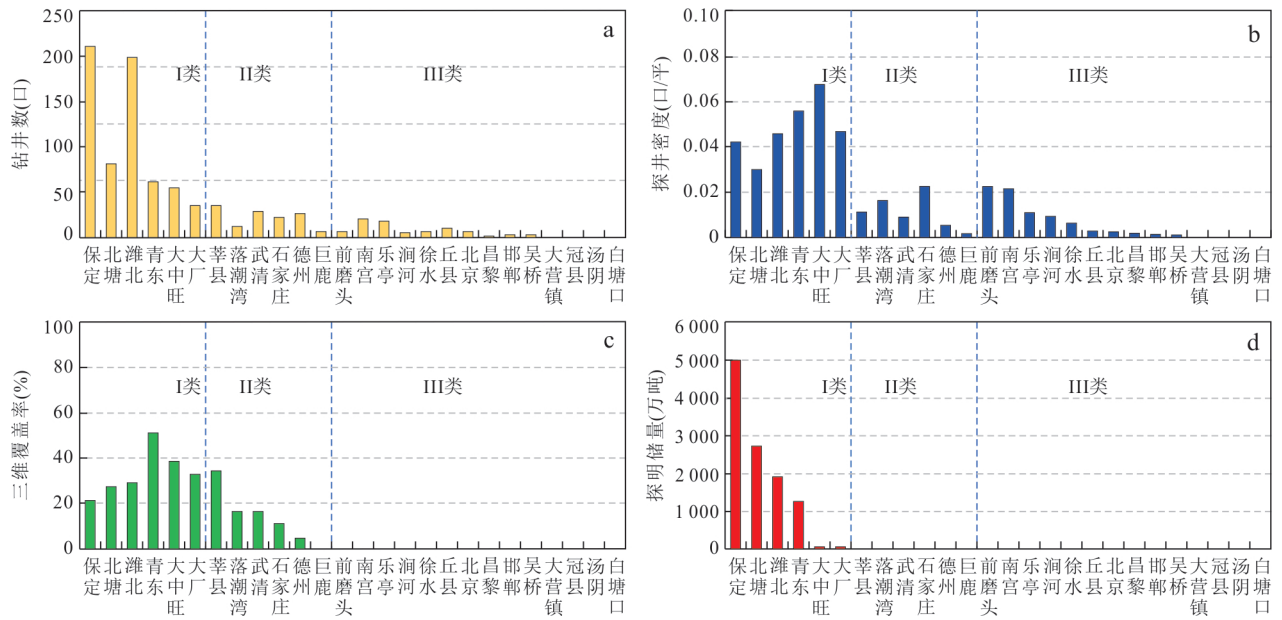


图 6 渤海湾超级盆地低勘探程度凹陷资料情况

Fig.6 Map of low exploration depression data in Bohai Bay Super basin

a. 钻井数直方图; b. 探井密度直方图; c. 三位覆盖率直方图; d. 探明储量直方图

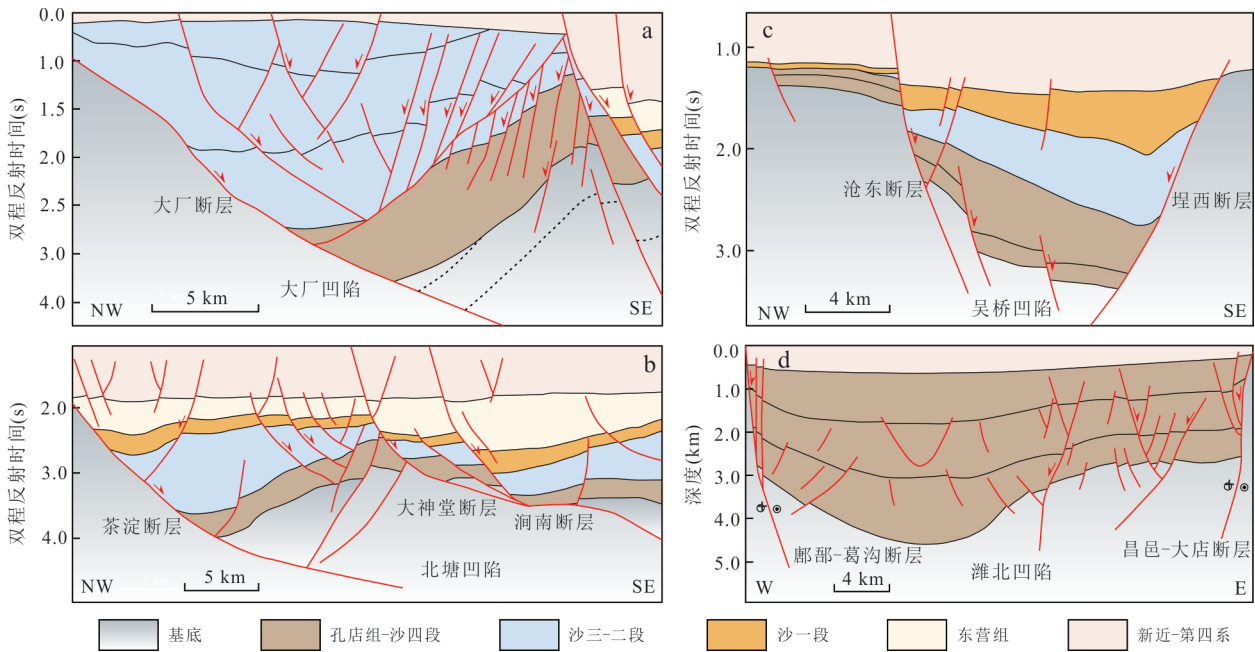


图 7 低勘探程度凹陷结构样式剖面

Fig.7 Profile of structural styles in low exploration degree depressions

a. 单断式半地堑; b. 多断式半地堑; c. 地堑; d. 伸展-走滑复合型

看,不同结构类型凹陷呈集中式分布,这表明凹陷结构的主控因素(如基底先存构造、局部应力场等)在盆地不同区域差异显著,同时又具有连片分布的特点,共同决定了低勘探程度凹陷的分布格局.

3.4 按沉降类型分类

渤海湾盆地低勘探程度凹陷断陷期可划分为

孔店组-沙四段、沙三-沙二段、沙一-东营组三个构造层.以沉降量为主、沉降速率为辅,分析发现,各凹陷沉降具明显期次性,系盆地多期伸展所致,主沉降期对应湖盆鼎盛期及规模化烃源岩发育期.据此可将凹陷分为四类(图 8):早期型(主沉降期孔店-沙四期),分布于盆地东、西缘,以淮北

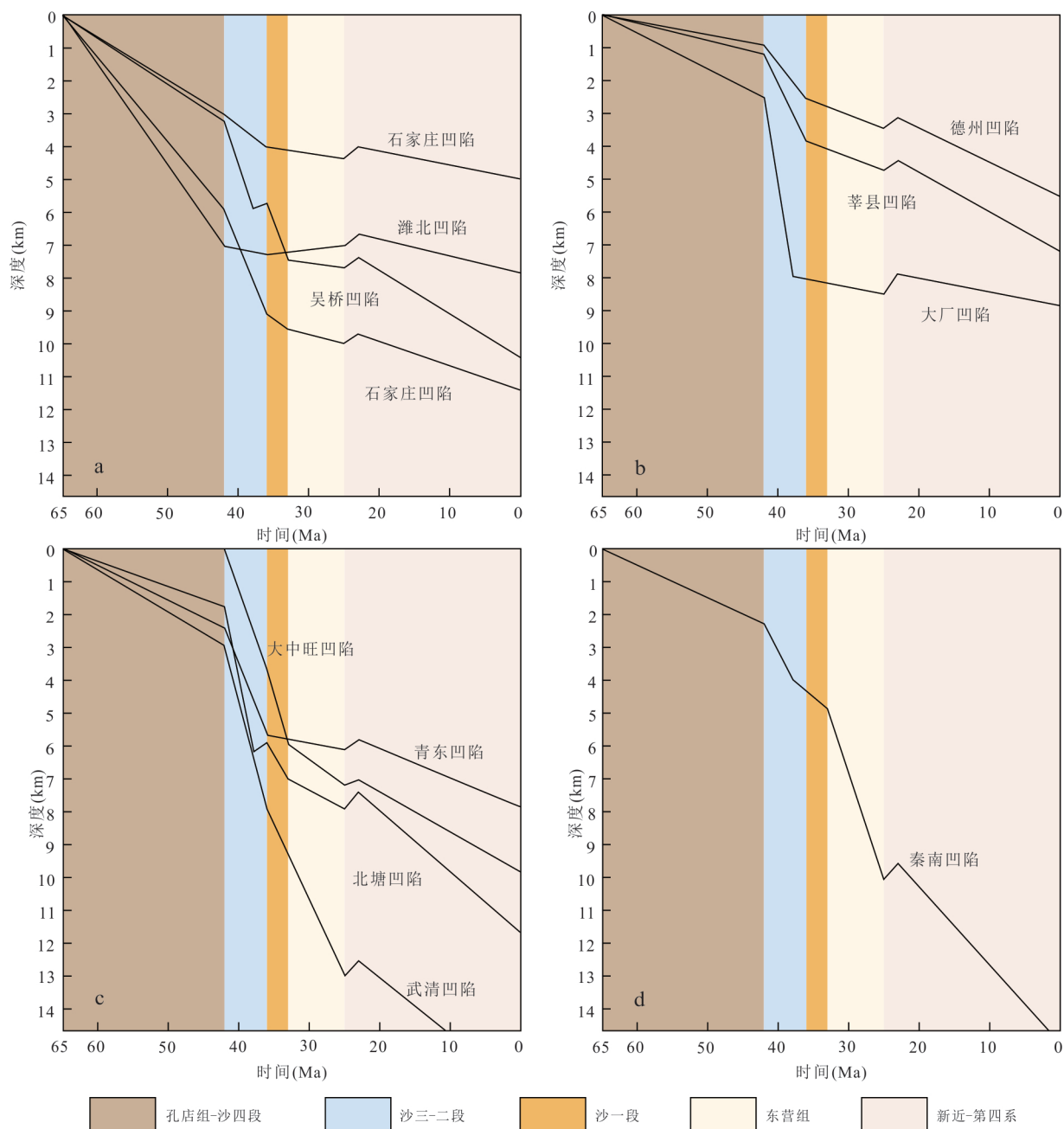


图8 主要低勘探程度凹陷总沉降史

Fig.8 Total subsidence history of major low exploration degree depressions

a. 早期型; b. 中期型; c. 多期继承型; d. 晚期型

凹陷为典型;中期型(主沉降期沙三-沙二段),集中于沧县隆起两侧,以大厂凹陷为典型;晚期型(主沉降期沙一-东营期),分布于盆地中东部,以秦南凹陷为典型;多期继承型,分早-中期(青东凹陷)和中-晚期(武清凹陷)亚类,分别分布于盆地中南部和北缘(图5d)。凹陷发育时空变化快,整体呈向北、向东变晚趋势,与盆地构造迁移方向一致,印证其与主力凹陷构造演化的相似性和同步性。

3.5 按生烃成因机制分类

按照低勘探程度凹陷有利生烃机制,可分为受热液影响的低熟型、受咸化环境影响的低熟型及煤成型三类。其中,受热液影响的低熟型生烃机制的凹陷主要与营口-潍坊走滑断裂带、黄骅-东濮走滑断裂带、霸县-汤阴走滑断裂带密切相关,如庙西、莱州湾、莱南凹陷、青东以及潍北等凹陷(图5e)。受“咸化富烃”的低熟型生烃机制的有庙西、北塘、莘县、保定等凹陷。关于煤成型生烃机制,本文未

表 2 渤海湾超级盆地主要低勘探程度凹陷综合分类

Table 2 Comprehensive classification of major low exploration degree depression of Bohai Bay Super basin

凹陷名称	地面工程	资料情况	凹陷结构类型	沉降类型	生烃机制	演化特征
大厂	地质条件(认识不清)	一类	单断式半地堑	中期型	热液、咸化环境	单独演化
北京	地面工程	三类	单断式半地堑	早期型	咸化环境	单独演化
武清	地质条件(钻探失利)	二类	斜交式半地堑	多期继承型	热液	单独演化
徐水	地质条件(认识不清)	三类	单断式半地堑	早期型	常规	单独演化
保定	地质条件(认识不清)	一类	单断式半地堑	早期型	咸化环境	协同演化
石家庄	地面工程	二类	单断式半地堑	早期型	咸化环境	单独演化
邯郸	地质条件(钻探失利)	三类	地堑	早期型	热液、咸化环境	单独演化
前磨头	地质条件(钻探失利)	三类	单断式半地堑	多期继承型	常规	单独演化
白塘口	地质条件(认识不清)	三类	单断式半地堑	中期型	常规	单独演化
巨鹿	地质条件(钻探失利)	二类	单断式半地堑	早期型	热液	单独演化
丘县	地质条件(钻探失利)	三类	地堑	中期型	煤成油气	单独演化
南宫	地质条件(钻探失利)	三类	单断式半地堑	中期型	常规	单独演化
大营镇	地质条件(钻探失利)	三类	单断式半地堑	中期型	常规	单独演化
冠县	地质条件(钻探失利)	三类	地堑	中期型	热液、咸化环境、煤成油气	协同演化
莘县	地质条件(认识不清)	二类	地堑	中期型	咸化环境、煤成油气	单独演化
汤阴	地质条件(钻探失利)	三类	地堑	早期型	热液	单独演化
德州	地质条件(认识不清)	二类	多断式半地堑	中期型	热液、咸化环境、煤成油气	协同演化
盐山	地质条件(认识不清)	三类	地堑	晚期型	常规	单独演化
吴桥	地质条件(认识不清)	三类	地堑	早期型	热液	单独演化
大中旺	地质条件(认识不清)	一类	斜交式半地堑	多期继承型	常规	单独演化
北塘	地质条件(认识不清)	一类	多断式半地堑	多期继承型	热液、咸化环境	协同演化
落潮湾	地质条件(认识不清)	二类	单断式半地堑	晚期型	常规	单独演化
涧河	地面工程	三类	单断式半地堑	晚期型	煤成油气	协同演化
乐亭	地面工程	三类	单断式半地堑	多期继承型	常规	协同演化
昌黎	地面工程	三类	多断式半地堑	多期继承型	常规	单独演化
青东	地面工程	一类	伸展-走滑复合型半地堑	多期继承型	热液	单独演化
潍北	地面工程	一类	伸展-走滑复合型半地堑	早期型	热液	单独演化
莱南	地面工程	三类	伸展-走滑复合型半地堑	早期型	热液	单独演化
庙西	地质条件(认识不清)	一类	伸展-走滑复合型半地堑	早期型	热液、咸化环境	单独演化
莱州湾	地质条件(认识不清)	一类	伸展-走滑复合型半地堑	早期型	热液、咸化环境	单独演化
辽东	地质条件(认识不清)	一类	伸展-走滑复合型半地堑	晚期型	常规	单独演化
渤东	地质条件(认识不清)	一类	伸展-走滑复合型半地堑	晚期型	咸化环境	单独演化
里坦	地质条件(认识不清)	三类	单断式半地堑	中期型	常规	单独演化
阜城	地质条件(认识不清)	三类	单断式半地堑	中期型	常规	单独演化

作专门阐述,主要为冀南地区及临清拗陷发育厚度稳定的石炭-二叠系煤系烃源岩,山西组-太原组以煤岩、炭质泥岩为主,具备优越的生烃条件,如巨鹿、南宫、德州等凹陷。

3.6 按与主力凹陷协同演化关系分类

渤海湾超级盆地低勘探程度凹陷分布在主力凹陷的周边,这些边缘凹陷与主力凹陷不同时期湖盆的分隔性与连通性是两者协同演化的主要内涵(图5f)。总体上,沙一段-东营组沉积时期,处于连通状态的凹陷为保定-饶阳凹陷、北塘-南堡凹陷、常庄-盐山凹陷、大中旺-沧东凹陷、石家庄-晋县凹陷;孔店组沉积时期,处于连通的凹陷为廊固-大厂-武清凹陷、吴桥-南皮-沧东凹陷、德州-莘县-冠北凹陷。因此,边缘凹陷与主力凹陷的协同演化关系可分为两类,即先分隔演化后逐渐连通型与先连通后逐渐分隔型。对于已证实存在协同演化关系的凹陷,应开展跨凹陷联合勘探,系统分析各凹陷发育时的湖盆特征。两个凹陷之间的连接部位,往往是构造转换带的发育部位,同时也是咸化环境和页岩油气勘探的重点方向,应优先部署。

为实现渤海湾盆地低勘探程度凹陷的高效勘探与资源潜力挖掘,结合上述多维度成因分类开展综合评价,即地面地质条件、凹陷结构特征、盆地沉降演化历史、生烃成因机制类型,以及与区域内富油气凹陷的协调演化关系等,建立渤海湾盆地低勘探程度凹陷综合分类方案评价方案表(表2),进而优选出一批具备良好油气勘探前景的有利凹陷。

4 油气勘探意义

4.1 为超级盆地油气勘探提供新思路

资源潜力及油气来源是低勘探程度凹陷勘探需解决的核心问题。近年来“咸化富烃”机制研究表明咸化水体与强还原环境利于有机质保存和生烃转化,热液活动能促进有机质富集和烃源岩形成。因此,对于渤海湾盆地低勘探程度凹陷关于“烃源岩发育条件不好”等传统观点,需打破固有认知,将咸化环境、热液作用等因素纳入烃源岩综合评价体系。要通过精准刻画凹陷内咸化水体分布范围、演化阶段,结合热液活动的分布规律、活动强度,重新分析有机质的保存条件与生烃转化效率,避免因忽视这些关键因素而误判凹陷资源潜力,为低勘探程度凹陷的油气勘探突破提供更科学、全面的理论支撑。

关于低勘探程度凹陷油气来源,重新认识

该类凹陷与富油气凹陷结构协调演化关系是破解该问题的关键前提。近期勘探实践已证实,在与邻近富油凹陷协同演化的地质背景下,油气存在远源输导的可能性,这也凸显了重新梳理、精准刻画凹陷结构的必要性和紧迫性。以吴桥凹陷为例,若能证实其与沧东富油凹陷存在协同演化关系,后续可重点探讨长距离输导的路径、动力及有效性。

4.2 为新区勘探部署决策提供新依据

渤海湾盆地不同类型低勘探程度凹陷的地质条件、资源潜力及勘探难点存在显著差异,需结合各凹陷实际情况,聚焦各类型凹陷的核心勘探需求,针对性开展地质研究,制定差异化勘探部署策略,才能高效挖掘资源潜力,为低勘探程度凹陷油气勘探突破与油气持续发现提供科学指导。

针对已经取得规模发现的一类凹陷,应从构造样式与圈闭类型、沉积体系与储层展布、供烃条件与输导通道等方面进行分析,分析源储配置与输导条件,建立油气成藏模式,落实增储区带。如保定凹陷,要深化保定凹陷中浅层沉积体系认识,建立河道砂体发育新模式;精细刻画保定凹陷中浅层油气输导体系,深化中浅层油气运聚成藏认识,指导发现新的规模增储区带。

针对获得勘探苗头的二类凹陷,应运用“常非一体”勘探思路,开展咸化源岩高效生排烃机制研究及有效烃源岩评价,落实有利储集体成因类型及分布,探索低勘探程度凹陷突破新路径。如临清各凹陷,要明确各凹陷差异构造演化及沉积充填;深化古近系烃源岩生烃机制与成藏地质条件认识,明确成藏主控因素与资源潜力,进一步夯实有利勘探区带。

针对尚未取得油气突破的三类凹陷,应加强基础地质研究,重点开展凹陷结构及演化、烃源岩生烃潜力及综合地质评价,预测油气勘探前景。如吴桥凹陷,要重新落实烃源岩分布及资源潜力、刻画砂体分布及岩性圈闭,建立成藏模式,落实有利勘探目标,力求油气勘探突破。

5 结论

(1)低勘探程度凹陷具备油气成藏与富集的特殊地质条件。古气候与湖盆环境上,古近纪干热-温湿交替气候与封闭深洼槽耦合,发育咸化湖盆优质烃源岩,这类烃源岩生烃活化能低、生排烃门限浅,资源潜力大;深大断裂与异常热流构成有利热背景,既促进有机质富集与成熟演化,又改善储层物性;部分凹

陷与相邻富油气凹陷在特定演化阶段为统一湖盆,共享优质烃源岩条件,有利于油气远源输导提供。

(2)低勘探程度凹陷勘探滞后的核心是“资料短缺-认识不足-投入有限”的恶性循环,基于勘探主观原因、勘探程度及成效、凹陷结构与沉降史类型、生烃机制类型及与主力凹陷协同演化关系分类等多维度开展综合分类评价,可为低勘探程度凹陷精准勘探部署提供依据。

(3)低勘探程度凹陷勘探对渤海湾超级盆地油气勘探具有重要价值,针对不同类型凹陷制定差异化勘探策略,对已发现油气凹陷聚焦增储、有苗头凹陷探索突破路径、未突破凹陷加强基础研究,助力盆地勘探均衡发展,挖掘潜在油气资源。

致谢:感谢中国石油勘探开发研究院的张光亚、袁选俊教授在本课题研究和本文编写中给与的指导和意见!

References

- Albriki, K., Wei, G. Q., Wang, F. Y., et al., 2024. Nature and Occurrence, Geochemical Characteristics, and Families of the Crude Oils in Sirt Basin, Libya: Implication for Super Rift Basin Petroleum System. *Journal of African Earth Sciences*, 216: 105307. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105307>
- Baptista, R. J., Ferraz, A. E., Sombra, C., et al., 2023. The Presalt Santos Basin, a Super Basin of the Twenty-First Century. *AAPG Bulletin*, 107(8): 1369–1389. <https://doi.org/10.1306/04042322048>
- Chen, J. X., Chen, C. W., Liu, G. Q., et al., 2025. Crude Oil Filling Characteristics and Hydrocarbon Accumulation Model of the Second Member of Paleogene Kongdian Formation in the Deep Subsag Zone of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin. *Lithologic Reservoir*, 37(4):136–146 (in Chinese with English abstract).
- Fang, Z., Pu, X. G., Chen, S. Y., et al., 2021. Investigation of Enrichment Characteristics of Organic Matter in Shale of the 2nd Member of Kongdian Formation in Cangdong Sag. *Journal of China University of Mining & Technology*, 50(2): 304–317 (in Chinese with English abstract).
- Feng, D. H., Liu, C. L., Jiang, W. L., et al., 2020. Oil and Gas Resource Assessment and Exploration Targets of Low Exploration Degree Basins in the Periphery of the Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(6): 26–38 (in Chinese with English abstract).
- Hou, M. C., Cao, H. Y., Li, H. Y., et al., 2019. Characteristics and Controlling Factors of Deep Buried-Hill Reservoirs in the BZ19-6 Structural Belt, Bohai Sea Area. *Natural Gas Industry B*, 6(4): 305–316 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2019.01.011>
- Hou, Z. S., Chen, S. Y., Liu, H. M., et al., 2019. Hydrothermal Fluid Activity and Its Hydrocarbon Geological Significance in Dongying Depression. *Journal of China University of Mining & Technology*, 48(5): 1090–1101 (in Chinese with English abstract).
- Hu, T., Pang, X. Q., Jiang, F. J., et al., 2021. Factors Controlling Differential Enrichment of Organic Matter in Saline Lacustrine Rift Basin: A Case Study of Third Member Shahejie Fm in Dongpu Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 140–152 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, D. X., Du, X. F., Liu, S. X., et al., 2026. Reserve Growth Modeling and Prediction in Oil Fields of the Bohai Bay Basin, China. *Natural Resources Research*, 35(2): 1095–1111. <https://doi.org/10.1007/s11053-025-10598-4>
- Lei, C., Yin, S. Y., Dong, G. Y., et al., 2024. Research on Hydrocarbon Generation Characteristics of Source Rocks in Low-Exploration Area: A Case Study of the Qinnan Sag, Bohai Bay Basin. *Geological Review*, 70(4): 1391–1402 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. L., Wang, M., Qin, F., et al., 2025. Controlling Effects of Lamina Assemblages on Shale Oil Enrichment for Lacustrine Carbonate-Rich Shales: A Case Study of Shales in the Paleogene Shahejie Formation, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 46(2): 392–406 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Gao, Y. F., Li, Y. C., 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 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.442>
- Li, X. W., Yang, B., Jiang, F. J., et al., 2025. Characteristics and Accumulation Model of the Whole Petroleum System in Baoding-Raoyang Sags, Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 46(6): 1108–1125 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. J., Ma, X. F., Luo, Q., et al., 2024. Characteristics and Hydrocarbon Generation Mechanism of Early Low-Mature Oil in Baoding Sag, Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(3): 500–516 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Y., Xie, M., 2025. Hydrocarbon Accumulation Models of Buried Hills in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin.

- Oil & Gas Geology*, 46(2): 407–426 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. Y., He, L. J., 2019. Tectono-Thermal Modeling of the Bohai Bay Basin since the Cenozoic, *Chinese Journal of Geophysics*, 62(1): 219–235 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. Y., He, L. J., Chen, L. C., 2018. Tectono-Thermal Modeling of Cenozoic Multiple Rift Episodes in the Bohai Bay Basin, Eastern China and Its Geodynamic Implications. *International Journal of Earth Sciences*, 107(1): 53–69. <https://doi.org/10.1007/s00531-017-1550-1>
- Liu, Q. Y., He, L. J., Huang, F., et al., 2016a. Cenozoic Lithospheric Evolution of the Bohai Bay Basin, Eastern North China Craton: Constraint from Tectono-Thermal Modeling. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 368–382. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.10.013>
- Liu, Q. Y., Zhang, L. Y., Zhang, C., et al., 2016b. Lithospheric Thermal Structure of the North China Craton and Its Geodynamic Implications. *Journal of Geodynamics*, 102: 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.09.005>
- Liu, Q. Y., He, L. J., Yi, Z. J., et al., 2022. Anomalous Post-Rift Subsidence in the Bohai Bay Basin, Eastern China: Contributions from Mantle Process and Fault Activity. *Tectonics*, 41: e2021TC006748. <https://doi.org/10.1029/2021tc006748>
- Lü, J. Z., Liu, J., Sun, N. D., et al., 2019. The “Super Basin Model” — A New Idea of Increasing Reserves and Production in Mature Basins. *International Petroleum Economics*, 27(9): 40–48 (in Chinese with English abstract).
- Ni, L. T., Du, Y. S., Jiang, L., et al., 2024. Medium-to-Low Maturity Shales in the Faulted Lacustrine Basin in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin: Theoretical Understanding of Their Hydrocarbon Generation, Reservoir Formation, and Shale Oil Enrichment and High-Yield Nature and Exploitation Practices. *Oil & Gas Geology*, 45(5): 1417–1430 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.11743/ogg20240515>
- Pang, X. J., Du, X. F., Wang, G. M., 2023. Genetic Mechanism and Pore Evolution of High-Quality Glutenite Reservoirs of Deep Kongdian Formation in BZ19-6, Bohai Sea. *Earth Science*, 48(11): 4153–4174 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.080>
- Sternbach, C. A., Merrill, R. K., 2023. Super Basin Thinking: Fulfilling the Promise—Introduction. *AAPG Bulletin*, 107(8): 1191–1197. <https://doi.org/10.1306/blt-nintro032123>
- Tari, G., Bada, G., Boote, D. R. D., et al., 2023. The Pannonian Super Basin: A Brief Overview. *AAPG Bulletin*, 107(8): 1391–1417. <https://doi.org/10.1306/02172322098>
- Teng, C. Y., Zou, H. Y., Hao, F., 2014. Control of Differential Tectonic Evolution on Petroleum Occurrence in Bohai Bay Basin. *Science China Earth Sciences*, 44(4): 579–590 (in Chinese).
- Tian, L. X., Wang, Q. B., Liu, X. J., et al., 2020. Geological Features and Their Participation in the Formation of Silicified Clastic Reservoirs in the Shahejie Formation of Laizhouwan Sag, Bohai Sea. *Oil & Gas Geology*, 41(5): 1073–1082 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. B., Liu, X. J., Ye, T., 2025. Analysis of the Main Controlling Factors of the Fractured Reservoirs Development in the Buried Hills of the Archean Metamorphic Rocks in the Bohai Sea Area. *Earth Science*, 50(2): 453–465 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.010>
- Wang, W. Q., Li, Y. H., Li, H. G., et al., 2025. Petroleum Accumulation Conditions and Exploration Direction in the Cambrian-Ordovician Buried-Hills of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(3): 17–28 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Y. B., Liu, Q. Y., Lu, F., et al., 2025. Accumulation Mechanisms of Nonmarine Shale Oil in China: A Case Study of the Shahejie Formation in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin. *Science China Earth Sciences*, 55(7): 2268–2289 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. Y., Zhao, X. Z., Wang, E. Z., et al., 2021. Sedimentary Environment and Organic Enrichment Mechanisms of Lacustrine Shale: A Case Study of the Paleogene Shahejie Formation, Qikou Sag, Bohai Bay Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 573: 110404. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110404>
- Xu, C. G., Yu, H. B., Wang, J., et al., 2019. Formation Conditions and Accumulation Characteristics of Bozhong 19-6 Large Condensate Gas Field in Offshore Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 46(1): 27–38 (in Chinese with English abstract).
- Xu, T. W., Duan, J. B., Zhang, C. F., et al., 2026. Significant Oil and Gas Discoveries and Inspirations in Underexplored Areas of Old Oil Fields: A Case Study of Southwest Sag in Dongpu Depression, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 51(1): 257–271 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H. F., Fang, Z., Wang F. L., et al., 2025. Influ-

- ence of Deep Hydrothermal Fluid on Organic Matter Enrichment and Its Activity Mode in Shahejie Formation and Dongying Formation of Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 46(6): 1089–1107 (in Chinese with English abstract).
- Yu, L. D., Peng, J., Xu, T. W., et al., 2024. Analysis of Organic Matter Enrichment and Influences in Fine-Grained Sedimentary Strata in Saline Lacustrine Basins of Continental Fault Depressions: Case Study of the Upper Sub-Section of the Upper 4th Member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(2): 701–722 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q. H., Zhang, L., Liu J. P., et al., 2024. Early Prediction of Source Rocks in Zhongjiannan Basin in Low Exploration Area. *Marine Geology Frontiers*, 40(4): 39–46 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. W., Yue, H. Y., Xie, W., et al., 2022. Application of the Seismic Reflection Method in Detecting the Fine-Scale Geological Structure of the Baoding Sag, Jizhong Depression. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 46(6): 1359–1368 (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(5): 1008–1023 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. W., Pang, X. Q., Wang, P., et al., 2025. New Ideas for Identifying Concealed Traps in the Paleozoic Carbonate Buried-Hills of the Shulu Sag in the Bohai Bay Basin and Their Exploration Effectiveness. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(3): 29–42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Y., Zhu, H. H., Shi, Q. R., et al., 2025. Gravity-Flow Deposition System and Distribution Patterns in the Third Member of the Dongying Formation in the Deep Subsag Area of the Qikou Sag. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(3): 57–69 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. F., He, H. Q., Zhu, Q. Z., 2023. Major Discovery and Enlightenment from Petroleum Exploration of Dongying Formation in Baoding Sag, Bohai Bay Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(2): 11–23 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S., Liu, H., Jiang, Y, L., et al., 2019. Ramp Zone Types and Their Hydrocarbon Distribution Characteristics in the Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 40(2): 223–235 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Yang, H.F., Huang, Z., et al., 2020. Strike-Slip Structural Characteristics and Its Controlling Effect on Hydrocarbon Accumulation in Miaoxinan Sag, Bohai Sea. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 27(4): 35–44 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Huang, H. P., 2026. Ultradeep Drilling beyond 10 km Revealing New Insights into Earth Systems and Resources. *Communications Earth & Environment*, 7: 124. <https://doi.org/10.1038/s43247-026-03246-z>
- Zhu, G. Y., Yang, H. J., Tan, Q. W., et al., 2026. Theory of Petroleum Geology at 10 000-Meter Depth: Challenges of Hydrocarbon Exploration Depth Limits and Resource Potential. *Oil & Gas Geology*, 47(2): 366–384 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈家旭, 陈长伟, 刘国全, 等, 2025. 渤海湾盆地沧东凹陷深凹区古近系孔二段原油充注特征及成藏模式. 岩性油气藏, 37(4): 136–146.
- 方正, 蒲秀刚, 陈世悦, 等, 2021. 沧东凹陷孔二段页岩有机质富集特征研究. 中国矿业大学学报, 50(2): 304–317.
- 冯德浩, 刘成林, 姜文利, 等, 2020. 准噶尔外围低勘探程度盆地油气资源评价与勘探方向. 中国石油勘探, 25(6): 26–38.
- 侯明才, 曹海洋, 李慧勇, 等, 2019. 渤海海域渤中19-6构造带深层潜山储层特征及其控制因素. 天然气工业, 6(4): 305–316.
- 侯中帅, 陈世悦, 刘惠民, 等, 2019. 东营凹陷热液流体活动及其油气地质意义. 中国矿业大学学报, 48(5): 1090–1101.
- 胡涛, 庞雄奇, 姜福杰, 等, 2021. 陆相断陷咸化湖盆有机质差异富集因素探讨: 以东濮凹陷古近系沙三段泥页岩为例. 沉积学报, 39(1): 140–152.
- 李军亮, 王民, 秦峰, 等, 2025. 陆相富碳酸盐页岩纹层组合对页岩油富集的控制作用: 以渤海湾盆地济阳坳陷古近系沙河街组页岩为例. 石油与天然气地质, 46(2): 392–406.
- 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.
- 李熹微, 杨博, 姜福杰, 等, 2025. 渤海湾盆地冀中坳陷保定凹陷-饶阳凹陷全油气系统特征与成藏模式. 石油学报, 46(6): 1108–1125.
- 李志军, 马学峰, 罗强, 等, 2024. 渤海湾盆地保定凹陷早熟低熟油特征及成烃机制. 石油学报, 45(3): 500–516.
- 李卓奕, 谢敏, 2025. 渤海湾盆地东濮凹陷潜山油气成藏模式. 石油与天然气地质, 46(2): 407–426.
- 雷闯, 殷世艳, 董桂玉, 等, 2024. 低勘探程度地区烃源岩生

- 烃特征研究:以渤海海域秦南凹陷为例.地质论评, 70(4): 1391—1402.
- 刘琼颖,何丽娟,2019.渤海湾盆地新生代以来构造-热演化模拟研究.地球物理学报, 62(1): 219—235.
- 吕建中,刘嘉,孙乃达,等,2019.“超级盆地模式”:成熟盆地油气增储上产新思路.国际石油经济, 27(9): 40—48.
- 倪良田,杜玉山,蒋龙,等,2024.渤海湾盆地济阳坳陷陆相断陷湖盆中-低成熟度页岩“富烃-成储-富集-高产”的理论认识与开发实践.石油与天然气地质, 45(5): 1417—1430.
- 庞小军,杜晓峰,王冠民,等,2023.渤海海域渤中19-6构造及围区深层孔店组砂砾岩优质储层成因及孔隙演化.地球科学, 48(11): 4153—4174.
- 滕长宇,邹华耀,郝芳,2014.渤海湾盆地构造差异演化与油气差异富集.中国科学:地球科学, 44(4): 579—590.
- 田立新,王清斌,刘晓健,等,2020.渤海海域莱州湾凹陷沙河街组硅化碎屑岩地质特征及其储层意义.石油与天然气地质, 41(5): 1073—1082.
- 王清斌,刘晓健,叶涛,等,2025.渤海海域太古界变质岩潜山裂缝型储层发育主控因素分析.地球科学, 50(2): 453—465.
- 王文庆,李廷辉,李洪革,等,2025.渤海湾盆地黄骅坳陷寒武系-奥陶系潜山内幕油气成藏条件及勘探方向.地质科技通报, 44(3): 17—28.
- 魏永波,刘全有,卢双舫,等,2025.中国陆相页岩油富集机制:以渤海湾盆地饶阳凹陷沙河街组为例.中国科学:地球科学, 55(7): 2268—2289.
- 徐长贵,于海波,王军,等,2019.渤海海域渤中19-6大型凝析气田形成条件与成藏特征.石油勘探与开发, 46(1): 25—38.
- 徐田武,段金宝,张成富,等,2026.老油田低勘探区油气重要发现与启示:以渤海湾盆地东濮凹陷西南洼为例.地球科学, 51(1): 257—271.
- 杨海风,房舟,王飞龙,等,2025.渤海湾盆地沙河街组-东营组深部热液对有机质富集的影响及模式.石油学报, 46(6): 1089—1107.
- 于乐丹,彭军,许天宇,等,2024.陆相断陷咸化湖盆细粒沉积地层有机质富集特征及控制因素分析:以东营凹陷沙河街组第四段上亚段纯上次亚段为例.沉积学报, 42(2): 701—722.
- 余秋华,张莉,刘金萍,等,2024.低勘探海域中建南盆地烃源岩早期预测.海洋地质前沿, 40(4): 39—46.
- 张保卫,岳航羽,谢伟,等,2022.反射地震在冀中坳陷保定凹陷精细地质结构探测中的应用.物探与化探, 46(6): 1359—1368.
- 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(5): 1008—1023.
- 张宏伟,庞雄奇,王鹏,等,2025.渤海湾盆地束鹿凹陷古生界碳酸盐岩潜山隐蔽型圈闭识别新思路及其勘探成效.地质科技通报, 44(3): 29—42.
- 张俊杨,朱华汇,石倩茹,等,2025.歧口凹陷深凹区东三段重力流沉积体系及分布模式.地质科技通报, 44(3): 57—69.
- 张锐锋,何海清,朱庆忠,等,2023.渤海湾盆地保定凹陷东营组油气勘探重要发现与启示.中国石油勘探, 28(2): 11—23.
- 赵珊,刘华,蒋有录,等,2019.渤海湾盆地缓坡带类型及其油气分布特征.石油与天然气地质, 40(2): 223—235.
- 赵野,杨海风,黄振,等,2020.渤海海域庙西南洼陷走滑构造特征及其对油气成藏的控制作用.油气地质与采收率, 27(4): 35—44.
- 朱光有,杨海军,谭清文,2026.万米深层油气地质学理论与极限勘探深度的挑战及资源潜力.石油与天然气地质, 47(2): 366—384.