

引用: 米立军, 徐建永, 刘志峰, 等. 新构造运动对渤海凸起区、斜坡—洼陷区浅层油气最终成藏的控制作用 [J]. 中国石油勘探, 2024, 29(1): 92-105.
Mi Lijun, Xu Jianyong, Liu Zhifeng, et al. Control of Neotectonic movements on the ultimate hydrocarbon accumulation in shallow formations in bulge and slope-subsag areas in Bohai Sea [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(1): 92-105.

新构造运动对渤海凸起区、斜坡—洼陷区 浅层油气最终成藏的控制作用

米立军^{1,2} 徐建永^{1,2} 刘志峰^{1,2} 朱文奇^{1,2} 吴斌^{1,2}

(1 中海油研究总院有限责任公司; 2 海洋油气勘探国家工程研究中心)

摘要: 浅层新近系馆陶组—明化镇组为渤海的主力含油气层系。新构造运动是渤海新生代晚期发生的对油气成藏影响最为深刻的构造事件, 对浅层油气成藏的影响远大于深层, 控制了渤海浅层油气最终成藏。研究表明, 新构造运动导致的凹陷晚期快速生排烃、多种类型圈闭发育、油气运移活跃等, 整体上调控制了浅层油气藏的定性和分布, 但对不同构造带浅层油气成藏的控制作用存在差异。根据构造位置和油气成藏特点, 可将渤海浅层油气藏归为两大类: 凸起区浅层油气藏、斜坡—洼陷区浅层油气藏。通过系统分析两类构造带浅层油气的成藏特点, 明确新构造运动对两类构造带油气最终成藏的控制作用与富集模式差异, 并构建了相应成藏模式。凸起区的浅层具有“晚期油源断层+浅层稳定储盖组合”的“台阶”型油气成藏模式; 斜坡—洼陷区的浅层具有“洼中隆+晚期断层”“深层运移脊+晚期断层”两种“倒漏斗”型油气成藏模式。渤海浅层已进入了以岩性油气藏为主的勘探阶段, 应加强新构造运动控制下的“晚期运移断层+岩性圈闭”组合勘探。

关键词: 新构造运动; 渤海; 浅层油气藏; 凸起区; 斜坡—洼陷区; 成藏模式; “倒漏斗”型

中图分类号: TE121 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2024.01.007

Control of Neotectonic movements on the ultimate hydrocarbon accumulation in shallow formations in bulge and slope-subsag areas in Bohai Sea

Mi Lijun^{1,2}, Xu Jianyong^{1,2}, Liu Zhifeng^{1,2}, Zhu Wenqi^{1,2}, Wu Bin^{1,2}

(1 CNOOC Research Institute Co., Ltd.; 2 National Engineering Research Center of Offshore Oil and Gas Exploration)

Abstract: The shallow Neogene Guantao-Minghuazhen Formations are the main hydrocarbon-bearing series in Bohai Sea. The Neotectonic movements in the late Cenozoic were the most profound tectonic events in Bohai Sea, which had much greater influence on hydrocarbon accumulation in shallow formations than that in deep formations, and controlled the ultimate hydrocarbon accumulation in shallow formations. The study results show that the Neotectonic movements resulted in the rapid hydrocarbon generation and expulsion in the late sag subsidence period, development of various types of traps, and active hydrocarbon migration, which adjusted and controlled the ultimate hydrocarbon accumulation and determined the distribution of shallow oil and gas reservoirs in Bohai Sea. However, the control effect of the Neotectonic movements on hydrocarbon accumulation in shallow formations varied in various structural belts. Based on the structural position and hydrocarbon accumulation characteristics, shallow oil and gas reservoirs are classified into two major categories, i.e., shallow oil and gas reservoirs in bulge area, and shallow oil and gas reservoirs in the slope-

基金项目: 中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目“中国近海新区新领域勘探技术”(KJGG-2021-0300)。

第一作者简介: 米立军(1965-), 男, 天津人, 博士, 2007年毕业于中国石油大学(北京), 教授级高级工程师, 现主要从事海洋油气勘探管理和综合研究工作。地址: 北京市朝阳区太阳宫南街6号院中海油大厦B座, 邮政编码: 100028。E-mail: milj@cnooc.com.cn

通信作者简介: 刘志峰(1982-), 男, 吉林公主岭人, 硕士, 2008年毕业于中国石油大学(北京), 高级工程师, 现主要从事中国近海石油地质条件研究及新区、新领域勘探研究工作。地址: 北京市朝阳区太阳宫南街6号院中海油大厦A座, 邮政编码: 100028。E-mail: liuzhf2@cnooc.com.cn

收稿日期: 2023-08-28; 修改日期: 2023-12-12

subsag area. By analyzing hydrocarbon accumulation characteristics of shallow oil and gas reservoirs in these two structural belts, the control effect of the Neotectonic movements on the ultimate hydrocarbon accumulation and enrichment patterns of shallow oil and gas reservoirs in different structural belts are identified, and the corresponding hydrocarbon accumulation patterns are established. Among them, the hydrocarbon accumulation in shallow bulge area is characterized by a “stepped” pattern controlled by “late fault connecting source rock + stable shallow reservoir-cap rock combination”. The hydrocarbon accumulation in shallow slope-subsag area shows “inverted funnel” pattern controlled by “uplift in subsag + late fault” and “deep ridge for gas migration + late fault”. At present, the exploration target in shallow formations in Bohai Sea is dominated by lithologic oil and gas reservoir, and the exploration should be focused on “late fault for gas migration + lithologic trap” combination controlled by the Neotectonic movements.

Key words: Neotectonic movement, Bohai Sea, shallow oil and gas reservoir, bulge area, slope-subsag area, hydrocarbon accumulation pattern, inverted funnel type

0 引言

渤海湾盆地海域部分(简称渤海)是中国近海油气资源最富集的地区。截至 2021 年底,在渤海发现的油气地质储量中,浅层(新近系馆陶组—明化镇组)储量占比约为 70%,是渤海的主力含油气层系。

21 世纪初,米立军曾在系统分析渤海浅层油气成藏主控因素的基础上,提出在影响渤海浅层大中型油气田形成的诸多因素中,上新世—全新世的新构造运动起到了关键作用^[1],即渤海浅层的油气分布受控于新构造运动,并阐明了 3 个主要原因:(1)渤海湾盆地“向心式”构造演化及新近纪以来盆地热流值降低使得渤海生排烃晚;(2)新构造运动形成了众多圈闭,为油气聚集提供了有利场所;(3)新构造运动形成的大量晚期断层与不整合面、砂体沟通构成良好的油气运移通道。在此后的油气勘探实践中,新构造运动理论指导渤海浅层不断获得勘探突破。

渤海浅层油气藏在凸起区和斜坡—洼陷区皆有分布,且均有大中型油气田发现。迄今,针对新构造运动控制或影响凸起区浅层油气成藏论述较多^[1-7],主要阐述了新构造运动所导致的地层差异升降在浅层形成的众多圈闭、晚期断裂与储盖组合配置有利于油气向凸起区浅层运移输导,并富集成藏。随着勘探程度提高,渤海浅层油气勘探已从凸起区向斜坡—洼陷区过渡,斜坡—洼陷区的浅层油气勘探突破也日益增多,然而有关新构造运动对斜坡—洼陷区浅层油气成藏的影响或控制的研究仍然相对较少。与凸起区相比,斜坡—洼陷区的整体勘探程度相对低,且晚期断裂发育程度总体上不如凸起区密集,两者浅层油气成藏的主控因素必然存在一定的差异,但斜坡—洼陷区的勘探潜力相对较大,是未来浅层油气勘探的主要区带。因此,开展有关新构造运动对浅层油气成藏的控制作用

的研究,尤其是明确新构造运动对斜坡—洼陷区浅层油气成藏的控制机理,对于未来渤海的浅层油气勘探意义十分重大。

本文在详细论述新构造运动对浅层油气成藏控制影响因素的基础上,系统分析和对比渤海凸起区和斜坡—洼陷区的油气成藏特征及其差异性,并分别建立了油气成藏模式。新构造运动控制渤海浅层油气最终成藏的认识及建立的油气成藏模式,对国内外同类地区或类似盆地油气勘探具有参考和借鉴价值。

1 地质背景

渤海位于渤海湾盆地东部,面积约为 $7.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,一级构造单元主要包括埕宁隆起(海域)、渤中坳陷、辽东湾坳陷(海域)、济阳坳陷(海域)和黄骅坳陷(海域),是渤海湾盆地重要的组成部分(图 1)。

渤海湾盆地主要经历 3 期构造演化:(1)前裂谷期,中生代晚期区域穹曲,地幔上隆,伴随强烈火山活动;(2)裂陷期,主要表现为古近纪铲式正断层发育及掀斜断块隆起和地堑沉降;(3)裂后期,主要表现为新近纪热衰减的坳陷幕。根据动力学机制的差异,在裂后期以 5.3Ma 为界,划分出裂后热沉降幕和新构造运动幕(图 2)。

在新构造运动时期,板块碰撞、岩石圈减薄以及华北克拉通的破坏,使渤海湾盆地普遍发生了早期断裂再活化、晚期断裂大量发育、地层褶皱变形和凹陷区加速异常沉降等^[8-9]。这些新构造运动整体受控于印度—欧亚板块的陆—陆碰撞作用、太平洋板块相对欧亚板块向西的俯冲作用^[10-11]和 华北克拉通破坏及岩石圈的减薄作用^[12-13]。对渤海湾盆地而言,渤中凹陷是该盆地构造演化的“归宿”,是晚期构造活动最强烈的地区,因此新构造运动在渤中凹陷及其周围的表现更为明显。

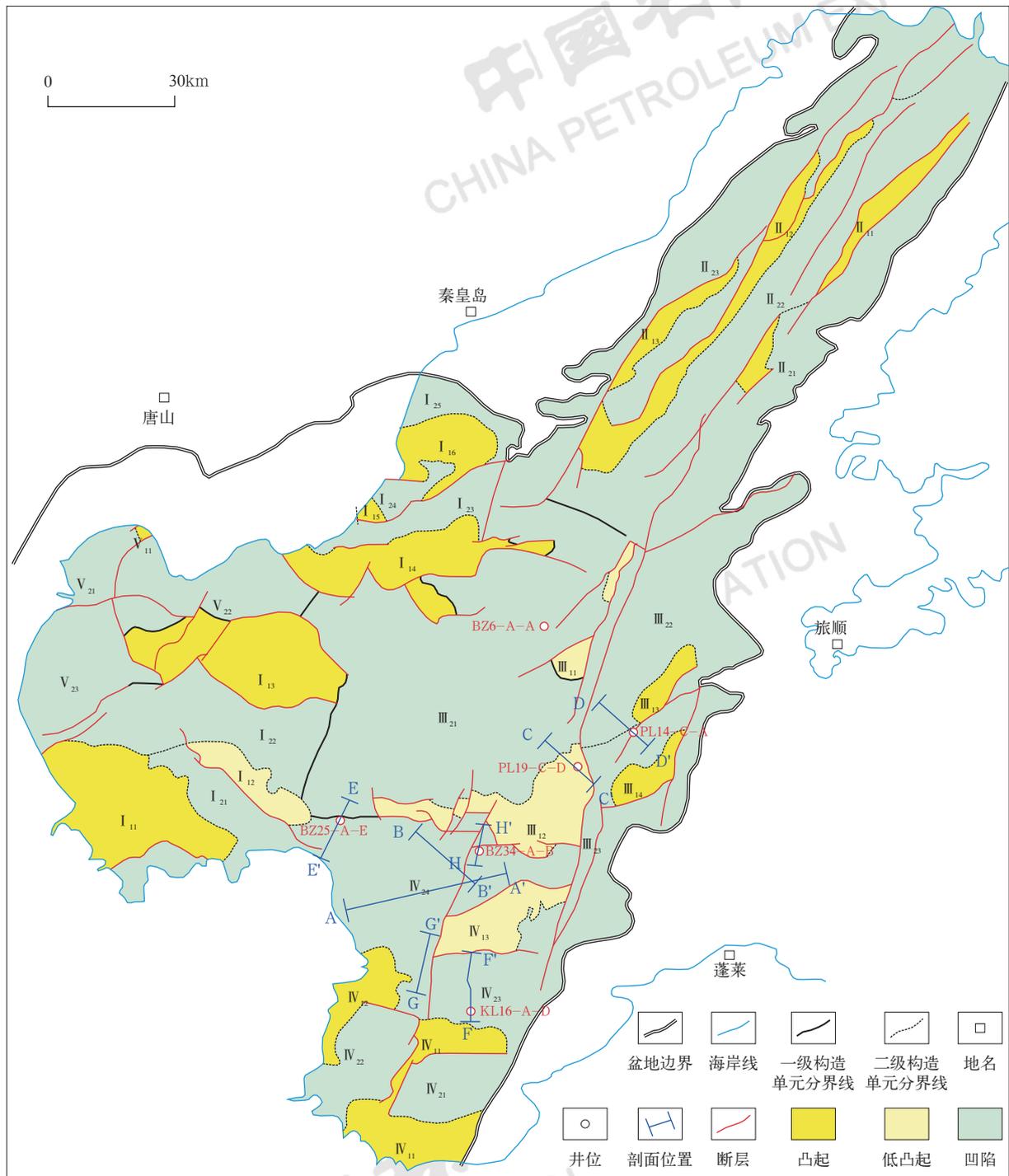


图1 渤海构造单元划分图

Fig.1 Division of structural units in Bohai Sea

I—埕宁隆起（海域）：I₁₁—埕子口凸起；I₁₂—埕北低凸起；I₁₃—沙垒田凸起；I₁₄—石白坨凸起；I₁₅—马头营凸起；I₁₆—秦南凸起；

I₂₁—埕北凹陷；I₂₂—沙南凹陷；I₂₃—秦南凹陷；I₂₄—乐亭凹陷；I₂₅—昌黎凹陷。

II—辽东湾拗陷（海域）：II₁₁—辽东凸起；II₁₂—辽西凸起；II₁₃—辽西南凸起；II₂₁—辽东凹陷；II₂₂—辽中凹陷；II₂₃—辽西凹陷。

III—渤中拗陷：III₁₁—渤东低凸起；III₁₂—渤南低凸起；III₁₃—庙西北凸起；III₁₄—庙西南凸起；III₂₁—渤中凹陷；III₂₂—渤东凹陷；III₂₃—庙西凹陷。

IV—济阳拗陷（海域）：IV₁₁—淮北凸起；IV₁₂—垦东—青坨子凸起；IV₁₃—莱北低凸起；IV₂₁—莱南凹陷；IV₂₂—青东凹陷；IV₂₃—莱州湾凹陷；

IV₂₄—黄河口凹陷。

V—黄骅拗陷（海域）：V₁₁—老王庄凸起；V₂₁—北塘凹陷；V₂₂—南堡凹陷；V₂₃—歧口凹陷



图 2 渤海地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column in Bohai Sea

2 新构造运动对油气成藏的控制作用

新构造运动在不同地区有不同的内涵, 一般是指地质历史上发生时间较晚的构造运动, 在渤海主要特指上新世 (5.3Ma) 以来发生的晚期构造运动。新构造运动有多种表现形式, 对油气成藏也表现出建设性和破坏性两方面的作用。

2.1 新构造运动的内涵

新构造运动的概念最早由苏联地质学者 V. A. Obruchev 于 1948 年提出, 并将其定义为新近纪晚期至第四纪中期的构造运动^[14]。随后, 国内外学者针对世界不同地区的新构造运动开展了系统分析, 并逐渐发展为一门新的地球科学分支学科^[14-15]。迄今, 新构造运动所涵盖的时间范围在不同地区存在认识差异, 但对其内涵则形成了统一认识, 即在某区域经历重大构造重组事件后、建立现代应力场的过程中所伴

随的构造变形和运动^[16-17]。

针对中国的新构造运动, 普遍认为其开始于中新世中期 (距今 15—10Ma), 受控于印度板块与欧亚板块碰撞及造成的块体侧向挤出^[18-20]。板块碰撞引起的青藏高原隆升是中国最新一期重大构造重组事件。在随后的侧向挤出作用下, 中国在东部太平洋板块和菲律宾海板块俯冲作用的综合影响下具有了现今的挤压构造应力场。这期构造应力场的转变在中国东、西部的沉积盆地内均有所记录, 例如: 塔里木盆地中新世以来发生的 4 幕构造活动^[19]; 柴西地区上新统顶部形成的区域不整合及相应的挤压构造^[20]; 东海陆架盆地中新世晚期龙井运动造成的西湖凹陷中央背斜带的形成^[21]; 南海中央海盆在早中新世末期停止扩张^[18]。

2.2 新构造运动表现形式及影响

新构造运动在不同的地区有不同的表现形式。在

渤海，其表现形式主要有凹陷晚期快速沉降、晚期断裂极其发育、浅层挤压褶皱变形强烈、晚期岩浆活动明显、近现代天然地震活跃等。渤海新构造运动的这些表现对油气成藏产生重要影响，其中晚期断裂大量发育、早期断裂晚期再活化以及早晚期断裂所形成的各种断层组合，决定了浅层油气最终成藏的部位和层位。

(1) 凹陷晚期快速沉降。新构造运动促进凹陷晚期快速沉降。在渤海湾盆地新生代构造—沉积演化过程中，盆地的沉降和沉积中心具有从边缘向中部的渤中凹陷迁移的特征，即“向心式”演化。渤中

凹陷是渤海湾盆地中心区晚期快速沉降的典型凹陷，在渐新世中晚期—第四纪期间，渤中凹陷的沉降速率是其周边陆区凹陷的4倍以上。渤中凹陷中新统一上新统厚3000~3500m，第四系厚600~800m^[8]，显示出新构造运动导致的快速沉降特征。黄河口凹陷西洼和东洼中新统一第四系明化镇组—平原组的沉积厚度可达1200~1700m，下伏沙河街组和东营组烃源岩在新构造运动期快速埋深、成熟，并大量生排烃(图3a、b)。因此，新构造运动导致的晚期快速沉降，促进了凹陷中的烃源岩在晚期快速成熟，有利于大规模生排烃(图3c)。

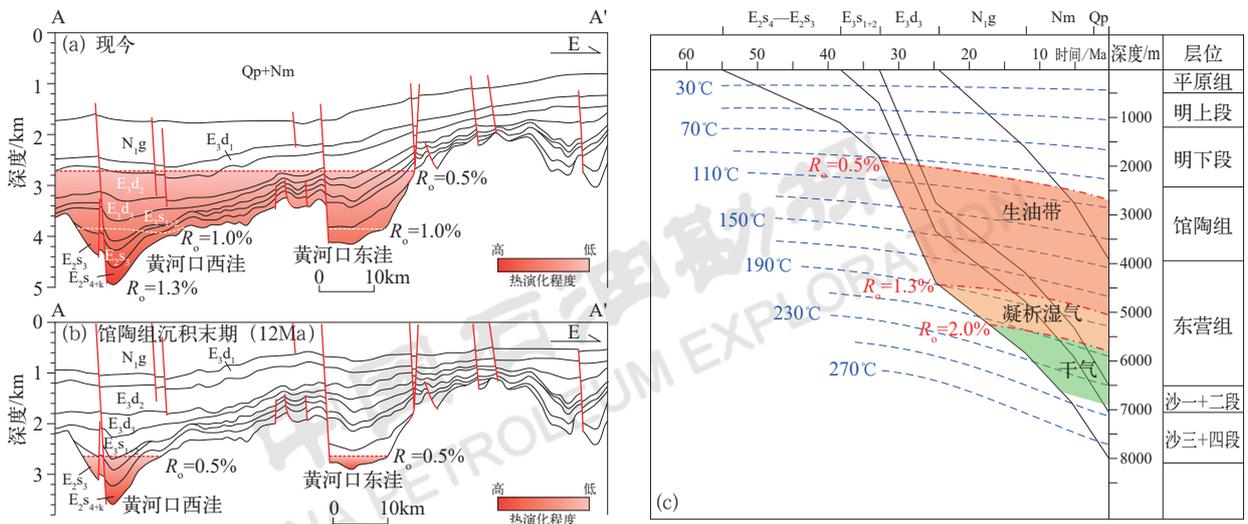


图3 黄河口凹陷地层演化剖面图(a、b)和渤中凹陷BZ6-A-A井埋藏史图(c)(剖面位置见图1)
Fig.3 Stratigraphic evolution sections in Huanghekou Sag (a, b) and burial history of Well BZ6-A-A in Bozhong Sag (c) (section location is in Fig.1)

(2) 晚期断裂极其发育。新生代晚期断裂活动是渤海新构造运动最直观、最重要的表现形式。由于新构造运动较为强烈和普遍，导致渤海浅层断裂十分发育(图4)。渤海越往浅层，断裂数量越多。据统计，渤海第四系底面断裂的数量大约是新近系底面的2倍，而新近系底面断裂的数量大约是古近系底面的3~4倍^[3]。这些断裂相互组合或与先存断裂组合，形成众多断裂带或断裂系统。这些断裂对油气成藏起到两方面作用，一是为油气从深部向浅层运移提供了通道；二是断裂造成的地层差异升降以及断裂之间的各种组合，形成了一系列圈闭，为油气成藏提供了场所。

(3) 浅层挤压褶皱变形强烈。浅层褶皱变形以短轴背斜为主，走向近南北向。因受边界条件的限制，不同构造区的构造走向不同。发育在近东西走向的大断层下降盘的短轴背斜，走向呈北东向。在背斜形成

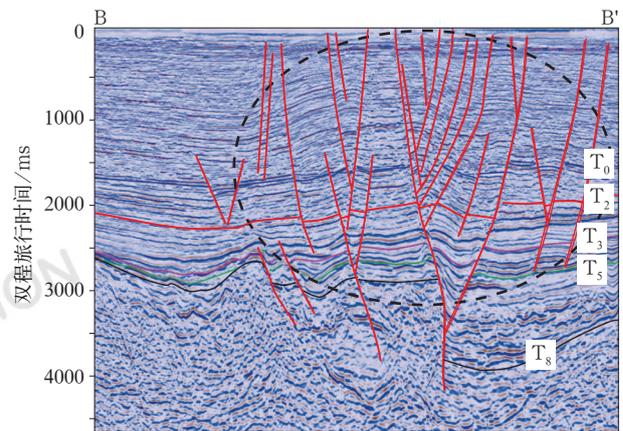


图4 渤海新构造运动产生的晚期断裂和挤压褶皱剖面(剖面位置见图1)
Fig.4 Seismic profile showing late faults and compressive folds controlled by the Neotectonic movements in Bohai Sea (section location is in Fig.1)

后,地壳发生引张,产生一系列扭张性正断层,使背斜复杂化(图 4)。挤压褶皱产生的浅层背斜在凸起、斜坡—洼陷区中均有发育。其中,发育在披覆背斜背景上的浅层褶皱是有利的油气聚集区,如沙垒田凸起、渤南低凸起;而发育在斜坡—洼陷区的浅层褶皱因缺少主大断裂,只有在晚期断裂与深层运移脊和洼中隆有效配置的情况下,才能将深层烃源岩生成的油气向浅层高效运移,形成规模性的油气聚集,如莱州湾凹陷垦利 10-2 构造、黄河口凹陷渤中 34 构造等。此外,还存在另一类浅层褶皱,发育在塑性底辟构造之上,如莱州湾凹陷的垦利 11-2 构造。

(4) 晚期岩浆活动明显。渤海湾盆地火成岩的发育与深大断裂系统密切相关,渤海火成岩分布最著名的地区是“新港重力高”区。大量钻井证实“新港重力高”是高密度玄武岩所致,与海河大断裂有关。例如,渤海西部的 H3 井在东营组—明化镇组揭示厚度近 1000m 玄武岩^[3]。渤中凹陷中—南部也广泛发育火成岩,其东营组火成岩总面积为 842km²,馆陶组火成岩总面积为 332km²。晚期岩浆活动为烃源岩的热演化补充了额外热能,起到加速生排烃的作用。有学者研究认为,渤中凹陷西南部渤中 19-6 大型凝析气田的形成就与其附近岩浆活动有一定关联^[22]。

(5) 近现代天然地震活跃。渤海是我国东部天然地震活跃区之一。据国家地震局统计,自 1548 年以来,渤海共发生 7 级(含)以上地震 4 次^[3]。渤海湾盆地现代地震活动仍然十分频繁,在 1970 年至 2004 年期间,在盆地及其周围共记录到 2~7.9 级的地震 5709 次^[4]。天然地震频繁活动也是渤海新构造运动的表现形式之一,并对油气藏的形成和调整产生一定影响,有可能破坏已形成的油气藏,也可能对油气藏的油水关系进行调整改造。

渤海新构造运动对油气成藏既有建设性作用,也有破坏性作用。

建设性作用主要有:凹陷晚期快速沉降和岩浆活动加速了烃源岩热演化,促进了晚期大量生排烃;断层差异活动和地层褶皱变形使得浅层形成大量圈闭,为油气聚集提供了有利场所;晚期活动性断层与不整合面、砂体等沟通,为油气运移提供了有利通道。渤海从周缘向渤中凹陷,油气主成藏期逐渐变晚,渤中凹陷的油气以晚期成藏为主,即明化镇组沉积期(距今 5.3Ma)以来^[23-27],与新构造运动的时间一致。

破坏性作用主要体现在对油气藏的保存有不利影响,晚期断层活动过于强烈、晚期天然地震等均可能

造成油气逸散。但渤海浅层之所以能够形成众多大中型油气田,总体上还是新构造运动建设性作用远大于破坏性作用,在油气成藏过程中,油气的供给大于逸散,达到了动平衡。因此,渤海的新构造运动整体上控制了浅层油气的最终成藏,以及浅层油气田的定型和分布。

3 新构造运动对凸起区浅层圈闭类型及成藏模式的控制作用

凸起区是渤海浅层油气勘探的重点靶区,目前已发现蓬莱 19-C、秦皇岛 32-6、秦皇岛 33-1/1S、曹妃甸 11-1 等一批大中型油气田。渤海浅层新近系以浅水三角洲相和河流相沉积为主,在凸起区埋深较浅,不具备生烃条件。因此,深层烃源岩生成的油气如何向浅层有效运移和聚集是凸起区浅层油气成藏的关键。

3.1 凸起区浅层圈闭类型和特点

受新构造运动的影响,渤海的新近纪凸起区发生了快速的构造—热沉降作用,广泛接受馆陶组、明化镇组沉积。同时,受先存断裂活动及其派生的晚期断层改造,渤海浅层形成了一大批规模性圈闭,为浅层油气聚集提供了有利场所。这些圈闭主要包括披覆背斜型圈闭、背斜改造型圈闭及构造—岩性圈闭等。

(1) 凸起区披覆背斜型圈闭。该类型圈闭是新近系馆陶组和明化镇组逐层超覆于基底古隆起之上并继承性发育的背斜构造圈闭。目前,该类圈闭主要分布于石臼坨、沙垒田、渤南、庙西及莱北等凸起上,是油气运移的最终指向区,并已经勘探证实了一大批中大型油田(如秦皇岛 32-6、曹妃甸 11-1)。这类圈闭通常幅度较小(一般为 25~40m),但是面积较大(一般为 25~50km²)。

(2) 凸起区背斜改造型圈闭。该类圈闭是由披覆背斜圈闭经断裂改造而形成。在新构造运动作用下,郯庐断裂、张蓬断裂等大型先存断裂带再次活化并剧烈活动,在其邻近凸起区的披覆背斜之上形成大量派生断裂。这些晚期强烈活动的派生断裂系统将披覆背斜构造复杂化并将其分割成多个断块,同时引起地层翘倾,导致原有圈闭的幅度和面积进一步增大。例如,蓬莱 19-C 油田位于渤南低凸起东北端,处于郯庐断裂带之上,被渤中凹陷、渤东凹陷、黄河口凹陷和庙西凹陷所围限。在新构造运动时期受近南北向走滑断裂活动的强烈改造,蓬莱 19-C 油田所处区域在扭压

应力作用下派生一系列北东向及近东西向正断裂，进而形成一个西翼平缓、东翼陡峭的大型扭断背斜构造（图5）^[5]。该扭断背斜的圈闭幅度可高达580m，面积约为125km²，是目前渤海湾盆地浅层储量规模最大的油气田发育区^[5]。

(3) 凸起区构造—岩性圈闭。该类圈闭是指具有构造背景的、明显受岩性变化控制的圈闭。按照成因差异，这类圈闭可进一步细分为沉积型和改造型，其中沉积型构造—岩性圈闭是指浅水三角洲砂体或河道

相砂体在一定构造背景下沿上倾方向或沿相边界处尖灭而形成的圈闭，而改造型构造—岩性圈闭通常为浅层砂体被晚期断层切割封堵而形成的断层—岩性圈闭。受新构造运动影响，渤海在新近纪期间成为整个渤海湾盆地的沉积沉降中心^[6]，整体处于河流—湖泊交互沉积体系。受构造运动、湖平面波动及气候等因素控制，馆陶组、明化镇组发育河流相及浅水三角洲相砂岩与湖相泥岩频繁交互沉积，形成大量多砂体叠置连片的大规模浅层岩性圈闭。

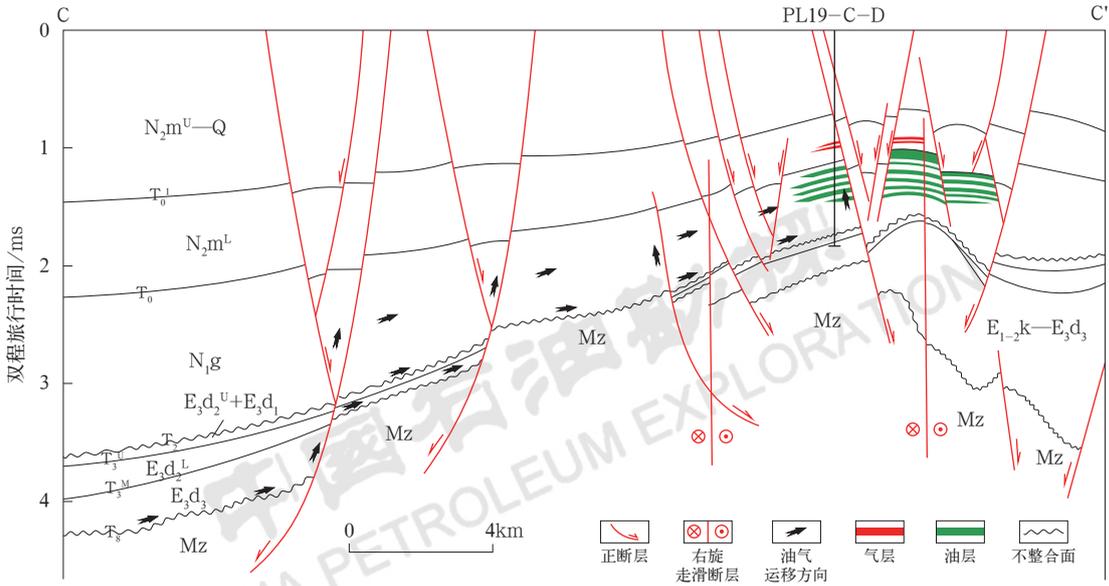


图5 渤中凹陷蓬莱19-C油田成藏模式图（剖面位置见图1）

Fig.5 Hydrocarbon accumulation pattern of PL19-C Oilfield in Bozhong Sag (section location is in Fig.1)

3.2 凸起区浅层“台阶”型成藏模式

渤海凸起区浅层油气藏属于典型的“它源型”油气藏。渤海的主力烃源岩为沙三段烃源岩，次要烃源岩包括沙四段、沙一+二段和东三段的烃源岩，这些烃源岩主要分布于凹陷区。凸起区浅层若要形成油气藏，凹陷区烃源岩生成的油气必须通过一定的通道运移过来。凸起区发育渗透性砂体及不整合面，且与通源断层相接，是公认的、最为有效的油气运移通道^[28]。

渤海凸起区浅层油气成藏的关键在于油气运移。新构造运动期的油源断层活动是油气发生垂向穿层运移的关键，浅层稳定的储盖组合是油气向凸起区大面积运移后能聚集成藏的必要条件。烃源岩生成的油气沿油源断层向上运移，到凸起附近与凸起区浅层砂体沟通，再横向运移，呈现出逐渐往凸起区爬升的特点。

因此，新构造运动控制凸起区浅层油气成藏具有“晚期油源断层+浅层稳定储盖组合”的“台阶”型成藏模式。

根据凸起区与强活动断裂之间距离的差异，可将凸起区浅层油气成藏归纳为靠近和远离强活动断裂两种富集模式（图6）^[29]。在靠近强活动断裂的区域，凸起区浅层通常伴生大量的晚期断裂。这些断裂向下切入馆陶组输导层和深部构造脊，同时向上与明化镇组的多层砂体大面积搭接，可促使聚集于深部的油气向浅层连片砂体中高效垂向运移，并进一步侧向运移和聚集，最终形成浅层大规模油气藏^[5]，如蓬莱19-C油田即为该种模式（图6a）。但在该模式下，也存在部分断层活动过于强烈而导致油气逸散的风险。

在远离强烈活动断裂的区域，凸起边界的控凹断层在新构造运动期强烈活动，并向上延伸至馆陶组和明化镇组的浅层连片砂体之中，使得深层烃源岩或

“中转站”砂体中的油气运移至浅层连片砂体输导层中，并发生距离侧向运移向凸起区汇聚成藏。在该模式下，油气藏的保存条件较好，常在凸起区形成大中型的构造—岩性油气田，例如曹妃甸 11-1、秦皇岛 32-6（图 6b）和秦皇岛 33-1 南等油田。

除了为浅层油气运移提供通道之外，由于浅层砂

体整体厚度较薄（通常 5~30m），新构造运动期活动断层切割的砂体与泥岩对接概率大，可为浅层薄层砂体提供侧向遮挡，从而形成有效的构造—岩性圈闭。新构造运动也可能造成深层古近系油藏的破坏，致使其发生调整、二次运移和汇聚^[30]，为浅层油气成藏提供一定的物质基础。

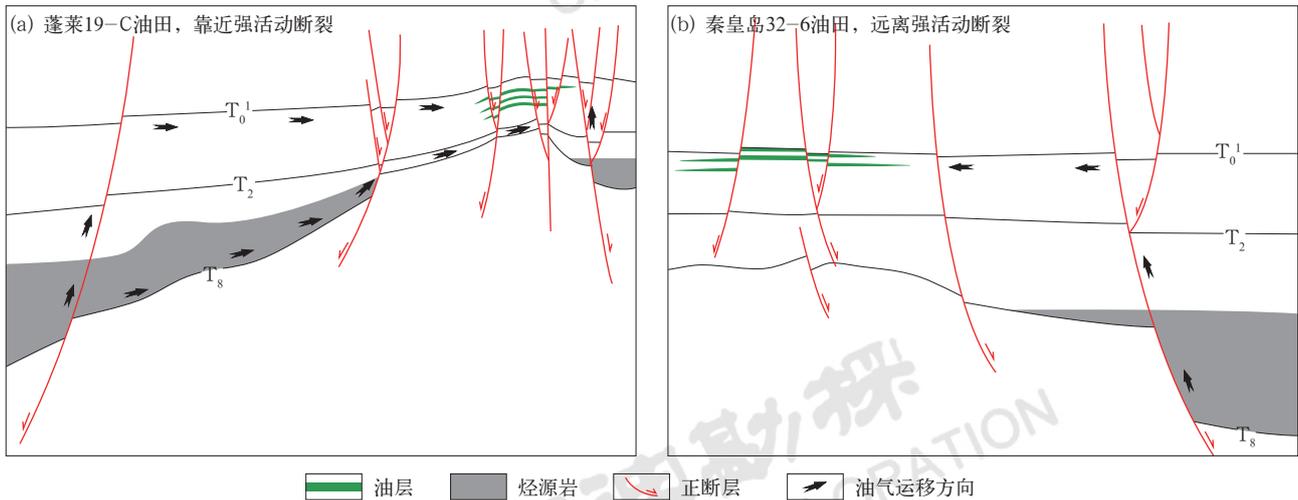


图 6 渤海凸起区浅层油气成藏模式^[28]

Fig.6 Hydrocarbon accumulation pattern of shallow oil and gas reservoirs in Bohai Sea^[28]

4 新构造运动对斜坡—洼陷区浅层圈闭类型及成藏模式的控制作用

随着渤海勘探程度的逐渐提高，从凸起区走向斜坡—洼陷区是必然趋势。新构造运动除控制凸起区浅层油气最终成藏，还控制斜坡—洼陷区浅层油气最终成藏。斜坡—洼陷区浅层油气成藏与凸起区相比既有区别又有共性，区别主要在于圈闭的类型、特点以及油气的运移路径存在差异，而共性在于均受到新构造运动的控制作用。

4.1 斜坡—洼陷区浅层圈闭类型和特点

在渤海新构造运动和东部郯庐断裂持续走滑的共同影响下，渤中凹陷及其周缘形成了各式各样的圈闭，主要有多种成因背斜圈闭、复杂断块/断鼻圈闭、构造—岩性圈闭等。

(1) 斜坡—洼陷区挤压背斜/断背斜圈闭。该类挤压背斜/断背斜主要沿郯庐断裂带发育，在斜坡—凹陷内分布较为广泛，如黄河口凹陷的渤中 34 构造带、渤东凹陷的蓬莱 25-6 构造、渤中凹陷的渤中 6-1 构造、莱州湾凹陷的垦利 9-5 构造等^[31]。这些背斜构

造的成因均与郯庐断裂的晚期活动密切相关，主要存在以下两种情况^[3]：①在渤海先期残存的低幅前古近系基底高之上，古近纪期间形成了披覆型正向构造，随后郯庐断裂的走滑活动加剧了新近系的构造挤压反转，形成背斜，例如黄河口凹陷中央的渤中 34 构造带；②郯庐断裂的晚期活动导致部分狭窄型凹陷两侧的对偶断裂产生挤压作用，形成挤压背斜，例如庙西凹陷中央的蓬莱 14-C 构造（图 7）。

(2) 斜坡—洼陷区逆牵引背斜/断背斜圈闭。该类型背斜/断背斜一般发育在陡坡带控凹边界断层下降盘，主要存在两种情况：①受张性同生正断层控制，常形成逆牵引背斜、断背斜等，例如位于石南陡坡边界控凹断层下降盘的曹妃甸 6-4 构造，受石南 1 号断层晚期强烈伸展的控制，下降盘的馆陶组和明化镇组发育逆牵引背斜—断背斜圈闭；②控凹边界断层为上陡下缓的犁式断层，东营组沉积之后转变为走滑断层，断层断面较陡，在逆牵引和走滑挤压共同作用下形成背斜构造，例如渤中 25-A 构造位于渤南低凸起西倾没端，向南倾伏的大断层把构造分成上、下两盘，其中下降盘是一个被南西—北东向断层和东西向断层分隔的具逆牵引特点的背斜构造（图 8）。

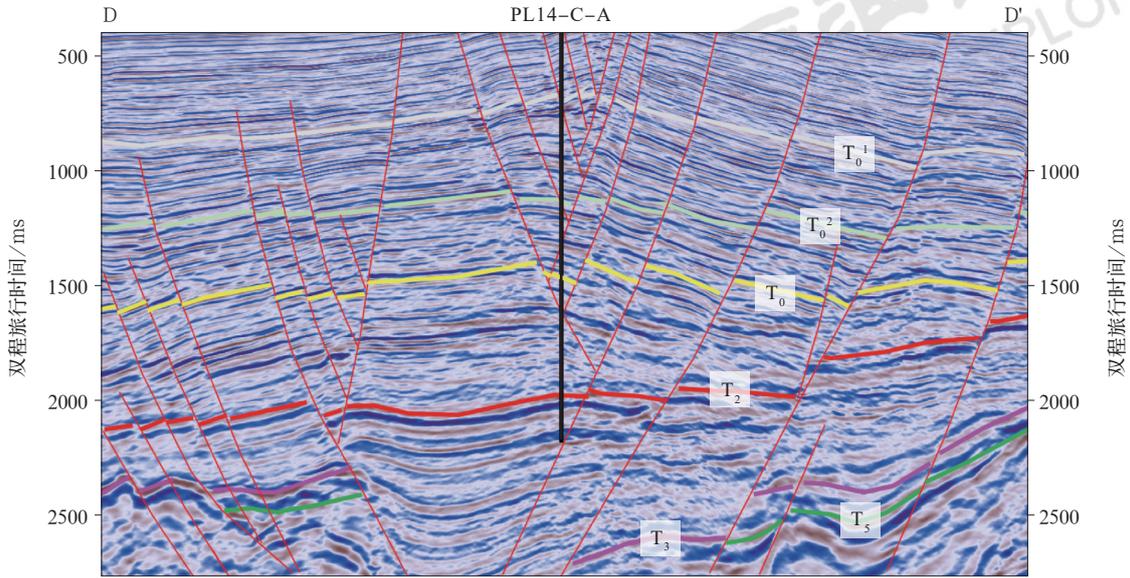


图7 蓬莱 14-C 构造地震剖面图 (剖面位置见图 1)

Fig.7 Seismic profile of PL14-C structure (section location is in Fig.1)

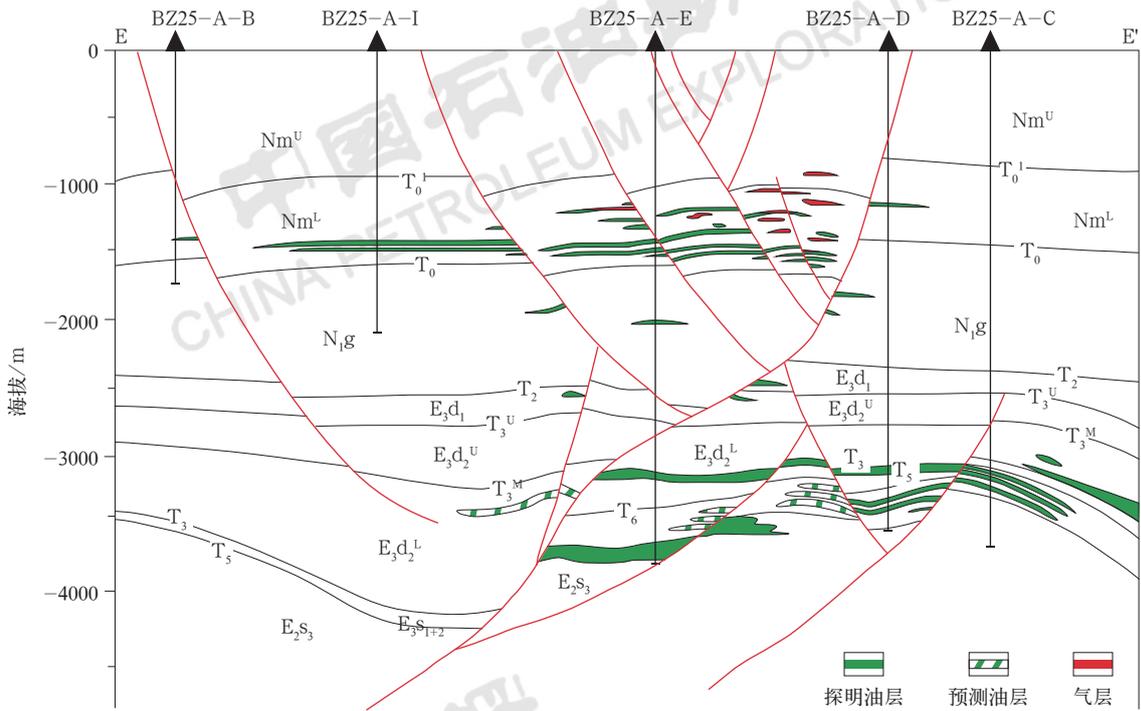


图8 渤中 25-A 构造油藏剖面图 (剖面位置见图 1)

Fig.8 Oil reservoir section of BZ25-A structure (section location is in Fig.1)

(3) 斜坡—洼陷区复杂断块 / 断鼻圈闭。新构造运动形成的浅层复杂断块和断鼻在斜坡—洼陷区较为常见。例如，渤海北部的辽东湾地区，郯庐断裂贯穿辽中凹陷，在辽中凹陷形成一系列复杂断块圈闭群。新近纪期间，辽中凹陷在相对较弱的右旋走滑拉分应力场的影响下形成了一系列呈雁行排列

的走滑调节断裂，并在这些调节断裂之间进一步形成了一系列断块型圈闭，包括锦州 17 断块圈闭群、锦州 22 断块圈闭群、旅大 12 断块圈闭群等。渤海南部的莱州湾凹陷不但受伸展断裂的强烈活动发生断块差异沉降，而且受到了郯庐断裂带东支走滑作用的强烈改造，导致洼陷区断裂非常发育，形成一

系列复杂断块圈闭 (图 9)^[32]。

(4) 斜坡—洼陷区构造—岩性圈闭。斜坡—洼陷区浅层构造—岩性圈闭与凸起区总体上相似,但由于斜坡—洼陷区构造背景平缓,砂体尖灭型岩性圈闭发育程度不如凸起区,以砂体被晚期断层切割封堵而形成的构造—岩性圈闭为主,并且砂体成因多为河流—湖泊交互。因此,斜坡—洼陷区浅层构造—岩性圈

闭主要发育在断裂较为发育的构造带。渤中凹陷西南部和莱州湾凹陷是斜坡—洼陷区发育构造—岩性圈闭的典型地区 (图 9b)。在渤中凹陷西南部,即渤中 19-6 大型凝析气田附近,形成了渤中 19-2、渤中 19-4 等以浅层明化镇组为主的构造—岩性圈闭;在莱州湾凹陷的洼陷区,形成了以垦利 10-2 为代表的浅层明化镇组构造—岩性圈闭。

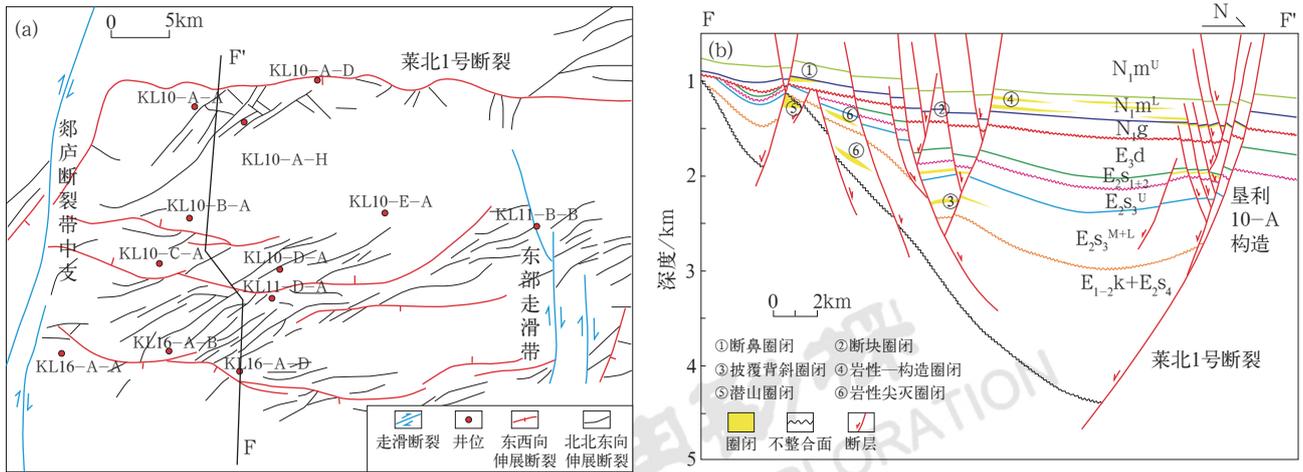


图 9 莱州湾凹陷明化镇组下段顶面断裂特征图 (a) 及斜坡带圈闭发育类型图 (b) (剖面位置见图 1)

Fig.9 Fault characteristics on the top surface of the lower member of Minghuazhen Formation (a) and trap types in slope zone (b) in Laizhouwan Sag (section location is in Fig.1)

4.2 斜坡—洼陷区“倒漏斗”型成藏模式

渤海新构造运动形成的晚期断层与深层斜坡区运移脊或洼陷区洼中隆的有效配置,是其将深层烃源岩生成的油气有效输导至浅层圈闭中聚集成藏的关键,因而形成了两种高效的“倒漏斗”型油气成藏模式:一种主要发育在凹陷内的斜坡区,由深层

运移脊和晚期断层构成,油气先在深层不断向运移脊汇聚,然后再由晚期断层输导到浅层圈闭成藏;另一种主要发育在洼陷区,由深层洼中隆和晚期断层构成,油气先在深层向洼中隆汇聚,然后再通过晚期断层纵向输导到浅层圈闭成藏。深层运移脊+晚期断层、洼中隆+晚期断层组合在空间展布上呈倒扣的漏斗状,因此称其为“倒漏斗”型成藏模式 (图 10)。

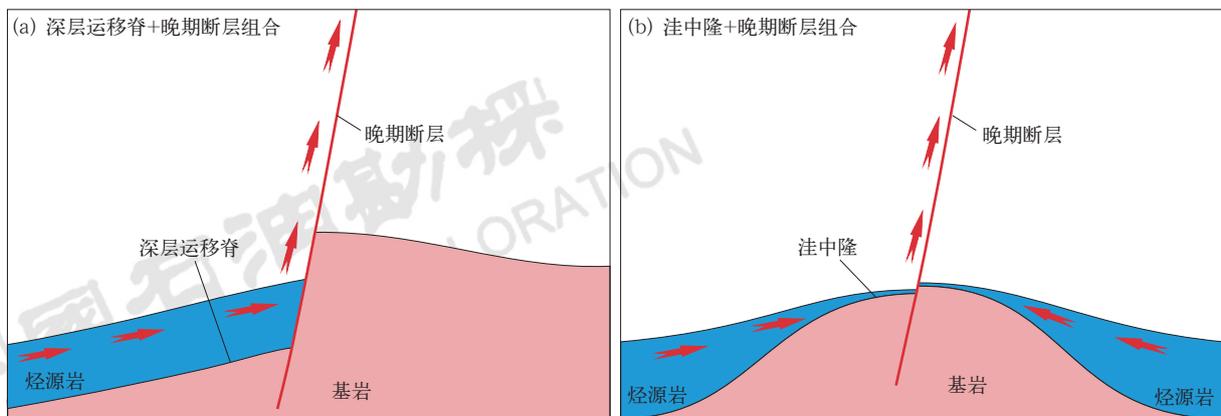


图 10 “倒漏斗”型成藏模式示意图

Fig.10 Schematic “inverted funnel” type hydrocarbon accumulation pattern

其中，洼中隆+晚期断层组合一般呈完整的“倒漏斗”型；深层运移脊+晚期断层组合一般呈半个“倒漏斗”型。

(1) 斜坡区：深层运移脊+晚期断层“倒漏斗”型成藏模式。黄河口凹陷的垦利3-B油田和渤中25-A油田是斜坡区深层运移脊+晚期断层“倒漏斗”型成藏模式的代表。以垦利3-B油田为例，该油田位于黄河口凹陷西南斜坡带，处于郯庐走滑断裂西支构造带上，为渤中34中央构造脊南缘发育的一个掀斜断块。其早期主要受走滑断裂的控制和近东西向断层的影响，形成半背斜或断块的构造背景；晚期受走滑断层派生的次级断层影响，浅层构造被复杂化，地层明显向北西倾，形成了一系列的局部圈闭。垦利3-B油田具有多套含油层系，主要含油层位为明下段、馆陶组和东营组（图10）。垦利3-B构造毗邻生烃条件良好的黄河口凹陷西洼，周缘的砂体

和次级断层比较发育，油气运移较为通畅，成藏条件良好。

黄河口凹陷西洼南部斜坡带早期受强裂伸展作用影响，斜坡带北部的大型顺向主干断裂直接沟通烃源岩。随后，来自凹陷深部的油气沿着斜坡带北部边界断层向上运移，遇到南北向展布的骨架砂体向斜坡带高部位横向输导至反向正断层后，向上运移并成藏。在斜坡带部位，油气的分布具有自生烃洼陷向斜坡带方向逐渐变浅的特征，其中邻近洼陷的垦利3-B油田到靠近斜坡带远端的垦利9-E/F油田的油气分布体现出这一特征，如垦利3-B油田的油气主要富集在明下段下部II—IV油组，南侧垦利9-A油田的油气富集在明下段中下部III—IV油组，垦利9-E/F油田的油气主要富集在明下段上部I—II油组和明化镇组上段。这表明该区油气在阶梯状运移过程中，成藏层系逐阶抬高，斜坡带越高部位，成藏层位越浅（图11）。

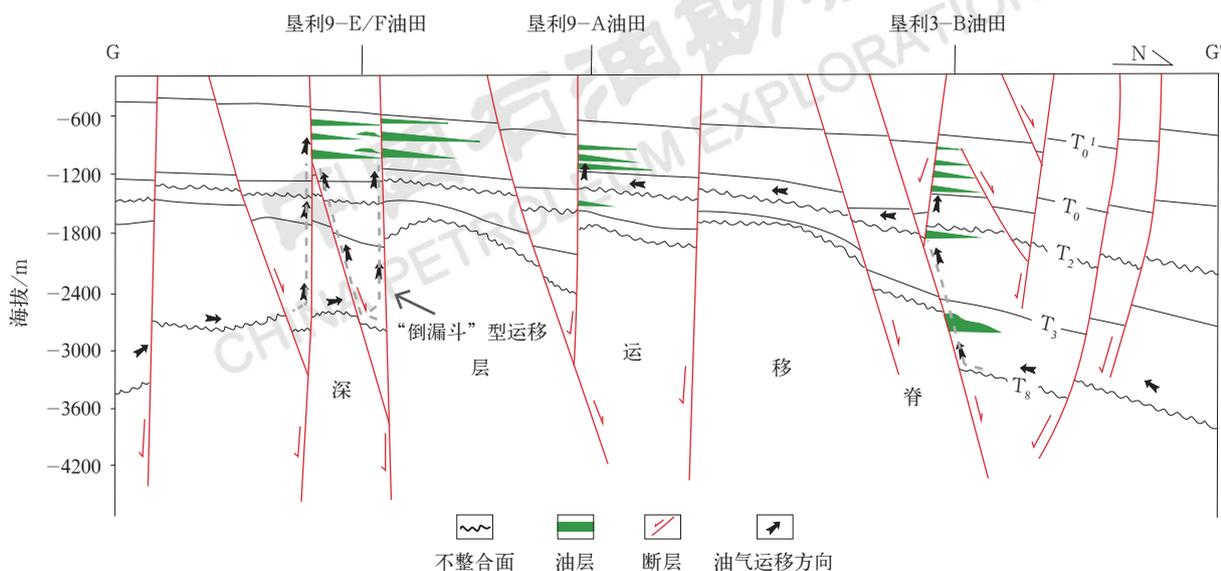


图11 黄河口凹陷西洼南部斜坡带“深层运移脊+晚期断层”成藏模式图（剖面位置见图1）

Fig.11 Hydrocarbon accumulation pattern of “deep ridge for gas migration + late fault” in the southern slope of Huanghekou west subsag (section location is in Fig.1)

(2) 洼陷区：洼中隆+晚期断层“倒漏斗”型成藏模式。黄河口凹陷渤中34构造带、渤中凹陷西部渤中8-4构造区是洼中隆+晚期断层“倒漏斗”型成藏模式的代表，以渤中34构造带为例进行阐述。郯庐走滑断裂西支近南北向穿过黄河口凹陷，将凹陷分为东洼和西洼，同时受走滑作用影响在凹陷中形成洼中隆。渤中34复杂断裂构造带位于洼中隆之上，受郯庐断裂走滑作用和晚期新构造运动影响产生了一系列复杂断块，区内多条近东西向次级断层将构造复

杂化，形成一系列圈闭。渤中34油田群在明下段、馆陶组、东上段、东下段、沙一+二段和沙三段均有油气发现，呈现复式成藏的特征，含油层位整体上由南到北呈现出由深至浅的变化趋势。渤中34构造区新近系断层发育，明化镇组发育浅湖相沉积，泥岩厚度大，多数大于800m，泥地比普遍大于70%，盖层极为发育，油气藏的保存条件好。

渤中34油田群的油气主要来自黄河口凹陷沙河街组烃源岩。在新构造运动期区域引张作用背景下，

烃源岩晚期快速埋藏、快速成熟，生烃高峰集中发生在新构造运动期。这一时期活动断裂贯通中央隆起活跃烃源岩与储层，形成油气快速汇聚、运移的优势通道，油气多层系快速充注成藏。由于断裂的垂向导，聚集在深部洼中隆上的古近系油气很可能大部分

被运移到新近系成藏，甚至运移到地表散失。在古近系活跃烃源岩的范围内，无论断裂发育与否，即使有大量的油气向浅部新近系运移，古近系仍然可以成为油气聚集的有利场所。渤中 34 油田群浅层为断裂贯通型，晚期快速成藏，深层为直接充注成藏（图 12）。

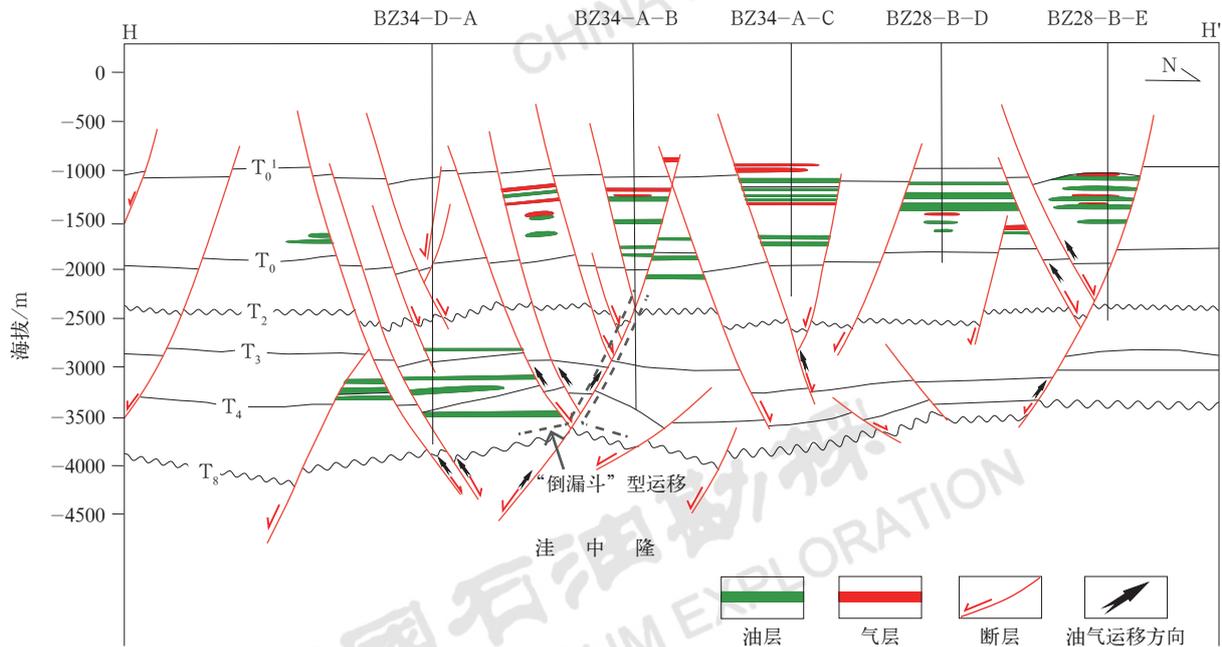


图 12 渤中 34 构造带“洼中隆 + 晚期断层”成藏模式图（剖面位置见图 1）

Fig.12 Hydrocarbon accumulation pattern of “uplift in subsag + late fault” in BZ34 structural belt (section location is in Fig.1)

5 勘探前景

渤海新构造运动控制浅层油气成藏理论认识在过去多年指导了一批浅层大中型油气田的发现，为渤海增储上产作出了重要贡献。随着勘探程度的提高，渤海浅层构造圈闭越来越少，剩余圈闭以岩性圈闭、构造—岩性圈闭为主。经统计，在 2021—2022 年针对渤海浅层钻探的 38 个圈闭中，岩性圈闭（含构造—岩性圈闭）为 29 个，占 76.3%。目前渤海浅层已进入以岩性油气藏勘探为主的时代，新构造运动理论认识及成藏模式对其同样具有指导作用。

从新构造运动对浅层油气成藏的控制作用来看，晚期运移断层和浅层岩性圈闭匹配的地区，其油气成藏条件好，是有利的勘探方向，应加强新构造运动控制下的晚期运移断层 + 浅层岩性圈闭组合勘探。

渤海的渤中凹陷及周缘、郯庐断裂带沿线油气资源相对富集，晚期运移断层和浅层岩性圈闭相对发育，主要包括 8 个大的有利区带，分别为渤中凹

陷西南环、沙垒田凸起东段及渤中低凸起、黄河口凹陷及渤南低凸起周缘、莱州湾凹陷及莱北低凸起、石臼坨凸起及南部陡坡带、渤东低凸起及周缘、庙西北凸起及周缘、秦南凹陷东洼—东南洼。这些区带中有的已经发现一些浅层岩性油气藏，有的还需进一步探索，是未来渤海浅层岩性油气藏勘探的主攻方向。

6 结论

(1) 新构造运动导致渤海在新生代晚期发生快速沉降、岩浆事件频发，并广泛发育晚期断裂和多种类型圈闭，促进烃源岩快速成熟和生排烃、油气向浅层运移和汇聚，整体调整、控制了渤海浅层的油气最终成藏，决定了浅层油气藏的定型与分布。

(2) 新近系馆陶组—明化镇组是渤海浅层的主力含油气层系，已钻浅层油藏分析表明，凸起区和斜坡—洼陷区浅层油气的成藏主控因素和模式存在差异。在斜坡—洼陷区，洼中隆和运移脊的油气汇

聚作用对于浅层油气成藏十分必要,晚期断层与注中隆和运移脊的有效配置是浅层成藏的关键。在浅层勘探“下坡进凹”阶段,必须加强成藏模式指导。但目前的认识仍十分局限,应在斜坡—洼陷区钻探实践逐步增加的过程中,注重对成藏模式的进一步细化和深入研究。

(3)渤海浅层油气勘探已经进入岩性勘探阶段,晚期运移断层和浅层岩性圈闭耦合配置是控制其成藏的关键因素,未来应加强新构造运动控制下的晚期运移断层+浅层岩性圈闭组合勘探。

参考文献

- [1] 米立军. 新构造运动与渤海海域上第三系大型油气田[J]. 中国海上油气, 2001,15(1):21-28.
Mi Lijun. The Neotectonism and major Neogene oil and gas fields in Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2001,15(1): 21-28.
- [2] 龚再升, 王国纯. 渤海新构造运动控制晚期油气成藏[J]. 石油学报, 2001,22(2):1-7.
Gong Zaisheng, Wang Guochun. Neotectonism and late hydrocarbon accumulation in Bohai Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001,22(2): 1-7.
- [3] 周斌, 邓志辉, 徐杰, 等. 渤海新构造运动及其对晚期油气成藏的影响[J]. 地球物理学进展, 2009,24(6):2136-2143.
Zhou Bin, Deng Zhihui, Xu Jie, *et al.* Characteristics of neotectonism and their relationship with late hydrocarbon accumulation in the Bohai Sea[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(6):2136-2143.
- [4] 朱伟林, 米立军, 龚再升, 等. 渤海海域油气成藏与勘探[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 235.
Zhu Weilin, Mi Lijun, Gong Zaisheng, *et al.* Hydrocarbon accumulation and exploration in Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 2009: 235.
- [5] 邓运华. 郯庐断裂带新构造运动对渤海东部油气聚集的控制作用[J]. 中国海上油气, 2001,15(5):301-305.
Deng Yunhua. Control of the Neotectonism along Tancheng-Lujiang fracture zone on hydrocarbon accumulation in the eastern Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2001,15(5):301-305.
- [6] 龚再升. 中国近海新生代盆地至今仍然是油气成藏的活跃期[J]. 石油学报, 2005,26(8):1-6.
Gong Zaisheng. Cenozoic China offshore basins keeping active hydrocarbon accumulation to present[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(8):1-6.
- [7] Gerbova V G, Tikhomirov V V. Russian school contribution to the birth and development of neotectonics[J]. Geologische Rundschau, 1982,71:513-518.
- [8] 王应斌, 黄雷, 刘廷海. 渤海新构造运动主要特征与构造型式[J]. 中国海上油气, 2012,24(增刊1):6-10.
Wang Yingbin, Huang Lei, Liu Tinghai. The main characteristics and structural styles of Bohai neotectonism[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012,24(S1):6-10.
- [9] Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Wilde S A, *et al.* Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(1):103-119.
- [10] Norhrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia[J]. Geology, 1995,23(8):719-722.
- [11] Allen M B, Macdonald D I M, Xun Z, *et al.* Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997,14(7):951-972.
- [12] Xu Yigang, Li Hongyan, Pang Chongjin, *et al.* On the timing and duration of the destruction of the North China Craton[J]. Chinese Science Bulletin, 2009,54(19):1974-1989.
- [13] Zhu G, Jiang D, Zhang B, *et al.* Destruction of the eastern north China Craton in a backarc setting: evidence from crustal deformation kinematics[J]. Gondwana Research, 2012,22(1): 86-103.
- [14] Pavlides S. Looking for a definition of Neotectonics[J]. Terra Nova, 1989,1(3):233-235.
- [15] Vanbalen R, Houtgast R, Cloetingh S. Neotectonics of the Netherlands: a review[J]. Quaternary Science Reviews, 2005, 24(3-4):439-454.
- [16] Bhattacharya S, Bhattacharya H N, Das B C, *et al.* Neotectonic movements and channel evolution in the indian subcontinent: issues, challenges and prospects[M]. Berlin: Himalayan Neotectonics and Channel Evolution, Springer International Publishing AG; 2022,1-49.
- [17] 徐杰, 计凤桔, 周本刚. 有关我国新构造运动起始时间的探讨[J]. 地学前缘, 2012,19(5):284-292.
Xu Jie, Ji Fengju, Zhou Bengang. On the lower chronological boundary of the Neotectonic period in China[J]. Earth Science Frontiers, 2012,19(5):284-292.
- [18] Tapponnier P, Peltzer G, Dain Y L, *et al.* Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 1982,10(10):611.
- [19] 黄玉平, 姜正龙, 李景瑞, 等. 塔里木盆地新构造运动时期构造应力方向[J]. 油气地质与采收率, 2013,20(3):5-9.
Huang Yuping, Jiang Zhenglong, Li Jingrui, *et al.* Analysis of tectonic stress direction of Tarim Basin during neotectonic period[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(3):5-9.
- [20] 吴颜雄, 薛建勤, 冯云发, 等. 柴西地区新构造运动特征及其对成藏影响[J]. 石油实验地质, 2013,35(3):243-248.
Wu Yanxiong, Xue Jianqin, Feng Yunfa, *et al.* Neotectonic movement feature and its controlling effect on accumulation in western Qaidam Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013,35(3):243-248.
- [21] 张力方, 徐杰, 彭艳菊, 等. 东海地区新构造运动研究[J]. 地震地质, 2014,36(3):692-705.
Zhang Lifang, Xu Jie, Peng Yanju, *et al.* A study on

- Neotectonic movement in the east China Sea[J]. *Seismology and Geology*, 2014,36(3):692-705.
- [22] 李威, 邓运华. 岩浆活动对渤中19-6潜山油气成藏的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022,50(7):1052-1061.
Li Wei, Deng Yunhua. Influence of magmatic activity on hydrocarbon accumulation in Bozhong19-6 buried-hill in Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022,50(7):1052-1061.
- [23] 蒋有录, 苏圣民, 刘华, 等. 渤海湾盆地油气成藏期差异性及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2021,42(6):1255-1264.
Jiang Youlu, Su Shengmin, Liu Hua, *et al.* Differences in hydrocarbon accumulation stages and main controlling factors in the Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021,42(6):1255-1264.
- [24] 邓津辉, 谭忠健, 袁亚东, 等. 渤海海域古近系—新近系裂缝性漏失断缝体系特征及力学机理研究[J]. 中国石油勘探, 2023,28(5):84-98.
Deng Jinhui, Tan Zhongjian, Yuan Yadong, *et al.* Study on characteristics and mechanical mechanism of fracture leakage fault-fracture system in the Paleogene-Neogene in Bohai Sea area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023,28(5):84-98.
- [25] 杨东升, 刘志峰, 吴斌, 等. 渤海海域辽东凸起南段潜山构造演化及其对油气成藏的控制[J]. 中国石油勘探, 2022,27(3):78-87.
Yang Dongsheng, Liu Zhifeng, Wu Bin, *et al.* Tectonic evolution and its control on hydrocarbon accumulation of buried hill in the south section of Liaodong Bulge, Bohai Sea[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022,27(3):78-87.
- [26] 阳宏, 刘成林, 王飞龙, 等. 渤中凹陷西南洼东营组烃源岩地球化学特征及环境指示意义[J]. 地质科技通报, 2023,42(1):339-349.
Yang Hong, Liu Chenglin, Wang Feilong, *et al.* Geochemical characteristics and environmental implications of source rocks of the Dongying Formation in southwest subsag of Bozhong Sag[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023,42(1):339-349.
- [27] 石磊, 李富恒, 郭元岭, 等. 海上新区油气勘探突破典型案例分析及启示[J]. 石油科技论坛, 2023,42(1):77-85.
Shi Lei, Li Fuheng, Guo Yuanling, *et al.* Analysis on typical cases of offshore oil and gas exploration breakthrough and its enlightenment[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2023,42(1):77-85.
- [28] 周心怀, 王德英, 于海波, 等. 环渤中地区浅层大规模岩性油藏的成藏主控因素与成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2022,49(4):660-669,740.
Zhou Xinhuai, Wang Deying, Yu Haibo, *et al.* Major controlling factors and hydrocarbon accumulation models of large-scale lithologic reservoirs in shallow strata around the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022,49(4):660-669,740.
- [29] 庄新兵, 邹华耀, 滕长宇. 新构造运动期断裂活动对油气的控制作用:以渤中地区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2012,41(3):452-459.
Zhuang Xinbing, Zou Huayao, Teng Changyu. Controlling of hydrocarbons by Neotectonics and tectonics fault activities: a case study of Bozhong area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012,41(3):452-459.
- [30] 李岳桐, 王文庆, 王刚, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷新构造运动特征及其控藏作用[J]. 东北石油大学学报, 2019,43(6):94-104.
Li Yuetong, Wang Wenqing, Wang Gang, *et al.* Neotectonism and its control on hydrocarbon accumulation in Huanghua Depression of the Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2019,43(6):94-104.
- [31] 赵野, 杨海风, 黄振, 等. 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[J]. 油气地质与采收率, 2020,27(4):35-43.
Zhao Ye, Yang Haifeng, Huang Zhen, *et al.* Strike-slip structural characteristics and its controlling effect on hydrocarbon accumulation in Miaoxinan Sag, Bohai Sea[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020,27(4):35-43.
- [32] 赵弟江, 杨海风, 王航, 等. 渤海莱州湾凹陷走滑—伸展叠覆型复杂斜坡带特征及油气成藏[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022,49(3):272-283.
Zhao Dijiang, Yang Haifeng, Wang Hang, *et al.* Characteristics of strike slip-extensional complex slope zone and hydrocarbon accumulation in Laizhouwan Sag, Bohai Sea, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022,49(3):272-283.