

渤海湾盆地济阳坳陷东部深层砂砾岩多类型油气藏成藏机理及模式

雷文智^{1,2},陈冬霞^{1,2},王永诗³,巩建强⁴,邱贻博⁴,王翘楚^{1,2},成铭^{1,2},蔡晨阳^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;2. 中国石油大学 地球科学学院,北京 102249;
3. 中国石化胜利油田分公司,山东 东营 257001;4. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东 东营 257015]

摘要:渤海湾盆地济阳坳陷东部深层砂砾岩油气展现出良好的勘探前景,深层油气藏类型多样且成藏地质条件与中、浅层差异显著,其差异化地质特征的形成机理制约着深层油气勘探开发的进程。采用镜下薄片观察、储层流体包裹体分析和盆地模拟等方法,分析了深层储层孔隙类型及地层压力存在差异的原因,进而建立了济阳坳陷深层砂砾岩多类型油气成藏模式。结果表明:①储层成岩演化揭示了深层储层不同孔隙类型的形成机制,深层砂砾岩储层中原生粒间孔隙的保存为早期油气充注和超压流体共同作用的结果,烃源岩生烃充注酸性流体引发的溶蚀反应是次生溶蚀孔隙形成的关键,储层中超压环境有助于微裂缝发育,形成孔-缝型储集空间。②深层流体超压演化受到生烃作用和沉积过程的控制,超压环境的形成取决于保存条件,构造-岩性油气藏中压力的分布受断-砂输导体系调配。在深层常压-弱超压储层中,源-储剩余压力差为稳定和充足的成藏动力;而在超压储层中,源-储剩余压力差随着时间推移逐渐减弱。在断层发育区和垂向连通性强的砂体中浮力是油气二次迁移、调整的主要动力。③基于生烃-储层-压力对济阳坳陷东部深层砂砾岩油气成藏的耦合控制作用,建立了多期叠置近岸水下扇油气相态垂向分异型、近岸水下扇泥岩顶部及侧向联合封堵型、近岸水下扇-浊积扇近源成藏型3种油气成藏模式。济阳坳陷深层多类型砂砾岩油气藏成藏机理和模式的揭示为后续深入勘探奠定了坚实的基础。

关键词:储层成岩演化;压力演化;深层砂砾岩体;深层油气成藏;济阳坳陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3 文献标识码:A

Accumulation mechanism and model of multi-type deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the eastern Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

LEI Wenzhi^{1,2}, CHEN Dongxia^{1,2}, WANG Yongshi³, GONG Jianqiang⁴, QIU Yibo⁴, WANG Qiaochu^{1,2},
CHENG Ming^{1,2}, CAI Chenyang^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Shengli Oilfield Branch Company,
SINOPEC, Dongying, Shandong 257001, China; 4. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company,
SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China]

Abstract: Deep coarse-grained siliciclastic rocks in the eastern Jiyang Depression, Bohai Bay Basin hold great potential for oil and gas exploration. Given the presence of various types of deep coarse-grained siliciclastic reservoirs and the significant geological differences in hydrocarbon accumulation between the deep and the medium-to-shallow reservoirs in the depression, there is an urgent need to understand the formation mechanisms behind these differentiated geological features in order to advance the exploration and exploitation of deep oil and gas reserves. Employing techniques such as thin-section microscopy, reservoir fluid inclusion analysis, and basin simulation, we investigate pore types in the deep reservoirs and the origin of differentiated formation pressure in the Jiyang Depression. The accumulation models of various types of deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the depression are established thereby. The key findings are as

收稿日期:2023-07-16;修回日期:2023-10-12。

第一作者简介:雷文智(1995—),男,博士研究生,油气成藏机理与分布规律。E-mail: 18382244604@163.com。

通信作者简介:陈冬霞(1974—),女,教授,油气成藏机理与分布规律。E-mail: lindachen@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41972124)。

follows: (1) The diagenetic evolution reveals the formation mechanisms of the various pore types of reservoirs. The preservation of primary intergranular pores in the deep coarse-grained siliciclastic reservoirs is attributed to the combined effects of early hydrocarbon charging and overpressured fluids. In contrast, the secondary dissolved pores in the reservoirs are developed largely due to dissolution reactions induced by acidic fluid charging during the hydrocarbon generation of source rocks. In addition, the overpressure in the reservoirs facilitates the development of microfractures. All these lead to the formation of pore-fracture reservoir spaces; (2) The evolution of fluid overpressure in the deep reservoirs is governed by hydrocarbon generation and depositional process. The formation of overpressure environment hinges on preservation conditions, and the pressure distribution in hydrocarbon reservoirs within structural-lithologic traps is regulated by the fault-sand body transport system. In deep normal pressured-weakly overpressured reservoirs, the residual pressure difference between source rocks and reservoirs serves as the primary driving force to hydrocarbon accumulation. While in overpressured reservoirs, this residual pressure difference gradually decreases over time. Furthermore, buoyancy provides the main driving force for the secondary migration and adjustment of hydrocarbons in areas with well-developed faults and in sand bodies with good vertical connectivity; (3) Based on the joint control of hydrocarbon generation-reservoir-pressure on hydrocarbon accumulation, we establish three hydrocarbon accumulation models for deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the eastern Jiyang Depression, including the model of vertically differentiated hydrocarbon accumulation in multi-phase superimposed nearshore subaqueous fans, the model of top-lateral joint hydrocarbon sealing by mudstone within nearshore subaqueous fans, and the model of near-source hydrocarbon accumulation within nearshore subaqueous fans-turbidite fans. The elucidation of these hydrocarbon accumulation mechanisms and models of multi-type deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the Jiyang Depression lays a solid foundation for subsequent in-depth exploration.

Key words: diagenetic evolution of reservoirs, pressure evolution, deep coarse-grained siliciclastic rock, hydrocarbon accumulation in deep reservoirs, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

引用格式:雷文智,陈冬霞,王永诗,等.渤海湾盆地济阳坳陷东部深层砂砾岩多类型油气藏成藏机理及模式[J].石油与天然气地质,2024,45(1):113-129. DOI:10.11743/ogg20240108.

LEI Wenzhi, CHEN Dongxia, WANG Yongshi, et al. Accumulation mechanism and model of multi-type deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the eastern Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1):113-129. DOI:10.11743/ogg20240108.

砂砾岩体由于沉积过程的控制作用常发育杂基支撑的砾岩,结构成熟度和成分成熟度低,导致沉积体系内部储层质量通常较差^[1-2]。中国东部盆地深部地层(埋深>3 500 m)往往经历了复杂的多期成岩演化,在强烈压实和胶结作用的影响下,不利于油气储集层的发育。然而,近几年的勘探成果表明,深层砂砾岩仍具有很大的勘探潜力,例如在渤海湾盆地沙河街组^[3-4]、准噶尔盆地玛北斜坡区百口泉组^[5-6]、松辽盆地北部白垩系沙河子组^[7]以及柴达木盆地^[8]深层砂砾岩中均钻获工业油气井。

济阳坳陷油气资源丰富,但探明的油气储量多集中在中、浅层^[9-11]。沙河街组三段中亚段(沙三中亚段)-下亚段(沙三下亚段)中、浅层砂砾岩储集空间以原生孔隙为主,主要为油藏,流体相态单一,多表现为常压。近年来,随着地质认识的加深,深层油气作为资源接替的重点区域也取得重大进展。相比较于中、浅层,深层通常经历了多期而漫长的地质演化,油气藏常存在多期油气充注,同时具有多期改造和调整的特

征^[12-13],使得深层可发育次生孔隙类型和原生粒间孔隙型储层,成藏流体涵盖常规油、轻质油、凝析气和干气等多种相态^[14],油气藏发育常压、弱超压和超压等多类型压力系统^[15-16]。近几年,东营凹陷北部陡坡带丰深1井和丰深斜101井在深层砂砾岩中获得高产工业油流^[4],而在车镇-沾化凹陷北部深层砂砾岩体中也发现了高产油藏,因此济阳坳陷深层油气展现出巨大的勘探潜力。深层与中、浅层砂砾岩之间地质特征差异显著,其地质条件复杂多变的机制仍未被揭示,制约了深层砂砾岩油气成藏认识的深入,并且深层勘探开发的需求与深层油气成藏机理认识之间的矛盾越发突出。

本研究旨在明确深层砂砾岩差异化地质条件成因及机制,总结深层油气成藏机理,指导未来济阳坳陷深部油气勘探。以济阳坳陷深层油气藏类型及特征为切入点,利用镜下薄片观察、储层流体包裹体分析和盆地模拟等手段,从生烃、充注、运移和聚集的角度剖析了深层有利于储层孔隙发育的机制及复杂压力形成的控制因素,进一步依据生烃、储层和压力等成藏要素的相

互关系,建立了成藏要素耦合控制下的多类型油气成藏模式。

1 区域地质概况

济阳坳陷位于渤海湾盆地东南部(图1a),发育东营、车镇、沾化和惠民4个生烃凹陷(图1b)^[17-18]。济阳坳陷在古近纪受到NE-SW向的拉伸作用逐步形成断陷,随后在新近纪转变为区域性的坳陷^[19]。在整体构造背景下,4个主要凹陷均具有北断南超、北陡南缓的构造特征,使得凹陷的北部陡坡带发育近物源的冲积扇,形成多套和多期砂砾岩扇体沉积^[20]。

济阳坳陷新生代从老至新依次沉积了孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组和平原组^[21]。沙河街组从下至上可划分为沙河街组四段(沙四段,Es⁴)、三段(沙三段,Es³)、二段(沙二段,Es²)和一段(沙一段,Es¹)。其中,沙三段可进一步细分为沙三上亚段(Es^{3s})、沙三中亚段(Es^{3z})和沙三下亚段(Es^{3x}),沙四段可细分为沙四上亚段(Es^{4s})和沙四下亚段(Es^{4x})。坳陷内油气

主要来源于湖相泥岩(图2)^[22],在沙四段沉积时期为盐湖沉积环境,发育灰黑色泥页岩、砂岩和砾岩,以及膏盐岩夹层。沙三段沉积时期气候转向湿润,坳陷为半咸水湖泊环境,发育半深湖-深湖相深灰色泥岩、灰色灰岩和白云岩,并广泛发育近岸水下扇沉积^[23]。

济阳坳陷中、浅层勘探程度高,大部分探明储量集中在埋深3 500 m以浅的储层中,沙四段深层油气的勘探程度仍相对较低,认识较为薄弱^[24]。近几年,在东营、车镇和沾化生烃凹陷北部陡坡带深层砂砾岩(埋深>3 500 m)中均发现了大量油气资源^[4, 25]。随着地质认识的深入,发现济阳坳陷深层砂砾岩体发育有利的储集层,且与沙三段和沙四段优质泥岩具有良好的配置关系,使得深层砂砾岩体成为后续勘探的重点(图1b)。

2 深层砂砾岩体油气藏类型及特征

济阳坳陷东部深层砂砾岩主要分布于东营凹陷、车镇凹陷和沾化凹陷^[26]。不同的沉积构造背景使得深部形成不同特征的圈闭,同时砂砾岩油气藏的储层

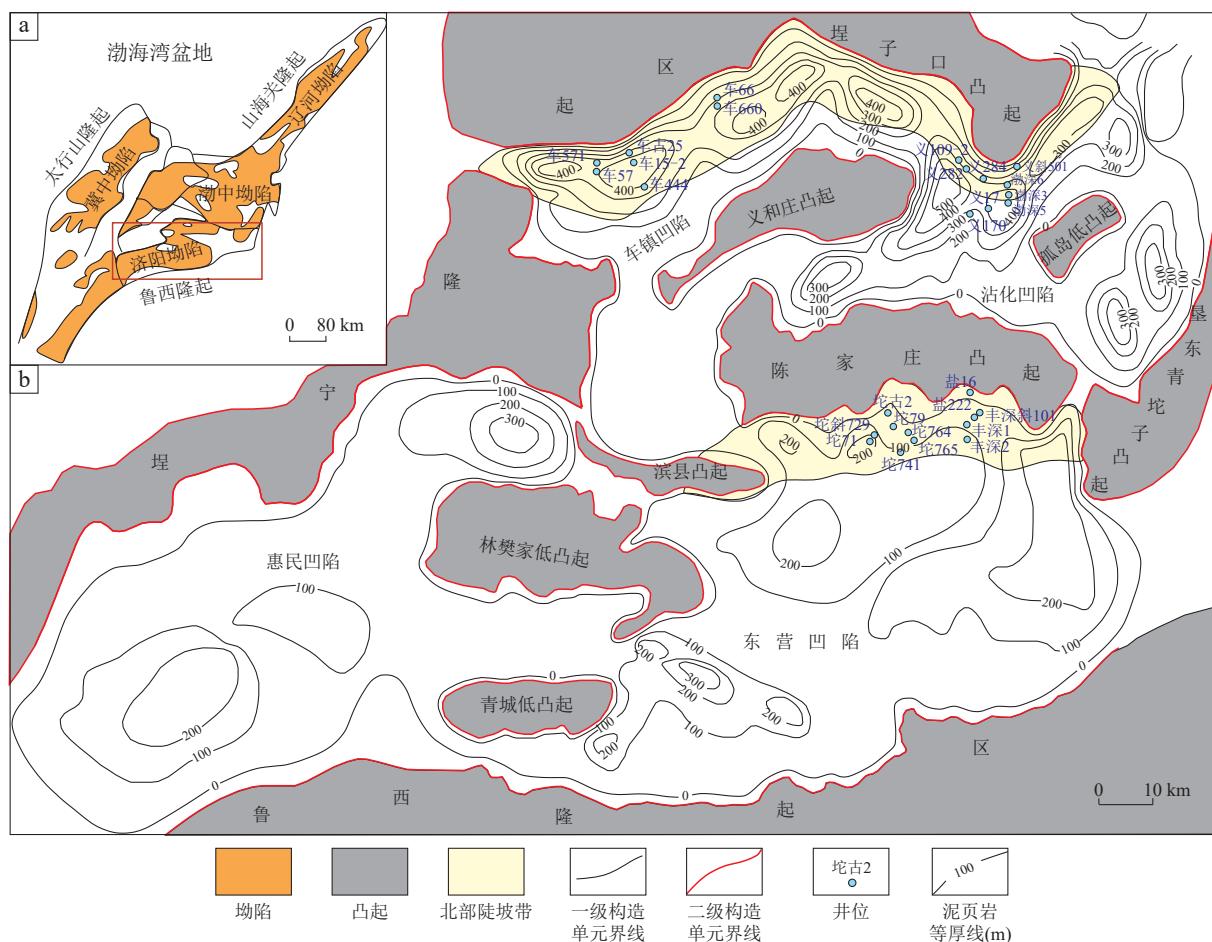


图1 渤海湾盆地(a)及济阳坳陷地质构造(b)

Fig. 1 Geological structures in the Bohai Bay Basin (a) and the Jiyang Depression (b)

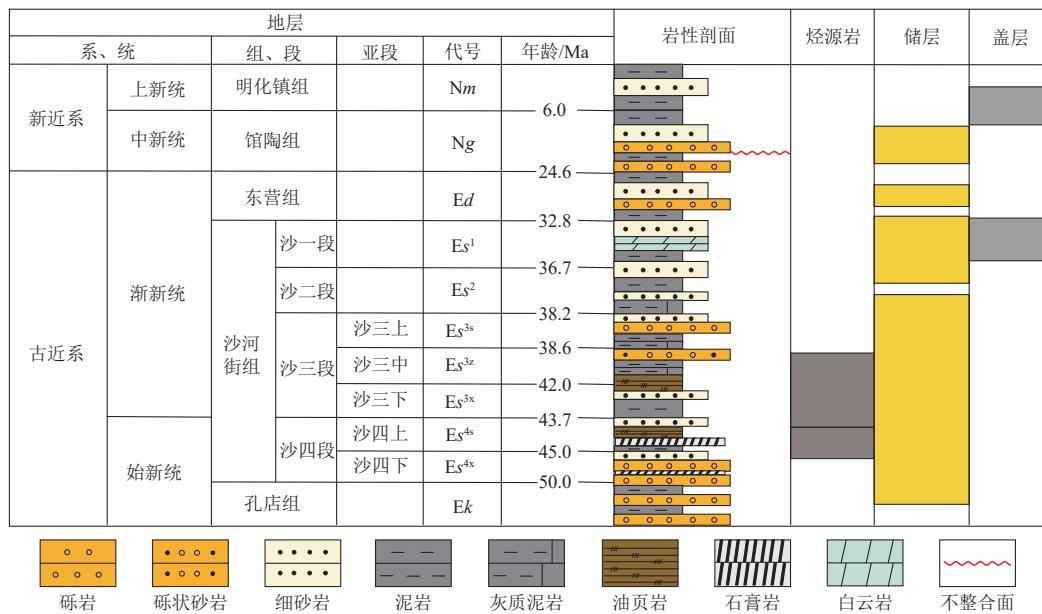


图2 渤海湾盆地济阳坳陷地层综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

孔隙类型、压力环境和油气相态存在差异(图3,图4)。基于圈闭类型和封堵条件,深层砂砾岩油气藏类型主要包括扇根侧向物性封堵的岩性油气藏、泥岩包裹砂岩透镜体形成的岩性油气藏和构造(断层)-岩性复合油气藏3类^[27](图3)。其中,扇根封堵的岩性油气藏主要发育在东营凹陷盐家地区和车镇凹陷北带铲式基底

断层上叠覆的近岸水下扇砂体中^[27-28]。但这两个地区油气藏的油气封堵机制存在差异,东营凹陷深层水下扇的扇根砾岩与扇中含砾砂岩之间存在明显的物性差异,在毛细管压力差的作用下形成扇根封堵;车镇凹陷深层水下扇体间互于湖相岩泥中,实际钻探发现车57井钻遇的180 m厚扇体中砂岩层仅占38%,多为“泥

凹陷	地区	岩性	岩心照片	沉积相	储集空间类型	储层物性	断层砂体配置	成藏动力	油气藏相态	油气藏类型
东营凹陷	盐家	含砾砂岩、砾状砂岩		冲积扇、近岸水下扇	长石边缘溶蚀孔、钙质胶结物溶蚀孔、长石粒内溶蚀孔、节理缝	沙四上亚段: $\phi = \frac{0.55\% \sim 12.19\%}{5.40\%}$ 沙四下亚段: $\phi = \frac{1.40\% \sim 10.70\%}{4.40\%}$	砂体叠覆铲式断层型		液态石油、凝析气、干气	扇根物性封堵的岩性油气藏
	胜坨	含砾砂岩、砾状砂岩		近岸水下扇	粒内溶蚀孔、钙质胶结物溶蚀孔、构造裂缝	沙四上亚段: $\phi = \frac{1.10\% \sim 11.50\%}{8.75\%}$	冲积砂体侧向对接断层型		液态石油为主,少量天然气	构造(断层)-岩性复合油气藏
	下降带	砾状砂岩、细-中砂岩		冲积扇	粒内溶蚀孔、钙质胶结物溶蚀孔、构造裂缝		孤立冲积砂岩透镜体型		液态石油为主	泥岩封闭的冲积砂岩透镜体岩性油气藏
车镇凹陷	车西北带	砾岩、含砾砂岩		近岸水下扇	原生粒间孔、少量溶蚀孔	沙三段: $\phi = \frac{0.30\% \sim 26.50\%}{8.35\%}$	砂体叠覆铲式断层型		液态石油为主	侧向扇根封闭和垂向泥岩隔档的岩性油气藏
沾化凹陷	渤南北带	砾岩、含砾砂岩		近岸水下扇	以长石边缘溶蚀孔为主,少量钙质胶结物溶蚀孔	沙三段: $\phi = \frac{1.30\% \sim 20.50\%}{9.19\%}$ 沙四段: $\phi = \frac{0.60\% \sim 19.50\%}{7.64\%}$	阶梯状断层穿扇体型		液态石油为主	构造(断层)-岩性复合油气藏

注: ϕ 为孔隙度(最小值~最大值)/平均值; P_{co} 为地层压力系数。



图3 渤海湾盆地济阳坳陷深层各类型砂砾岩油气藏特征

Fig. 3 Characteristics of various types of deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 盐家地区; b. 胜坨地区; c. 车镇地区; d. 沾化地区

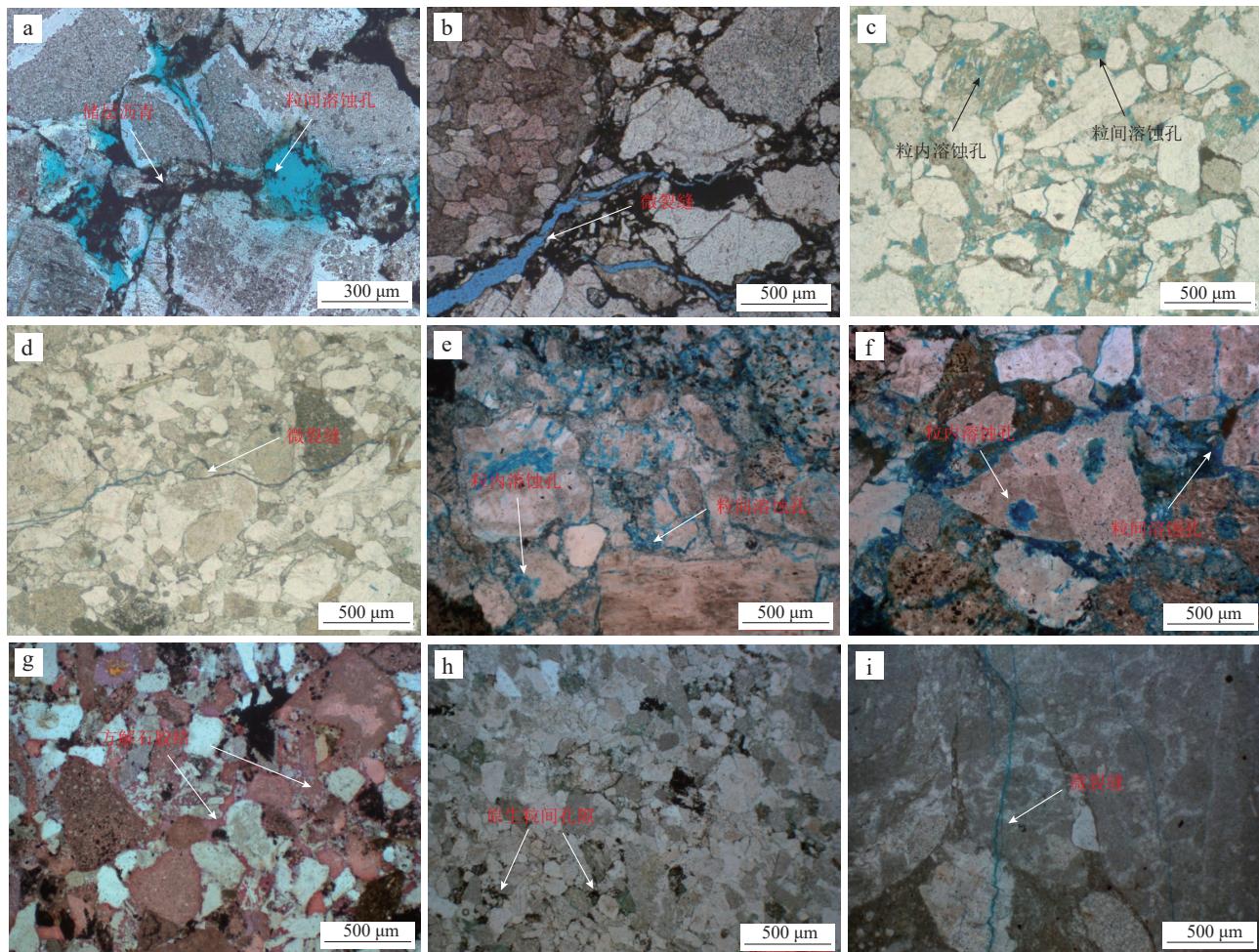


图4 渤海湾盆地济阳坳陷东部深层砂砾岩储层镜下特征照片

Fig. 4 Microscopic characteristics of deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the eastern Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 丰深1井,埋深4 323.30 m,沙四下亚段,次生溶蚀孔和储层沥青,单偏光;b. 丰深1井,埋深4 324.00 m,沙四下亚段,微裂缝和颗粒间黑色沥青充填,单偏光;c. 坪76井,埋深3 465.40 m,沙四上亚段,长石溶蚀孔,单偏光;d. 坪76井,埋深3 465.40 m,沙四上亚段,构造微裂缝,单偏光;e. 义109-2井,埋深4 077.62 m,沙四上亚段,粒内溶蚀孔和微裂缝,单偏光;f. 义109-2井,埋深3 877.90 m,沙四上亚段,粒内溶蚀孔,单偏光;g. 车57井,3 561.30 m,沙三段,大量碳酸盐岩屑和钙质胶结发育,储层致密,单偏光;h. 车古25井,埋深4 336.00 m,沙三段,原生粒间孔隙被油质沥青充填,单偏光;i. 车古25井,埋深4 390.10 m,沙三段,微裂缝,单偏光

夹砂”的岩性组合,说明层内泥岩夹层对油气具有垂向封隔作用,并非仅依靠扇根的侧向物性封堵。两者储集空间类型存在不同,东营凹陷盐家地区孔隙类型主要为粒间溶孔和粒内溶孔(图4a);车镇凹陷北带深层砂砾岩储层以原生粒间孔隙为主,溶蚀作用弱,钙质胶结作用强,镜下可见粒间孔隙被沥青充填(图4g, h)。砂岩透镜体岩性油气藏分布在东营凹陷胜北断层下降盘的孤立浊积砂体中^[28];构造(断层)-岩性复合油气藏在东营凹陷胜坨地区靠断层一侧和沾化凹陷渤海带陡坡带发育^[29-30]。镜下观察的结果表明,砂岩透镜体岩性油气藏和构造(断层)-岩性复合油气藏的孔隙类型均以次生溶蚀孔隙为主(图4c—g)。

深层砂砾岩体油气为近源充注,不同凹陷和地区深层油气富集层段和流体相态各异。东营凹陷盐家地

区深层沙四段油气表现出相态垂向分异的特征,自下而上为干气藏、凝析气藏和轻质油藏^[14]。车镇北带深层沙三段属于扇根封堵的岩性圈闭,油气流体为单一油相,平均密度为0.86 g/cm³,属于常规油藏。东营凹陷胜坨地区深层沙四段砂岩透镜体和构造(断层)-岩性圈闭中均聚集轻质油,密度介于0.74~0.83 g/cm³,并发育原油伴生气。断裂发育的沾化凹陷深层沙三段和沙四段近岸水下扇储层中均主要发育轻质油藏,原油密度小于0.87 g/cm³。

不同地区深层砂砾岩油气藏之间地层压力差异显著。东营凹陷盐家地区的扇根物性封堵岩性油气藏主要发育常压,部分为弱超压,压力系数为0.94~1.20。胜地地区深层砂岩透镜体岩性油气藏和构-岩性复合油气藏均为超压环境,最大压力系数可达1.98。由于

泥岩夹层的垂向封堵,车镇凹陷深层岩性油气藏相较于盐家地区具有更优的流体保存条件,进而表现为弱超压-超压,压力系数介于1.21~1.44。沾化凹陷北部陡坡带构造-岩性油气藏发育常压-超压,压力系数为0.97~1.77。

3 深层砂砾岩有利储层孔隙形成机制

本研究利用PetroMod盆地模拟软件重建了深层烃源岩生烃演化过程,烃源岩参数、实测镜质体反射率(R_o)和地层温度数据取自油田资料,古水深和大地热流值等边界条件数据来源于前人研究成果^[31]。以车镇凹陷和东营凹陷深部砂砾岩储层为例,基于镜下薄片观察,结合成岩作用特征,分析生烃作用及孔隙流体压力影响下的深层砂砾岩体储层成岩演化过程,并探讨次生溶蚀孔隙型储层和原生孔隙型储层的形成机制。

3.1 储层成岩演化中孔隙变化

原生孔隙为主的深层砂砾岩储层在早成岩阶段遭受了强烈的压实作用,孔隙度急剧减小,早期的钙质胶结进一步破坏了原生孔隙。随后,在中成岩A₁期早期,邻近的烃源岩层发生大量生烃,排烃充注的原油使得储层的孔隙流体压力逐渐增大,以抵抗上覆岩层的压实作用,同时抑制胶结作用的进程。随着烃源岩进入第二生烃高峰,深层砂砾岩储层中聚集了大量超压液态烃,这极大地阻碍了机械压实对孔隙空间的破坏,使得深层砂砾岩的原生孔隙得以保存(图5a)。

在早成岩阶段,次生孔隙为主的深层砂砾岩储层中常发育钙质胶结。早期的钙质胶结虽然破坏了早埋藏阶段的原生孔隙,但也为溶蚀作用提供了反应矿物,同时可抵抗一部分机械压实作用^[32]。随着供烃源岩的初次排烃,充足的原油和有机酸充注储层使得孔隙间早期形成的钙质胶结和长石发生溶蚀,形成了大量的粒间溶蚀孔隙和粒内溶蚀孔隙,改善了储层物性。另外,储层孔隙流体维持常压环境有利于酸性流体与矿物之间的反应以及反应产物的排出,可提升溶蚀反应程度^[33]。在中成岩A₂期晚期,地层温度达到原油裂解生气阶段,生气增压导致储层产生微裂缝,最终在深层砂砾岩储层中形成次生孔-微裂缝型储层(图5b)。

3.2 原生粒间孔隙保存机制

镜下观察发现车镇凹陷深层沙三段含油砂砾岩储层原生粒间孔隙占优,而较难以观察到矿物之间或内部发育次生溶蚀孔隙(图4g, h)。其中,原生孔隙中充

填油质沥青,矿物颗粒之间呈点接触,无胶结物充填(图4h)。然而,沥青未发育区的颗粒间表现为线-凹凸接触,指示了强烈的压实作用,并伴有大量方解石胶结(图4g)。储层成岩演化特征揭示了早期油气充注的原油侵占了储集空间,流体承担部分压力,致使压实作用受阻,封闭成岩环境中的超压阻碍地层水与矿物间的水-岩相互作用,并抑制了胶结作用的发生^[34](图5a)。

超压对储层孔隙具有保护作用,能减缓上覆地层压实作用的影响^[35]。前文揭示了车镇凹陷深层砂砾岩油气藏为超压系统,压力系数可达1.4,说明储层中超压流体可分担岩石骨架所受到的垂向应力,使得深部原生孔隙得以保存(图3c,图5a)。并且,储层中的异常高压会引发矿物颗粒破裂形成微裂缝,进而改善储层渗透性^[36](图4i)。由此可见,早期原油充注和地层流体的异常高压是深层砂砾岩原生孔隙保存和发育的关键控制因素。

3.3 次生溶蚀孔隙发育机制

东营凹陷深层砂砾岩储层的镜下薄片中观察到沥青质常发育在原生粒间孔隙中,溶蚀作用常发生在矿物内部、边缘以及胶结物中,形成的次生孔隙中未见沥青沉淀,说明溶蚀反应滞后于第一次油气充注高峰期,生烃过程产生的有机酸和CO₂使地层水从早期碱性转换为酸性需要一定的地质时间(图4a)。烃源岩生烃作用带来的酸性流体引发的溶蚀作用是次生孔隙发育的重要控制因素。另外,在镜下可见微裂缝沿着矿物颗粒边缘和内部发育,并常与沉淀沥青伴生,指示了原油裂解生气产生的异常超压可使矿物颗粒破裂并阻碍颗粒间的相互挤压,形成次生孔-微裂缝储集空间(图4b,图5b)。

深层次次生孔隙广泛发育的另一个重要控制因素为烃源岩早期欠压实作用形成的超压。济阳坳陷深层泥岩中发育快速沉积时不均衡压实导致的超压^[16],早于烃源岩生烃门限形成的超压能抑制有机质热降解反应,使得生油范围往深部拓展,酸性流体引发的溶解作用时间长,易形成大量次生溶蚀孔隙^[37]。

4 地层流体超压及成藏动力

生烃增压和不均衡压实是导致地层中形成超压的主要原因,往往深层烃源岩层系广泛发育异常高压^[38]。济阳坳陷东部东营凹陷、车镇凹陷和沾化凹陷均为典型超压含油气构造,深层超压成因为生烃增压和早期快速埋藏引起的欠压实作用^[15-16]。本研究结合

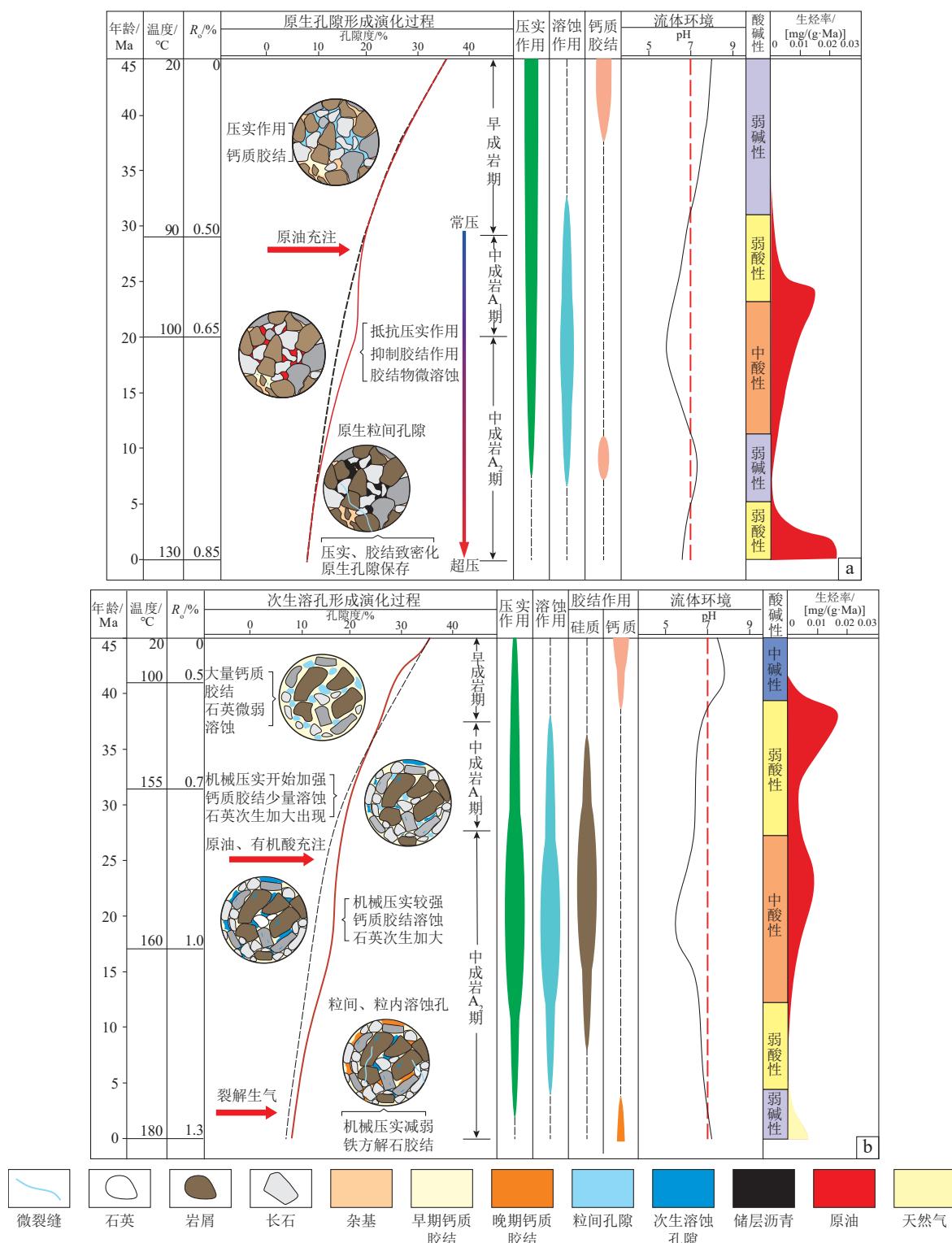


图5 渤海湾盆地济阳坳陷深层砂砾岩有利储层成岩-孔隙演化序列

Fig. 5 Diagenetic and pore evolution processes of favorable deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin
a. 原生孔隙型储层; b. 次生孔隙型储层

地质成因和PetroMod盆地模拟重建了深层压力演化过程,涉及常压-弱超压和超压两类储层,下文的东营凹陷盐家和胜坨地区为例,盐家地区为典型的常压-弱

超压油气藏,胜坨地区为超压油气藏。

前文所述,盐家地区深层沙四段砂砾岩储层中以常压-弱超压为主,邻近的泥岩中发育异常高压

(图3a)。重建的压力演化结果显示,在沙四段—沙三中亚段沉积时期,地层快速沉积引发的欠压实作用使得泥岩中积累了约12 MPa的剩余压力。上覆封堵性强的膏盐岩层使得欠压实作用导致的超压得以进一步增加并保存。同一时期,泥岩进入成熟生烃阶段,产生了约8 MPa的剩余压力。在第一主生烃期,油气的充注使得储层中形成了6 MPa左右的超压。随后,地层抬升剥蚀导致泥岩和储层中均发生了4 MPa左右的压降。从馆陶组沉积时期至今,烃源岩二次生烃和裂解生气产生了15 MPa左右的剩余压力,至今保存了约32 MPa的超压(图6a)。储层中早期充注的原油发生裂解生气,流体体积膨胀可使孔隙压力骤增。超压环境下诱发的微裂缝会引起流体压力的释放,导致了一定程度的压降(图6a)。鉴于砂砾岩中油气为侧向近源充注,油气藏中异常压力的形成主要依靠油气充注过程中流体压力的传递,生烃产生的超压流体能否在圈闭中继续保持取决于保存条件。东营凹陷盐家地区深层砂砾岩的垂向连通性强,易使储层中的超压向浅部散失并被平衡,导致现今油气藏多以常压为主(图3a)。部分层段中原油裂解形成的沥青可封堵储层,保存一定量的剩余压力,形成弱超压环境(图4a)。模拟的压力演化曲线指示了部分致密储层段中保留了

约10 MPa的剩余压力,压力系数约为1.20(图6a)。

对于超压储层广泛发育的胜坨地区(图3b),沙四上亚段泥岩早期的剩余压力演化历程与盐家地区相似,高沉积速率导致的欠压实作用积累了约16 MPa的剩余压力,泥岩的生烃作用产生了11 MPa左右的剩余压力。油气充注过程的压力传递使储层中聚集了10 MPa左右的剩余压力。主要区别在于胜坨地区沙四上亚段在垂向上缺乏膏盐岩层的遮挡,东营组沉积时期的规模性抬升剥蚀事件使得地层骨架的回弹程度大于盐家地区,孔隙空间的增大导致欠压实形成的剩余压力无法保存,剩余压力降低了约16 MPa。在抬升剥蚀结束时,由于储层周围存在泥岩封堵且致密,流体保存条件好,使其内部剩余压力基本保持不变。随着泥岩的进一步埋藏,热演化程度加深,生烃增压产生了15 MPa左右的剩余压力,现今泥岩层系中保存了26 MPa左右的剩余压力(图6b)。第二次生烃充注使得储层中的剩余压力增加12 MPa左右,现今保持了22 MPa左右的剩余压力(图6b)。从剩余压力演化的过程来看,超压储层的形成与保存条件密切相关。车镇凹陷深层砂砾岩扇体在垂向上被泥岩隔层分隔,使得内部的流体压力不易向邻近储层传递,形成现今的超压油藏,压力系数介于1.21~1.44(图3c)。东营凹陷胜

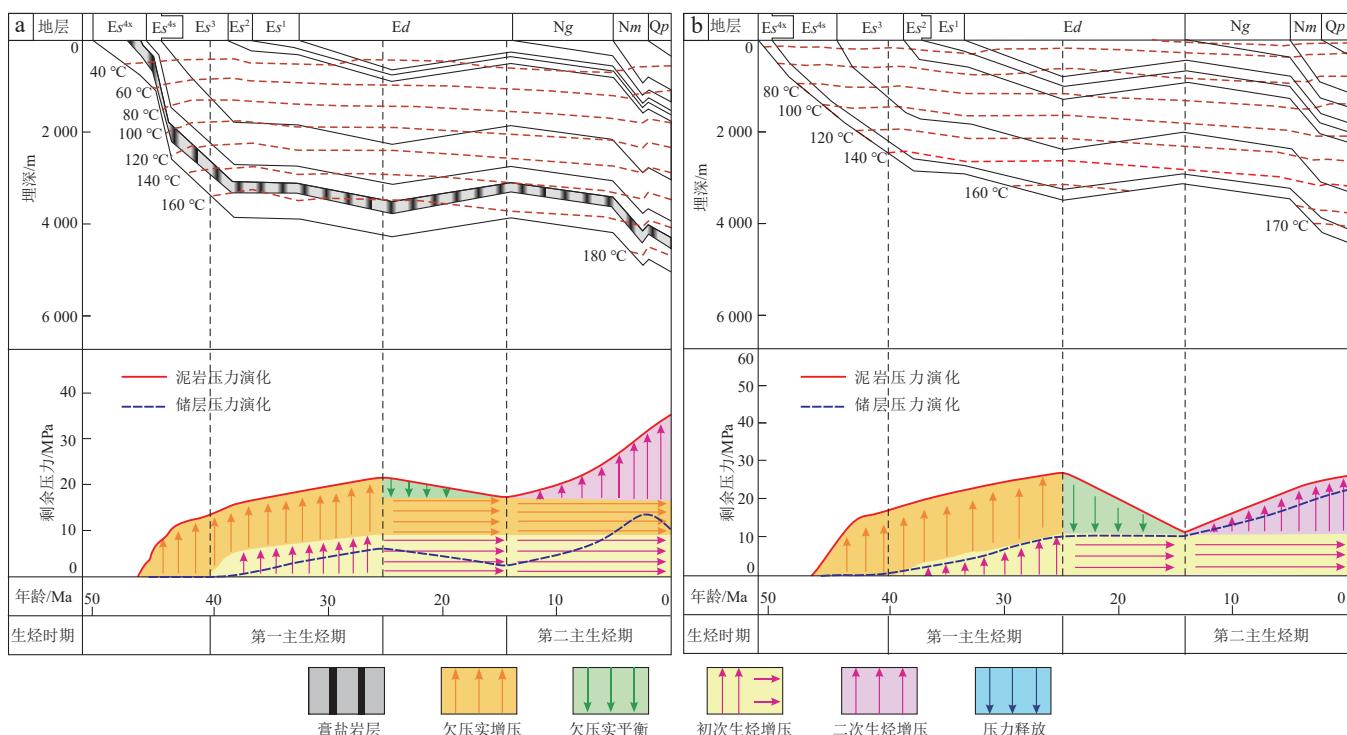


图6 渤海湾盆地东营凹陷深层储层及邻近供烃泥岩的剩余压力演化过程

Fig. 6 Evolutionary processes of residual pressure in deep reservoirs and adjacent mudstones as hydrocarbon source rocks in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin
 a. 盐家地区常压-弱超压储层;b. 胜坨地区超压储层

坨地区深层沙四段的浊积砂岩被生烃泥岩包裹,使充注的超压流体封闭在砂岩透镜体中,形成超压油藏,压力系数可达1.90(图3b)。胜坨地区的构造(断层)-岩性油气藏中压力系数约为1.70,低于同层段的砂岩透镜体岩性油气藏,说明断-砂复合输导体系易导致流体压力释放(图3b)。对于断裂更为发育的沾化凹陷渤海带,邻近供烃源岩的油藏压力系数可达1.70左右,与胜坨地区相当,随着与源岩距离的增大和原油沿断-砂输导体系的运移,油藏流体压力逐渐平衡、散失递减至常压(图3d)。因此,在断裂发育的砂砾岩沉积区,断层和砂体的复合输导作用影响着油藏中流体压力的变化。

古压力演化不仅可揭示现今流体压力的形成过程,还可通过对泥岩与邻近储层间的剩余压力反映源-储剩余压力差主导下的成藏动力演化差异。在常压-弱超压储层发育区,烃源岩与储层的剩余压力演化过程基本一致,二者之间往往保持着较为稳定的压差,这保证了烃源岩生成的油气能有效地借助于该动力运移、充注至储层中^[39](图6a)。并且,储层中的孔隙流体压力在晚期会进一步释放,使得源-储之间的剩余压力差进一步增大(图6a)。进入常压环境下的烃类流体主要受到浮力的影响,在储层或者输导通

道中运移和调整。烃源岩与储层之间的剩余压力差演化过程在超压储层中截然不同,通常在早期能形成较大的压差,但随着储层中超压的逐步积累,烃源岩中压力的调整,源-储剩余压差会逐渐减小。尽管如此,现今仍存在4~5 MPa的源-储剩余压差,同样为油气的近源充注提供了动力(图6b)。另外,处于超压条件的地层中易形成微裂缝,为油气渗流提供了有效的通道(图4d)。

基于深层压力演化的认识,结合烃源岩与砂砾岩储层的空间配置关系和断层发育特征,认为与泥页岩呈指状接触的近岸水下扇体,或被生烃泥岩包围浊积砂体,供烃源岩持续生烃形成的超压为油气成藏的主要动力(图7a, b)。常压的扇根物性封堵岩性油气藏和构造(断层)-岩性复合油气藏,其油气先在超压驱动下充注砂砾岩扇体,随后依靠浮力作用沿着断层或砂体运移、调整并聚集(图7c—e)。

5 多类型油气藏成藏模式

深层油气成藏是多种地质要素复合作用的结果。基于烃源岩生烃史、地层压力以及储层成岩作用之间

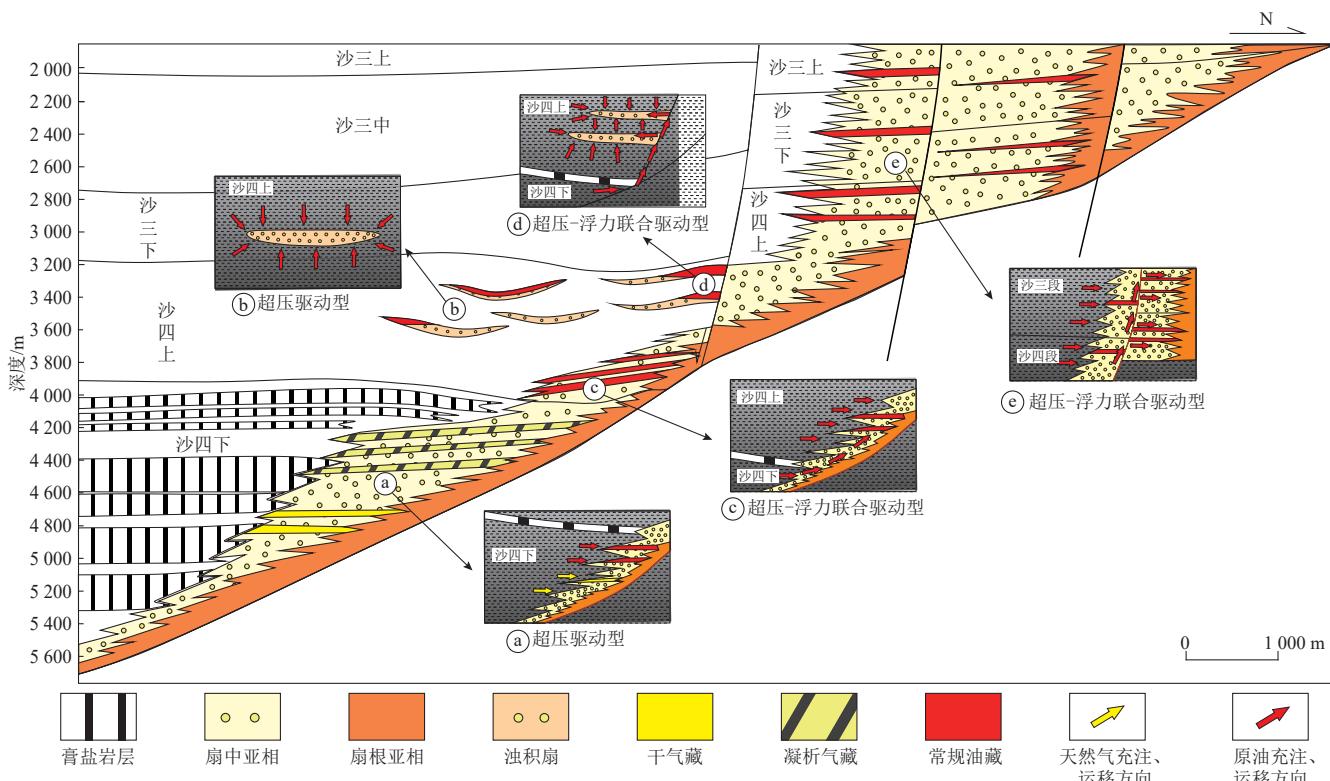


图7 渤海湾盆地济阳坳陷深层不同类型砂砾岩体油气藏成藏动力体系

Fig. 7 Dynamic system for hydrocarbon accumulation of various types of deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

的耦合关系,明确关键成藏期各要素对油气成藏的影响,揭示并总结了济阳坳陷东部深层砂砾岩多类型油气藏在生烃-储层-压力耦合控制下的成藏模式。

利用与烃类共生的盐水包裹体均一温度并结合模拟的埋藏史和热史,厘定了济阳坳陷东部深层砂砾岩油气藏关键成藏期^[40]。东营凹陷沙四段、车镇凹陷沙三段和沾化凹陷沙四段深层砂砾岩油气藏经历了两期成藏,第一期约在东营组沉积中期(24~18 Ma),第二期为明化镇沉积末期(3~0 Ma)(图8a—c);沾化凹陷深层沙三段为明化镇时期至今(3~0 Ma)的第一期充注成藏(图8d)。

5.1 多期叠置近岸水下扇油气相态垂向分异成藏模式

该类型成藏模式发育在东营凹陷盐家深层多期叠

置、垂向连通的砂砾岩扇体中,油气相态在垂向上分异,从上至下依次为干气藏、凝析气藏和油藏,不同类型的油气藏成藏过程不同,受到热演化、充注运移方式和次生改造等因素的影响。在第一成藏期(24~18 Ma),沙四段深层主力烃源岩达到成熟阶段,生烃产生的异常超压为油气和有机酸侧向充注提供了充足的动力,酸性流体溶蚀早期钙质胶结物和长石形成大量次生孔隙,并且充注的油气和超压可抵抗压实作用对储层的破坏。浮力驱动早期原油沿叠置的扇体向上运移,逐渐在砂砾岩体中形成油润湿相的疏导通道(图9)。随着地层抬升剥蚀后的再次埋深,烃源岩再次进入生烃门限,约在明化镇中期(3~0 Ma)发生了第二期油气充注,源-储剩余压力差仍为油气初次运移的主要动力。由于地层埋深的增大,沙四下亚段烃源岩进入高-过成熟阶段,并持续向砂砾岩储层充注凝

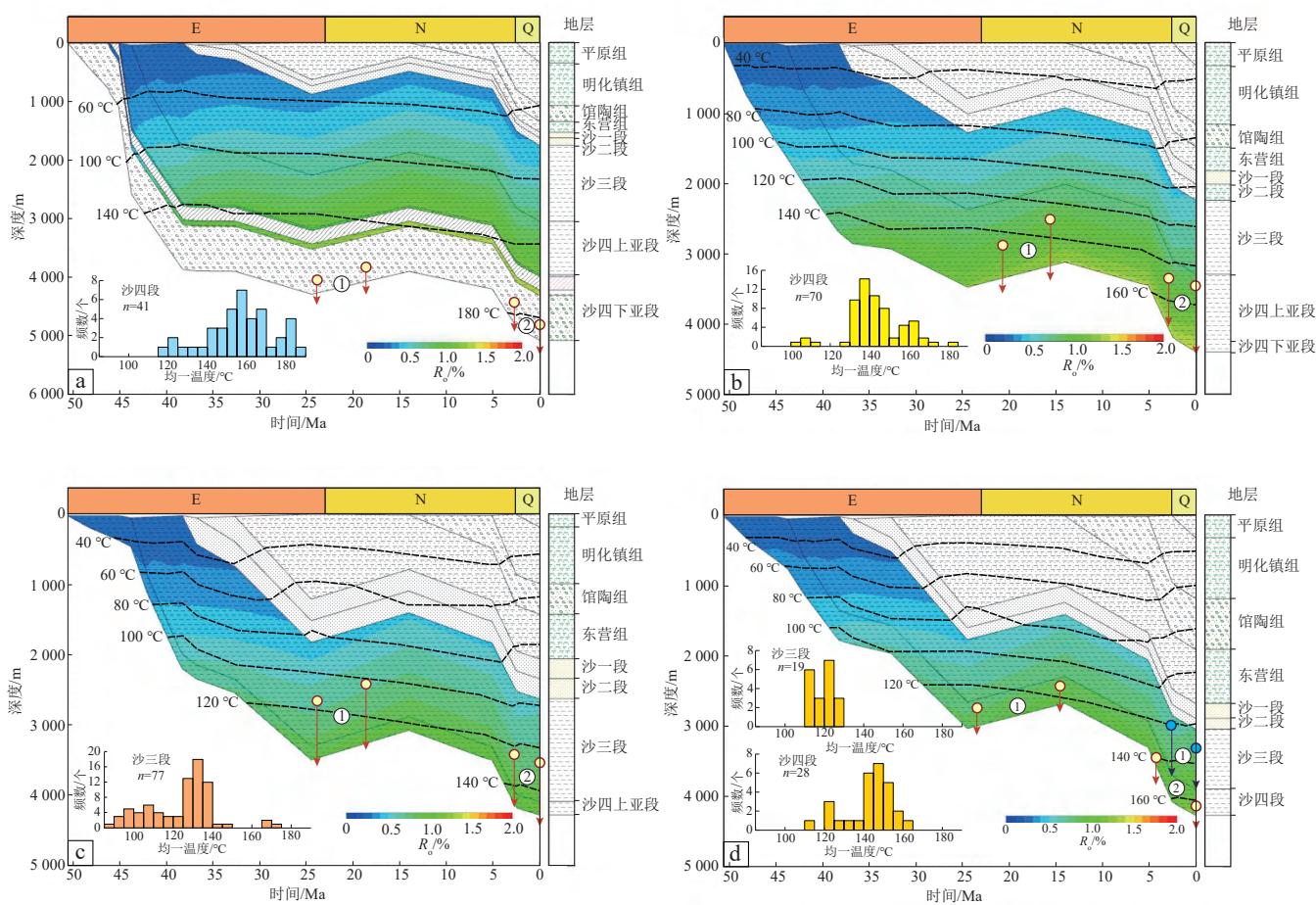


图8 渤海湾盆地济阳坳陷东部不同凹陷和地区的深层砂砾岩埋藏史、热演化史及油气充注时期

Fig. 8 Burial history, thermal evolution history, and hydrocarbon charging periods of deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in different sags and areas in the eastern Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 东营凹陷盐家地区,丰深1井,沙四段;b. 东营凹陷胜坨地区,坨764井,沙四段;c. 车镇凹陷,车57井,沙三段和沙四段

(①指第一成藏期;②指第二期成藏期;③指示成藏期时间范围。)

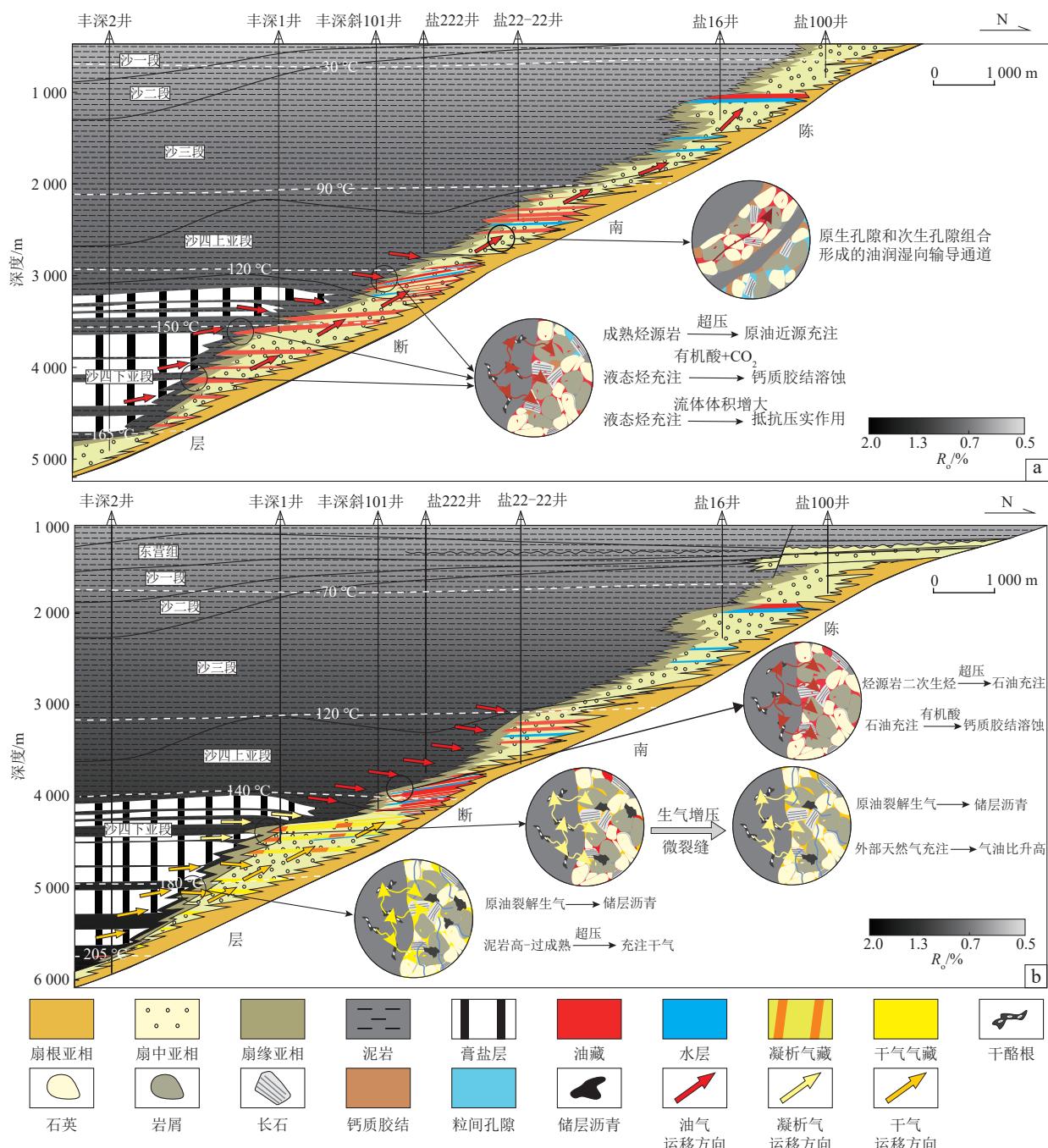


图9 渤海湾盆地东营凹陷盐家地区深层砂砾岩油气成藏模式

Fig. 9 Hydrocarbon accumulation model of deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the Yanjia area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin
a. 第一成藏期(约24 Ma); b. 第二成藏期(约3 Ma)

析油和天然气,沙四上亚段源岩仍处于成熟生油阶段。同时,地层温度达到原油裂解的条件,早期形成的古油藏发生裂解,气/液比不断增加。垂向上差异的热演化过程使得沙四下亚段深部形成干气藏、沙四上亚段形成轻质油藏。原油裂解生气过程中孔隙流体体积膨胀形成的异常压力易产生微裂缝,增加了深部天然气沿垂向输导通道向上运移的效率,使得大量天然气充注沙四下亚段上部的古油藏,加之原油裂解生气,逐渐改

变烃类流体组分,最终形成深层凝析气藏(图9)。

5.2 近岸水下扇泥岩顶部及侧向联合封堵成藏模式

在第一成藏期(约24 Ma),车镇凹陷北带深层沙三段烃源岩进入“生油窗”,生烃增压提供了充注动力,大量液态石油侧向充注到近岸水下扇储层中。砂砾岩圈闭中良好的封闭条件使得油藏中流体超压积累,进而抵抗压实作用和抑制胶结作用,促使大量的原生孔

隙得以保存。油气在剩余压力差的作用下沿扇中运移并在岩性圈闭中聚集成藏(图10)。沙三段烃源岩在明化镇沉积时期(约3 Ma)再次进入生烃高峰并大量生油,由于早期砂体中流体压力的积累,源-储剩余压力差升高,原油继续充注早期油藏,使得富集程度进一步提高(图10)。

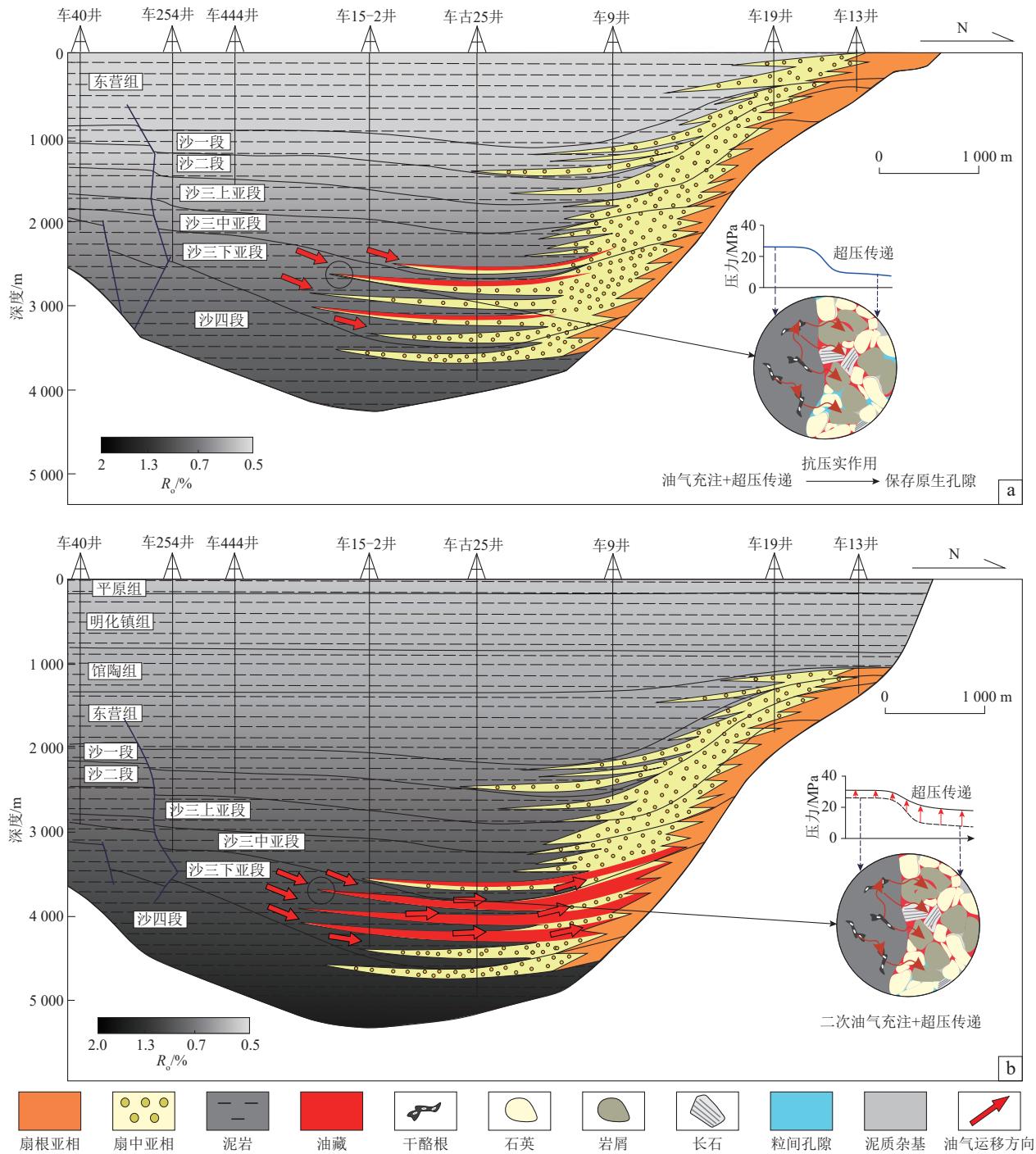


图10 渤海湾盆地车镇凹陷北部陡坡带深层砂砾岩油气成藏模式

Fig. 10 Hydrocarbon accumulation model of deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the northern steep slope zone of the Chezhen Sag, Bohai Bay Basin
 a. 第一成藏期(约24 Ma);b. 第二成藏期(约3 Ma)

5.3 近岸水下扇-浊积扇近源成藏模式

5.3.1 东营凹陷胜坨北带深层油气藏

在第一期生烃高峰(约21 Ma),沙四上亚段烃源岩生油增压并充注液态石油和有机酸,使得储层经历

溶蚀改造,传递的超压和原油在浊积砂岩圈闭中聚集和保存。同时,沙四下亚段烃源岩生成的原油通过浮力和超压沿断层-砂体迁移至构造(断层)-岩性圈闭中聚集(图11)。

在3 Ma左右,烃源岩进入高成熟生湿气阶段,同样在源-储剩余压力差的作用下近源充注油气,砂体中超压继续积累。对于构造(断层)-岩性油气藏,断层的泄压作用小幅度降低了地层流体压力。由于地层温度的限制,导致原油裂解程度低,生气量有限,使得现今东营凹陷胜坨深层油气藏中流体仍为单一油相(图11)。

5.3.2 沾化凹陷渤海南北带砂砾岩体

该地区的砂砾岩体展布受到阶梯状断层控制,为近岸水下扇砂体-断阶组合形式,断层垂向断穿并沟

通多层段砂体和泥岩,油气来源丰富。在21 Ma左右,沙四段烃源岩大量生油并充注邻近砂砾岩储层,超压和酸性流体促进了优质储层的发育。原油在源-储剩余压力差和浮力的共同作用下沿断-砂输导体系迁移,受到扇根侧向封堵后聚集(图12)。相比较于沙四段,沙三段烃源岩在晚期(约3 Ma)才达到生油高峰,沙四段和沙三段源岩生成的一部分原油在断层侧向封堵的作用下聚集成藏,另一部分通过断-砂输导通道运移,与早期原油混合后聚集成藏(图12)。

6 结论

1) 深层储层成岩演化研究揭示了原生孔隙储层和次生孔隙储层的发育机制。早期油气充注和超压流

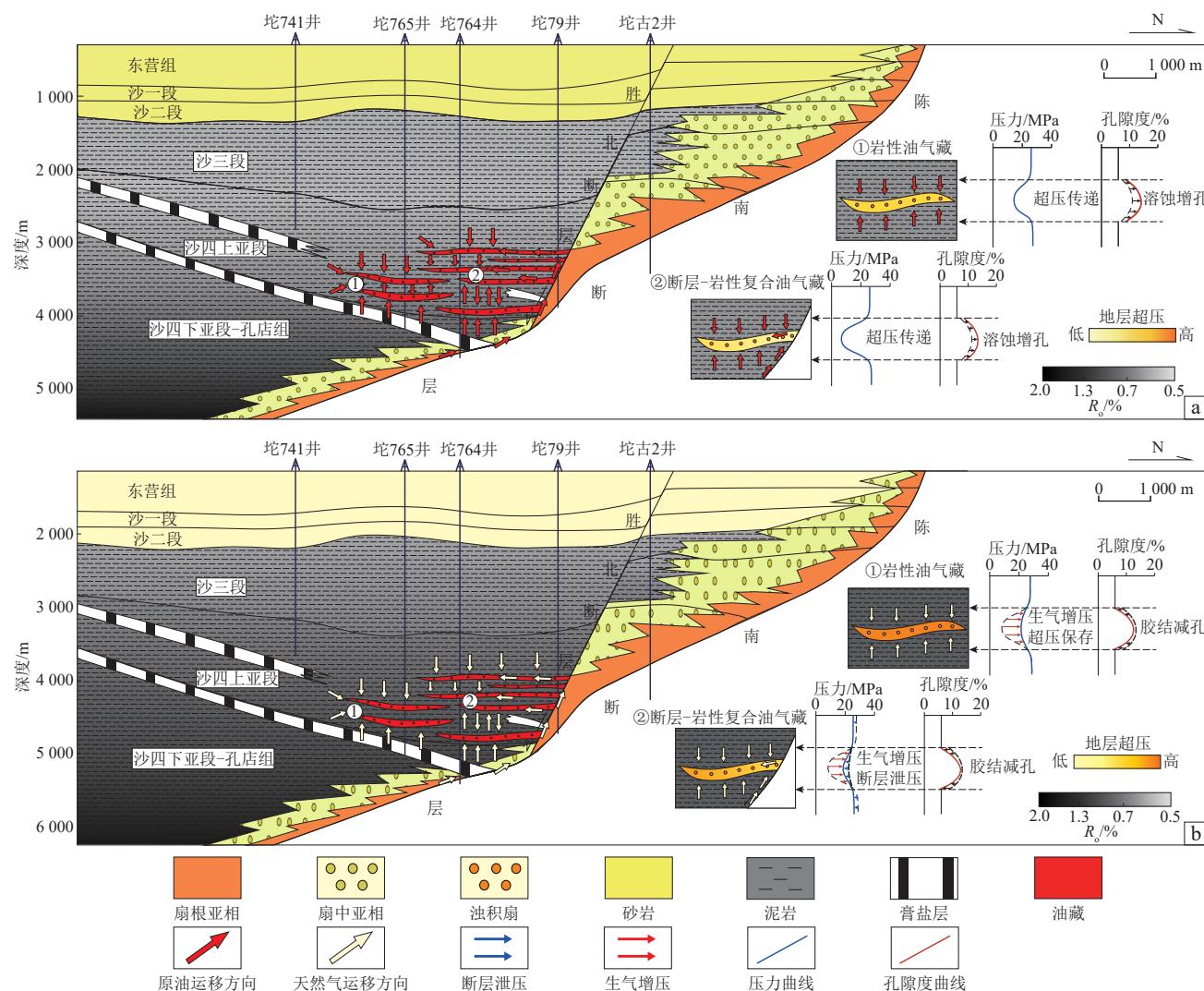


图11 渤海湾盆地东营凹陷胜坨地区深层砂砾岩油气成藏模式

Fig. 11 Hydrocarbon accumulation model of deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the Shengtuo area of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin

a. 第一成藏期(约21 Ma);b. 第二成藏期(约3 Ma)

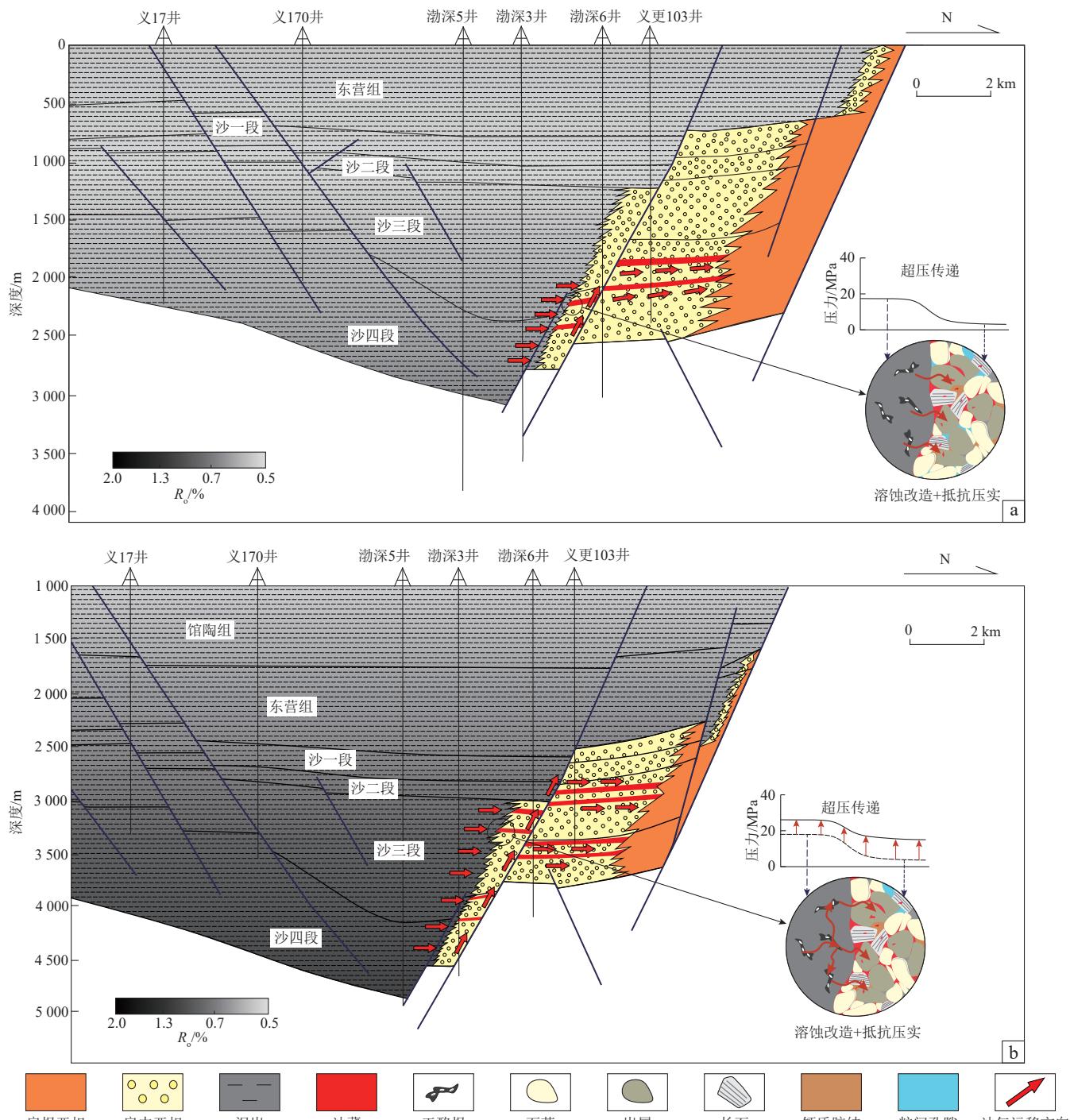


图 12 渤海湾盆地沾化凹陷北部陡坡带深层砂砾岩油气成藏模式

Fig. 12 Hydrocarbon accumulation model of deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the northern steep slope zone of the Zhanhua

Sag, Bohai Bay Basin

a. 第一成藏期(约21 Ma); b. 第二成藏期(约3 Ma)

体抵抗压实和抑制胶结作用促使了深层砂砾岩储层中原生粒间孔隙的保存。生烃过程产生的酸性流体和易溶矿物是次生溶蚀孔隙形成的关键。超压环境产生的微裂缝有利于改善储层渗流能力,形成孔-缝型储集空间。

2) 深层流体超压演化受到生烃作用和沉积过程

的控制,不同的地质条件导致深层发育复杂流体压力,其形成机制与保存条件关系密切,并且断-砂输导体系调配压力的分布。源-储剩余压力差在常压-弱超压储层中提供稳定、充足的成藏动力,而在超压储层中该动力随着时间逐步减小。浮力在常压或弱超压区驱动油气的二次运移。

3) 基于烃源岩生烃史、地层压力以及储层成岩作用之间的耦合关系,结合成藏条件差异性的分析结果,建立了济阳坳陷东部深层砂砾岩油气在生烃-储层-压力耦合控制下的3种成藏模式,多期叠置近岸水下扇油气相态垂向分异型、近岸水下扇泥岩顶部及侧向联合封堵型、近岸水下扇-冲积扇近源成藏型。

参 考 文 献

- [1] CAO Yingchang, WANG Yanzhong, GLUYAS J G, et al. Depositional model for lacustrine nearshore subaqueous fans in a rift basin: The Eocene Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. *Sedimentology*, 2018, 65 (6): 2117-2148.
- [2] ZHANG Xin, ZHU Xiaomin, LU Zhiyong, et al. An Early Eocene subaqueous fan system in the steep slope of lacustrine rift basins, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China: Depositional character, evolution and geomorphology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 171: 28-45.
- [3] 王冠民, 张婕, 王清斌, 等. 渤海湾盆地秦南凹陷东南缘中深层砂砾岩优质储层发育的控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 330-339.
WANG Guanmin, ZHANG Jie, WANG Qingbin, et al. Factors controlling medium-to-deep coarse siliciclastic reservoirs of high quality at the southeastern margin of Qinnan Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 330-339.
- [4] 宋明水, 王永诗, 郝雪峰, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系深层油气成藏系统及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42 (6): 1243-1254.
SONG Mingshui, WANG Yongshi, HAO Xuefeng, et al. Petroleum systems and exploration potential in deep Paleogene of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1243-1254.
- [5] 唐勇, 郭文建, 王霞田, 等. 玛湖凹陷砾岩大油区勘探新突破及启示[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 127-137.
TANG Yong, GUO Wenjian, WANG Xiatian, et al. A new breakthrough in exploration of large conglomerate oil province in Mahu Sag and its implications [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(2): 127-137.
- [6] 朱宁, 操应长, 蔡克来, 等. 砂砾岩储层成岩作用与物性演化——以玛湖凹陷北斜坡区三叠系百口泉组为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(5): 1102-1118.
ZHU Ning, CAO Yingchang, XI Kelai, et al. Diagenesis and physical properties evolution of sandy conglomerate reservoirs: A case study of Triassic Baikouquan Formation in northern slope zone of Mahu Depression [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(5): 1102-1118.
- [7] 汪孝敬, 白保军, 芦慧, 等. 深层—超深层高温极强超压砂砾岩储层特征及主控因素——以准噶尔盆地南缘四棵树凹陷高泉地区白垩系清水河组为例[J]. 东北石油大学学报, 2022, 46 (3): 54-65.
WANG Xiaojing, BAI Baojun, LU Hui, et al. Characteristics and main controlling factors of deep and ultra-deep glutenite reservoirs with high temperature and very strong overpressure: A case study from the Cretaceous Qingshuihe Formation in Gaoquan area, Sikeshu Sag, southern margin of Junggar Basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022, 46(3): 54-65.
- [8] 宫清顺, 刘占国, 王波, 等. 山前冲断带砂砾岩储层发育机制及控制因素——以柴达木盆地昆北油田切12区为例[J/OL]. 地球科学: 1-19 [2023-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220527.1153.004.html>.
GONG Qingshun, LIU Zhanguo, WANG Bo, et al. Mechanism and controlling factors of the sandy conglomerate reservoir in the piedmont thrust belt: A case of Kunbei Oilfield, Qaidam Basin, NW China [J/OL]. *Earth Science*: 1-19 [2023-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220527.1153.004.html>.
- [9] 刘鑫金, 宋国奇, 刘惠民, 等. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩油藏类型及序列模式[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 20-23.
LIU Xinjin, SONG Guoqi, LIU Huimin, et al. Study of conglomerate reservoir types and distribution in north slope zone, Dongying Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(5): 20-23.
- [10] 高阳. 渤海湾盆地东营凹陷陡坡带沙四下亚段砂砾岩储层物性主控因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(5): 28-36.
GAO Yang. Main controlling factors of glutenite reservoir property in steep slope zone of Lower Es₄ of Dongying Sag in Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(5): 28-36.
- [11] 陈思芮, 王卫学, 曲希玉, 等. 东营凹陷北带沙四上亚段砂砾岩储层物性主控因素分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(4): 1091-1106.
CHEN Sirui, WANG Weixue, QU Xiyu, et al. Main controlling factors of physical properties of glutenite reservoirs of Es₄^s member in north zone of Dongying Depression [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(4): 1091-1106.
- [12] 何登发, 马永生, 刘波, 等. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 1-12.
HE Dengfa, MA Yongsheng, LIU Bo, et al. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petrolierous basins in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 1-12.
- [13] 何海清, 范土芝, 郭绪杰, 等. 中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略[J]. 中国石油勘探, 2021, 26 (1): 17-30.
HE Haiqing, FAN Tuzhi, GUO Xujie, et al. Major achievements in oil and gas exploration of PetroChina during the 13th Five-Year Plan period and its development strategy for the 14th Five-Year Plan [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(1): 17-30.
- [14] 王永诗, 郝雪峰, 胡阳. 富油凹陷油气分布有序性与富集差异性——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为例[J]. 石油勘探与

- 开发, 2018, 45(5): 785-794.
- WANG Yongshi, HAO Xuefeng, HU Yang. Orderly distribution and differential enrichment of hydrocarbon in oil-rich sags: A case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (5): 785-794.
- [15] 操应长, 徐涛玉, 王艳忠, 等. 东营凹陷古近系储层超压成因及其成藏意义[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31 (3): 34-38.
- CAO Yingchang, XU Taoyu, WANG Yanzhong, et al. The origin of reservoir overpressure and its implication in hydrocarbon accumulation in the Paleogene of Dongying Depression [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(3): 34-38.
- [16] 包友书, 张林晔, 李钜源, 等. 济阳坳陷古近系超高压成因探讨[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(1): 17-21.
- BAO Youshu, ZHANG Linye, LI Juyuan, et al. Approach to Paleogene overpressure origin in Jiyang Depression [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(1): 17-21.
- [17] 王民, 马睿, 李进步, 等. 济阳坳陷古近系沙河街组湖相页岩油赋存机理[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 789-802.
- WANG Min, MA Rui, LI Jinbu, et al. Occurrence mechanism of lacustrine shale oil in the Paleogene Shahejie Formation of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 789-802.
- [18] 郝牧歌, 张金功, 李顺明, 等. 断层输导差异性定量评价及其在致密油气藏勘探中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30 (1): 60-68.
- HAO Muge, ZHANG Jingong, LI Shunming, et al. Quantitative evaluation of fault transport difference and its application in tight oil and gas reservoir exploration [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(1): 60-68.
- [19] 符武才, 李理, 徐聪, 等. 东营凹陷北部典型构造转换带特征研究[J]. 地质科学, 2021, 56(1): 44-59.
- FU Wucai, LI Li, XU Cong, et al. The study on characteristics of typical structural transfer zone in northern of Dongying Sag [J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(1): 44-59.
- [20] 张林晔, 徐兴友, 刘庆, 等. 济阳坳陷古近系深层成烃与成藏[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 530-537.
- ZHANG Linye, XU Xingyou, LIU Qing, et al. Hydrocarbon formation and accumulation of the deep Palaeogene of the Jiyang Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 530-537.
- [21] 宋明水, 王惠勇, 张云银. 济阳坳陷潜山“挤-拉-滑”成山机制及油气藏类型划分[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(4): 1-8.
- SONG Mingshui, WANG Huiyong, ZHANG Yunyin. “Extrusion, tension and strike-slip” mountain-forming mechanism and reservoir type of buried hills in Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(4): 1-8.
- [22] 王健, 彭捷, 操应长, 等. 东营凹陷中晚始新世古气候演化特征及其意义——以Hk1井为例[J]. 沉积学报, 2022, 40(4): 1059-1072.
- WANG Jian, PENG Jie, CAO Yingchang, et al. Mid-late Eocene paleoclimate characteristics and significance in the Dongying Depression: An example from Well Hk-1 [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(4): 1059-1072.
- [23] 刘惠民. 济阳坳陷古近系页岩油地质特殊性及勘探实践——以沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段为例[J]. 石油学报, 2022, 43(5): 581-594.
- LIU Huimin. Geological particularity and exploration practice of Paleogene shale oil in Jiyang Depression: A case study of the upper submember of member 4 to the lower submember of member 3 of Shahejie Formation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(5): 581-594.
- [24] 王永诗, 陈涛, 张鹏飞, 等. 济阳坳陷古近系轻质原油藏勘探潜力与方向[J]. 石油学报, 2021, 42(12): 1605-1614.
- WANG Yongshi, CHEN Tao, ZHANG Pengfei, et al. Exploration potential and direction of Palaeogene light crude oil reservoirs in Jiyang Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42 (12) : 1605-1614.
- [25] 宋明水, 李友强. 济阳坳陷油气精细勘探评价及实践[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 93-101.
- SONG Mingshui, LI Youqiang. Evaluation and practice of fine petroleum exploration in the Jiyang Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 93-101.
- [26] 康玉柱, 张金亮, 徐耀辉, 等. 多物源体系下砂砾岩储层差异性孔隙演化模式——以车镇凹陷沙三段、沙四段为例[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 1-20.
- KANG Yuzhu, ZHANG Jinliang, XU Yaohui, et al. Differential evolution model of porosity in glutinite reservoirs under multi-provenance systems: Taking a case study of Es3 and Es4 of Chezhen Sag [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2023, 20(5): 1-20.
- [27] 柳广弟. 石油地质学(第五版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
- LIU Guangdi. Petroleum Geology (5th Edition) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [28] 杨怀宇, 张鹏飞, 邱贻博, 等. 东营凹陷深层自源型油气成藏模式与勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(2): 92-101.
- YANG Huaiyu, ZHANG Pengfei, QIU Yibo, et al. Deep self-source type hydrocarbon accumulation pattern and exploration practice in Dongying Sag [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(2): 92-101.
- [29] 曹默雷, 陈书平, 刘雅利. 济阳坳陷沾车地区义东断裂带走滑构造特征及其控藏作用[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25 (6): 51-55.
- CAO Molei, CHEN Shuping, LIU Yali. Strike-slip structure characteristics of Yidong fault zone and its influence on the hydrocarbon accumulation in Zhanche area, Jiyang Depression

- [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(6): 51–55.
- [30] 闫森,徐磊,刘炳宇. 沾化凹陷孤岛凸起西缘地区古近系沉积储层特征及成藏条件分析[J]. *地球科学前沿*, 2019, 9(5): 398–407.
- YAN Sen, XU Lei, LIU Bingyu. Sedimentary reservoir characteristics and hydrocarbon pooling conditions of Paleogene in the west area of Gudao uplift of Zhanhua Depression [J]. *Advances in Geosciences*, 2019, 9(5): 398–407.
- [31] 平宏伟,陈红汉,宋国奇,等. 东营凹陷北带民丰洼陷深层凝析油藏成藏史及其勘探意义[J]. *石油学报*, 2012, 33(6): 970–977.
- PING Hongwei, CHEN Honghan, SONG Guoqi, et al. Accumulation history of the deeply buried condensate reservoir in Minfeng Sag of the northern Dongying Depression and its exploration significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(6): 970–977.
- [32] 贺艳祥,黄思静,胡作维,等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统延长组长8油层组成岩作用研究[J]. *岩性油气藏*, 2010, 22(2): 42–47.
- HE Yanxiang, HUANG Sijing, HU Zuowei, et al. Research on diagenesis of Upper Triassic Chang 8 reservoir in Jiyuan area of Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(2): 42–47.
- [33] 朱子涵,李明远,林梅钦,等. 储层中CO₂—水—岩石相互作用研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2011, 30(1): 104–112.
- ZHU Zihan, LI Mingyuan, LIN Meiqin, et al. Review of the CO₂-water-rock interaction in reservoir [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2011, 30(1): 104–112.
- [34] 蔡进功,张枝焕,朱筱敏,等. 东营凹陷烃类充注与储集层化学成岩作用[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 79–83.
- CAI Jingong, ZHANG Zhihuan, ZHU Xiaomin, et al. Hydrocarbon filling and chemical diagenesis evolution of the clastic reservoir of the Paleogene in Dongying Sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 79–83.
- [35] 张伙兰,裴健翔,张迎朝,等. 莺歌海盆地东方区中深层黄流组超压储集层特征[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 284–293.
- ZHANG Huolan, PEI Jianxiang, ZHANG Yingchao, et al. Overpressure reservoirs in the mid-deep Huangliu Formation of the Dongfang area, Yinggehai Basin, South China Sea[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 284–293.
- [36] 郭旭升,胡东风,黄仁春,等. 元坝长兴组超深层生物礁大气田优质储层发育机理[J]. *岩石学报*, 2017, 33(4): 1107–1114.
- GUO Xusheng, HU Dongfeng, HUANG Runchun, et al. Developing mechanism for high quality reef reservoir (Changxing Formation) buried in ultra-depth in the big Yuanba Gas Field[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(4): 1107–1114.
- [37] 邹才能,陶士振,周慧,等. 成岩相的形成、分类与定量评价方法[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(5): 526–540.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, ZHOU Hui, et al. Genesis, classification and evaluation method of diagenetic facies [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(5): 526–540.
- [38] 李军,唐勇,吴涛,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷砾岩大油区超压成因及其油气成藏效应[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(4): 679–690.
- LI Jun, TANG Yong, WU Tao, et al. Overpressure origin and its effects on petroleum accumulation in the conglomerate oil province in Mahu Sag, Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(4): 679–690.
- [39] 刘畅,张道曼,李超,等. 鄂尔多斯盆地临兴区块上古生界致密砂岩气藏成藏条件及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1146–1158.
- LIU Chang, ZHANG Daomin, LI Chao, et al. Upper Paleozoic tight gas sandstone reservoirs and main controls, Linxing Block, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1146–1158.
- [40] 林良彪,余瑜,南红丽,等. 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组四段储层致密化过程及其与油气成藏的耦合关系[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 816–828.
- LIN Liangbiao, YU Yu, NAN Hongli, et al. Reservoir tightening process and its coupling relationship with hydrocarbon accumulation in the fourth member of Upper Triassic Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 816–828.

(编辑 梁慧)