

深层复杂储集体优质储层形成机理与油气成藏 ——以济阳坳陷东营凹陷古近系为例

王永诗, 王 勇, 郝雪峰, 朱德顺, 丁桔红

(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:综合运用岩心观察、薄片分析、岩石物性测试、同位素测试以及试油、试采结果分析等方法,对济阳坳陷东营凹陷古近系深层复杂储集体优质储层形成机理与油气成藏过程进行了研究。研究表明,酸-碱流体交替溶蚀作用形成的次生孔隙在一定程度上改善了深层局部储层物性,是深层优质储层形成的关键。深层不同层序沉积物原始组分、流体环境、源-储配置等条件的不同,使优质储层的形成机理存在差异。初始裂陷层序河流-冲积扇红层优质储层发育于碱性环境,且与烃源岩侧向接触,不仅发生大量的长石和碳酸盐岩溶蚀,石英也发生强烈的溶蚀。扩展裂陷层序陡坡扇三角洲、水下扇砂砾岩优质储层与烃源岩呈指状接触,且通过控盆断层与深部碱性流体沟通,主要表现为长石和碳酸盐岩溶蚀,石英只是局部少量溶蚀。扩展裂陷层序滩坝砂和浊积岩优质储层大部分分布于烃源岩中,主要表现为长石和碳酸盐岩的溶蚀。缓坡断阶带处于流体优势运移通道,与烃源岩对接的红层优质储集有利于成藏。陡坡带扇根遮挡的扇中砂砾岩优质储层有利于油气成藏。处于生烃增压烃源岩中,发生成岩耗水的滩坝砂和浊积岩优质储层有利于成藏。

关键词:次生孔隙;溶蚀;流体;层序;优质储层;东营凹陷

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Genetic mechanism and hydrocarbon accumulation of quality reservoir in deep and complicated reservoir rocks: A case from the Palaeogene in Dongying Sag, Jiyang Depression

Wang Yongshi, Wang Yong, Hao Xuefeng, Zhu Deshun, Ding Juhong

(Research Institute of Exploration and Development of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: The genetic mechanism and hydrocarbon accumulation of quality reservoirs in the deep complex Paleogene reservoir rocks of Dongying Sag are studied by core observation, thin section analysis, petrophysical testing, isotope testing and well testing. The studies show that the secondary porosity resulted from alternative dissolution of acid-alkaline fluids improved the local physical properties of deep reservoirs to some extent and is the key to the formation of the deep quality reservoirs. The reservoirs in different deep sequences have different genetic mechanisms, reflecting the differences in original components, fluid environment, source-reservoir combination and other conditions. The quality reservoirs of red beds in fluvial-alluvial fans of the initial rifting sequences were formed in alkaline environment and contacted laterally with source rocks, featuring in not only the dissolution of large amount of feldspar and carbonate, but also the intensive dissolution of quartz. The quality coarse clastic reservoirs of steep slope fan delta and underwater fan in the expanded rifting sequences are in interfingering contact with source rocks, and connected with deep alkaline fluids through basin-controlling faults, featuring in the erosion of large amount of feldspar and carbonate but just a small amount of partial quartz. The quality reservoirs of beach bar sands and turbidite in the expanded rifting sequences mostly occur in the source rocks, featuring in the erosion of feldspar and carbonate. The fault terrace zones on ramp are on the major migration pathway, thus the quality red reservoirs juxtaposing with the source rocks are favorable for hydrocarbon accumulation. The quality coarse clastic reservoirs in middle-fan that are screened by root-fan of steep slope are favorable for hydrocarbon accumulation. The quality beach bar sands and turbidite reservoirs that are in source rocks with high pressure are favorable for hydrocarbon accumulation.

Key words: secondary pore, dissolution, fluid, sequence, quality reservoirs, Dongying Sag

收稿日期:2015-03-20;修订日期:2016-06-20。

第一作者简介:王永诗(1964—),男,博士、教授级高级工程师,油气勘探。E-mail: wangysh623@sina.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05006-003)。

近年来,随着勘探程度的不断提高,勘探重点逐步向深部复杂储集体转移,大量研究表明,深层复杂储集体优质储层成为制约油气富集成藏的关键^[1],而深部优质储层的形成往往与溶蚀次生孔隙有关,因此,深层溶蚀作用形成机理的关注度逐渐增加,相继提出了有机酸溶蚀机理、H₂S 溶蚀机理、淋滤溶蚀机理、碱性流体溶蚀机理^[2-3],这些理论的相继提出,一定程度上促进了深部复杂储集体油气的勘探。

东营凹陷位于济阳拗陷东南部,勘探面积约为 5 700 km²,属于典型的继承性单断盆地,从北向南依次发育陡坡带、洼陷带、中央隆起带、洼陷带和缓坡带,其中古近系沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)和沙河街组三段下亚段(沙三下亚段)为主力烃源岩发育段。目前,已发现油气田 34 个,截止到 2014 年探明石油地质储量 24.3 × 10⁸ t,探井平均密度高达 0.5 口/km²,属于高成熟探区,油气勘探的难度越来越大,勘探逐渐向深层方向发展。近年来,深层的勘探力度在不断增大,深层陡坡带的砂砾岩体、缓坡带的滩坝砂和红层砂体油气勘探均取得重大突破,截止目前,砂砾岩体的探明储量为 8 463.56 × 10⁴ t、滩坝砂探明储量为 63 740.96 × 10⁴ t、红层砂体探明储量为 2 663 × 10⁴ t。勘探开发实践表明,受盆地埋藏演化、水-岩作用、能量场环境等因素的影响,深层储层物性整体偏差,大部分为低孔-特低渗储集层,因此,如何在这些特低孔-低渗储层中寻找优质储层成为该区深层油气勘探的关键。本

文紧密结合“十一五”和“十二五”的勘探实践,开展了陆相断陷湖盆深层复杂储集体优质储层形成机理与油气成藏研究。

1 层序控制下的沉积特征

依据构造、沉积环境、沉积体系、古生物和地震反射特征,将东营凹陷古近系划分为初始裂陷、裂陷扩展和裂陷收敛 3 个二级层序(图 1)。

初始裂陷层序顶界为沙四上/下亚段(T₇)区域不整合面^[4],绝对年龄约 45.0 Ma,底界为 T_R 不整合面,既是二级层序界面,也是全区性的一级层序界面,绝对年龄约 65 Ma,层序跨越时限约 20 Ma。该层序属闭流、控盆断裂开始强烈活动、气候干旱、物源供应充分、水体咸化的沉积产物。低位体系域主要发育砾岩、砂岩夹泥岩为主的冲积相沉积。湖进体系域主要发育灰质泥岩、油页岩、白云岩和滩坝砂体为主的局部湖泊沉积。高位体系域主要发育紫红色、灰绿色泥岩夹薄层碳酸盐岩和砂岩的河流-盐湖相沉积。受盆地形成期北东断南西超的控制,碎屑沉积主要发育在湖泊的西部和南部,膏岩盐主要发育在湖泊的东北部。

裂陷扩展层序顶界为沙二上/下亚段(T₂)区域不整合面,绝对年龄约 37.0 Ma,底界面为沙四上/下亚段(T₇)区域不整合面,层序跨越时限约 8 Ma。该层序形成期,近东西、北东向控盆断层数量增多,活动强度增

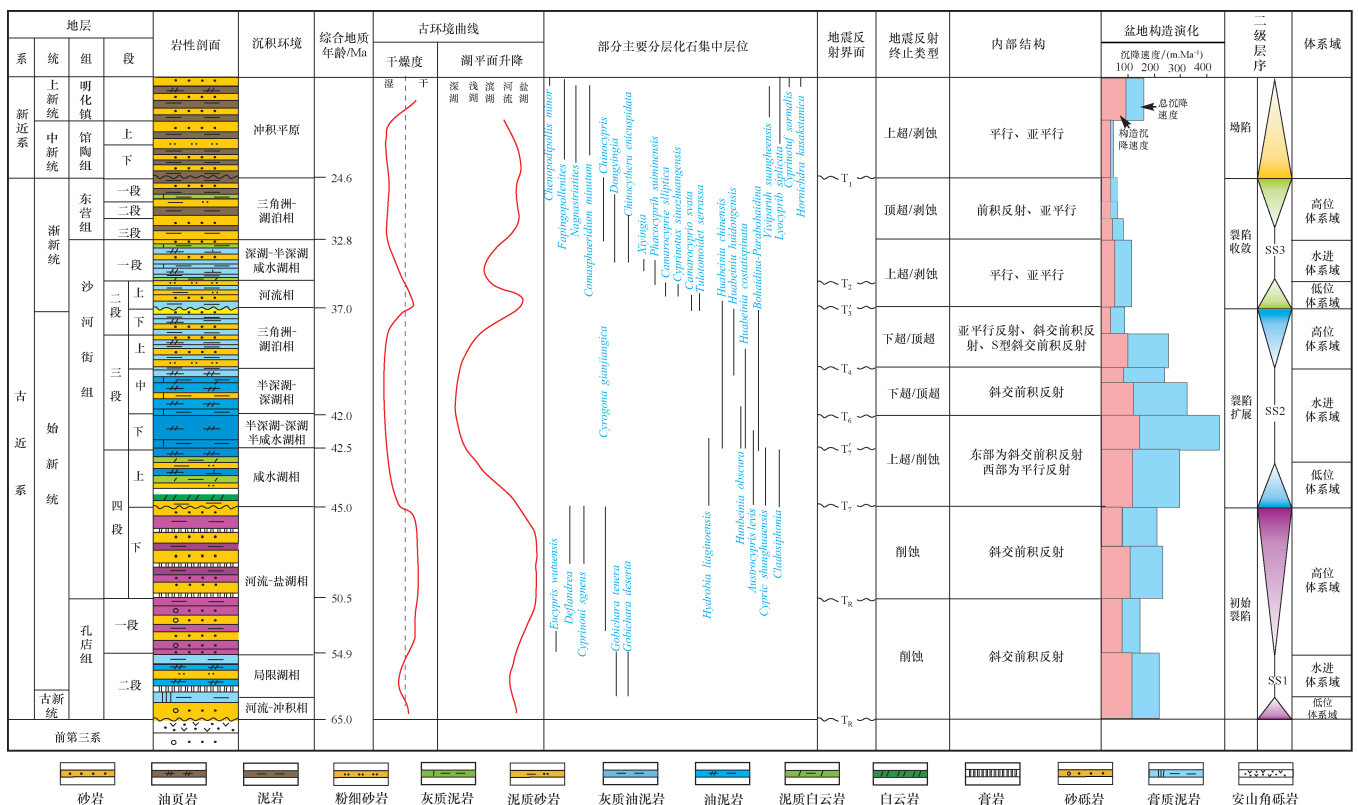


图1 东营凹陷古近系层序

Fig. 1 Stratigraphic sequences of the Palaeocene in Dongying Sag

大,且持续活动使湖盆发生深陷,加之气候由半干旱向潮湿转化,东南部和东部河流供应充分,湖泊水体迅速加深,沉积体系发育较全。低位体系域南部斜坡带主要发育滩坝沉积,洼陷带主要发育半深湖-深湖泥页岩沉积,北部陡坡带主要发育扇三角洲砂砾岩沉积。湖进体系域南部斜坡带主要发育小型三角洲沉积,洼陷带主要发育半深湖-深湖泥页岩沉积,北部陡坡带主要发育扇三角洲和水下扇砂砾岩沉积。高位体系域南部斜坡带主要发育自东向西推进的大型三角洲沉积,洼陷带主要发育半深湖-深湖泥岩和浊积岩沉积,北部陡坡带主要发育扇三角洲、水下扇砂砾岩沉积。

裂陷收敛层序顶界为馆陶组/东营组(T_1)区域不整合面,也是一级层序界面,绝对年龄约24.6 Ma,底界面为沙二上/下亚段(T_2)区域不整合面,层序跨越时限约12.4 Ma。该层序形成期,湖盆发生整体抬升,由断陷向坳陷转化,凹陷水体相对较浅,气候处于温湿状态。低位体系域主要发育河道、三角洲沉积。湖进体系域主要发育一套分布广泛的泥页岩夹浅湖滩坝、生物碎屑灰岩为主的沉积。高位体系域发育以进积作用为主的辫状河三角洲沉积。

2 深层优质储层形成机理

不管是初始裂陷层序南部缓坡带发育的河流-冲积扇红层储集体,还是裂陷扩展层序陡坡带发育的扇三角洲、水下扇砂砾岩储集体以及南部斜坡发育的滩坝砂砾岩,岩性主要为长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩和岩屑砂岩(图2),均具有岩石类型多、组分复杂、成分成熟度低、高岩屑和高钙质的特点,为后期发生强烈成岩作用提供了物质基础。储层孔隙恢复结果表明,压实和胶结作用是深层储集体物性变差的主要原因,而局部的溶蚀作用是深层储层性能改善的主要因素,一定程度上控制着深层优质储层的发育程度,如北带裂陷扩展期发育的水下扇中压实作用损失孔隙度19.3%,胶结作用损失孔隙度8.14%,而溶蚀作用增

加孔隙度8.7%,使扇中成为有效储层,成为油气富集的主要相带。

由于深层不同层序沉积环境、沉积物组合、流体性质及流体运移形式等因素的不同,不同层序溶蚀孔隙的形成条件、成因机理存在差异。就东营凹陷深层的两个层序而言,初始裂陷型层序是盐湖环境的沉积产物,发育大量膏盐岩沉积,沉积流体整体偏碱性^[5],由于胶结物类型多(膏盐岩类、碳酸盐岩类)、含量高,原生孔隙损失严重,砂体中流体的循环能力有限,一定程度上制约了后期溶蚀作用对储集性能的改善。据统计,原始孔隙与次生孔隙呈明显的正相关关系。裂陷扩展层序主要为咸湖-淡水湖沉积,优质烃源岩发育。受生烃的影响,地层中流体以酸性为主,加之生烃高压的驱动,流体循环加剧,一定程度上促进了溶蚀作用对储层的改善程度。

2.1 初始裂陷层序深层红层优质储层成因机理

从10余口红层储层的孔隙演化过程分析发现,在深部3550~3750 m普遍存在一个物性变好的层段,据统计,该层段溶蚀孔隙含量大于60%,长石、石英和碳酸盐岩都发生不同程度的溶蚀,对次生孔隙均有贡献(表1)。其中,长石溶蚀孔隙占50%,石英和碳酸盐岩溶蚀孔隙各占25%左右。长石、石英和碳酸盐岩都发生溶蚀的现象表明,储集空间演化过程中发生酸-碱性流体交替的溶蚀过程,其中碱性流体可能与红层沉积期原始地层水呈碱性及后期膏岩成岩演化释放的碱性流体增强碱性有关^[6]。东营凹陷孔一段-沙四下亚段沉积时期,气候干旱,整体以蒸发环境为主,发育了3套厚层膏岩层,石膏沉淀的物理化学条件为pH大于7.8的环境,可以推断孔一段-沙四下亚段红层沉积时期的原始地层水为碱性-弱碱性^[7]。酸性流体与其侧向接触的沙四上亚段烃源岩生烃演化以及膏岩成岩晚期发生硫酸盐热化学还原作用形成有机酸和硫化氢有关。由于酸性流体大量形成时间稍早于碱性流体排出时间^[8](沙四上亚段烃源岩大量排出有机酸时间42.5~32 Ma和18.2~7.8 Ma;沙四下亚段膏盐层

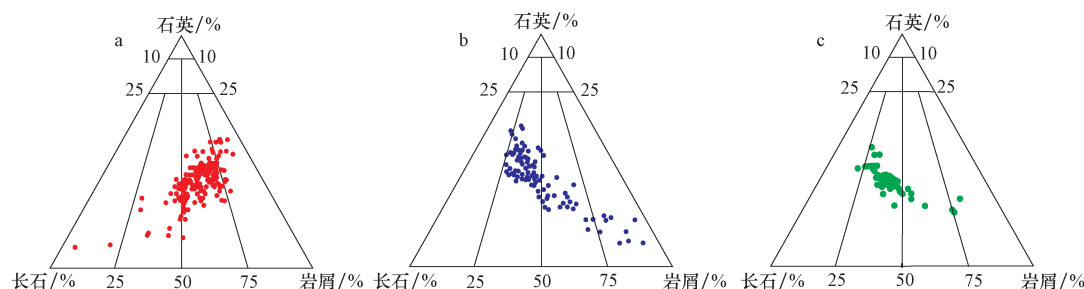


图2 东营凹陷碎屑组分三端元图

Fig. 2 Ternary diagram of detrital composition in Dongying Sag

a. 陡坡带砂砾岩体; b. 缓坡滩坝砂; c. 缓坡河流-冲积扇红层储集体

表 1 东营凹陷红层储层成岩演化与孔隙演化关系

Table 1 Relationship between diagenetic evolution and pore evolution of red bed reservoirs in Dongying Sag

深度/m	时间/Ma	流体性质	成岩作用	孔隙贡献量/%	真实孔隙度/%
1 850	39. 1	碱性	压实	- 16. 2	21. 8
			长石溶解	8. 0	
2650	28. 7	酸性	石英加大	- 4. 6	21. 3
			压实	- 3. 9	
			石英溶解	4. 0	
3 000	24. 6	碱性	碳酸盐胶结	- 10	13. 7
			压实	- 1. 6	
3 400	4. 1	酸性	碳酸盐溶解	4. 1	14. 5
			压实	- 3. 3	
3 750	0	弱酸性	压实	- 3. 0	11. 5

脱水时间 42 ~ 7. 6 Ma)。因此,东营凹陷红层储集体溶蚀作用的成因演化过程是在前期弱碱性沉积水体环境下保留的原生粒间孔隙基础上演化而来的。距今 39. 1 Ma 至距今 28. 7 Ma,沙四上亚段烃源岩顶界地层温度由 40 ℃增加至 77 ℃,底界地层温度由 75 ℃增加至 120 ℃,该时期有机质已开始成熟,有机质演化过程中释放大 量有机酸,地层温度处于有机酸浓度最大温度范围或有利保存温度范围,有机酸控制了地层水的 pH 值,使地层水转化成酸性,酸性环境为长石蚀变成高岭石提供了条件。该时期主要发生长石溶蚀和石英次生加大以及高岭石沉淀。至距今 24. 6 Ma,烃源岩顶界地层温度达到 110 ℃、底界地层温度达到 140 ℃,该时期有机酸已开始发生脱羧作用生成 CO₂ 和烃类,有机酸浓度降低,而石膏进入大规模脱水阶段,石膏脱出的大量碱性水控制了地层水的 pH 值,地层水呈碱性,如石英溶蚀颗粒边缘发育大量方沸石胶结物、石英溶蚀段粘土矿物主要以伊利石为主(高岭石含量很低)以及硬石膏基底式胶结的特点,均说明了碱性流体的大量存在。由于红层储集体是咸化沉积环境的产物,碱金属离子丰富,碱金属离子的吸附削弱了 Si—O—Si 键强度,使之更容易断裂,与之相应的是石英溶解速率的增大,也就是所谓的“盐效应”^[9]。在“盐效应”作用的影响下,石英颗粒发生溶蚀,同时发生碳酸盐胶结^[10-12]。距今 24. 6 Ma 至距今 10 Ma,地层经历了抬升变浅到再次沉降的过程,地层顶界温度由 110 ℃变至 92 ℃、底界温度由 140 ℃变至 120 ℃,该时期有机质生烃减缓,但是有机酸处于有利保存温度范围内,有机质演化可再次生成大量有机酸,使地层水成酸性,该时期主要发生长石、碳酸盐岩溶蚀,特别是后期铁白云石、铁方解石溶蚀(图 3)。总体而言,红层深层优质储层是成岩过程中酸-碱性流体交替溶蚀的结果。

2. 2 裂隙扩展层序深层陡坡砂砾岩体优质储层成因机理

东营凹陷陡坡带扇三角洲、水下扇砂砾岩体 3 000

m 以下普遍存在 3 ~ 4 个物性变好的层段,但受砂砾岩体强烈非均质性的影响,物性较好层段的深度不统一。大量薄片资料统计表明,砂砾岩有效储层溶蚀孔隙发育,且以长石溶孔和碳酸盐溶孔为主,石英溶蚀孔隙为辅(图 4),反映了酸性流体和碱性流体同时活动,以酸性流体活动为主的特征。该类储集体长石溶蚀孔最为发育,包裹体测试数据和埋藏史恢复结果表明,长石溶蚀发生在距今约 42 Ma,这与其侧接的沙四上亚段烃源岩的有机酸高峰浓度期(沙四上亚段烃源岩大量排出有机酸时间 42. 5 ~ 32 Ma 和 18. 2 ~ 7. 8 Ma)相对应,表明烃源岩生烃演化过程中形成的酸性流体促进了长石溶蚀,形成了大量次生孔隙。在研究中还发现,膏盐层上覆 100 多米白云岩中发现大量的硬石膏脉,显示硬石膏化流体的向上运移,表明该区带具有碱性流体活动。储集体碳酸盐胶结强度随深度增大而增强的趋势以及北部断裂带地层水主要来自深层的特征,均表明碱性流体主要来自初始裂陷层序的沙四下亚段膏岩盐层系。研究区碳、氧同位素测试显示两大氧同位素负漂移点群(图 5):其一,碳同位素相对于沉积碳酸盐略有升高,反映碱性流体作用下重结晶、阳离子交换等作用;其二,碳同位素明显降低,反映有机成因二氧化碳加入、阳离子交换等作用。碳、氧同位素也显示深层陡坡砂砾岩储集体存在碱性流体、有机成因二氧化碳酸性流体的交替注入特点^[13]。进一步说明,裂陷扩展层序北带砂砾岩体次生孔隙是酸、碱流体交替溶蚀的结果(图 5)。总体而言,陡坡带砂砾岩体优质储层是酸-碱流体交替溶蚀作用的结果,酸性流体的贡献相对较大,其形成过程是早期北带砂砾岩体尚未充分压实,物性较好,控沉积断裂继续活动,在早成岩阶段,当地温增大时,初始裂陷发育的大套膏盐层发生硬石膏化,释放大 量高矿化度的碱性水进入扇体后,可穿过扇根,沿断层向上排泄,也可在扇体内以跨层流动的方式向上排泄,碱性流体虽然使石英发生溶蚀,但更重要的是导致较强碱交代与胶结作用,使得深层扇根部位砂

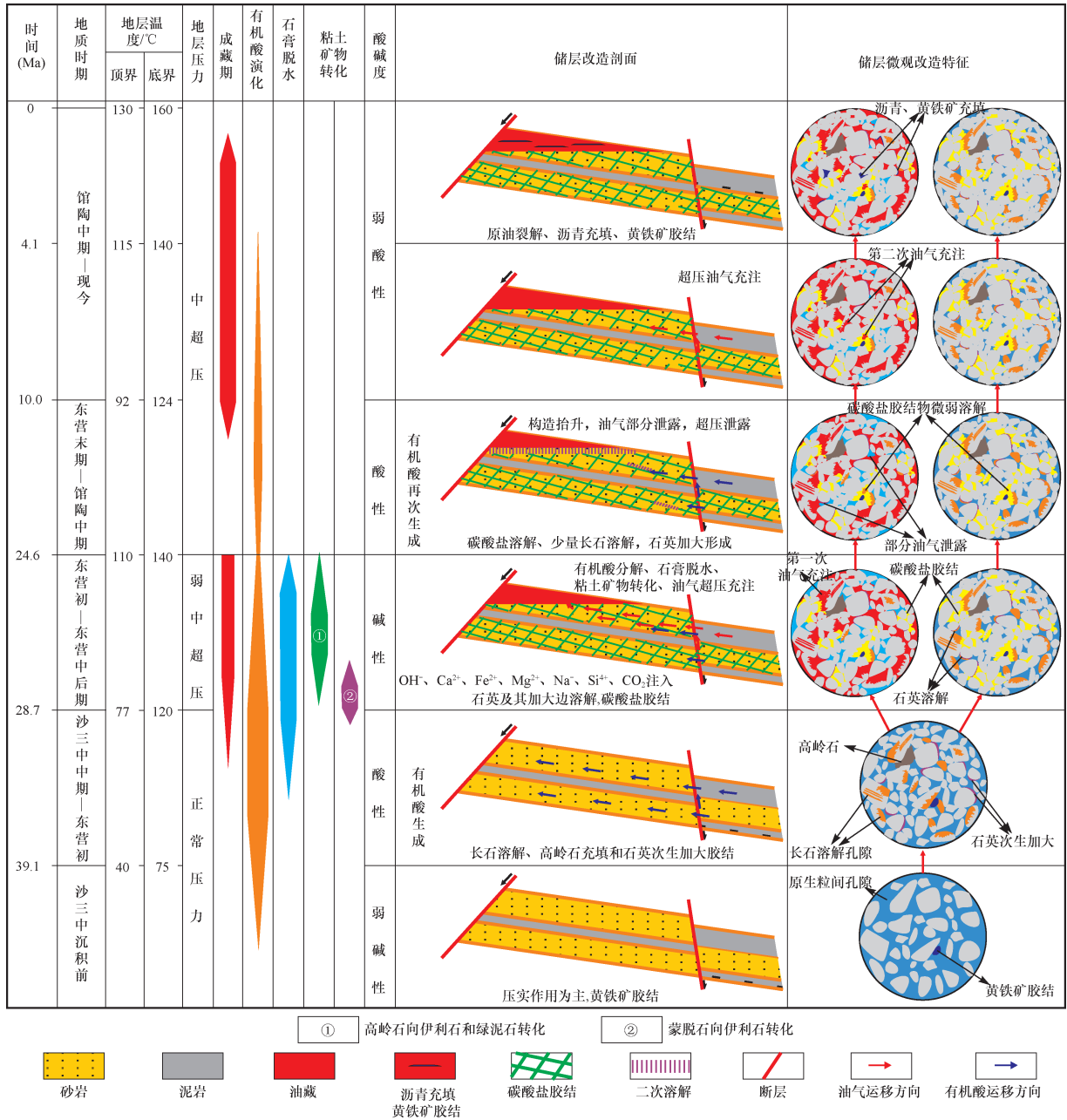


图 3 东营凹陷红层深层优质储层成因模式

Fig. 3 Formation pattern of quality red bed reservoirs in Dongying Sag

砾岩体的孔隙度和渗透率大幅度下降。随着埋藏深度的加大,与其侧向接触的沙四上亚段优质源岩开始生成大量的有机酸和二氧化碳,在生烃高压的驱动下,这些酸性流体不断向砂砾岩体充注,砂砾岩中的酸溶性组分长石、碳酸盐岩开始大量溶蚀形成次生孔隙,局部优质储层形成。

2.3 裂隙扩展层序深层滩坝砂和浊积岩优质储层成因机理

东营凹陷裂隙扩展层序发育的远岸滩坝砂和浊积岩距离烃源岩较近,优质储层形成演化受烃源岩的生烃演化控制明显,主要与生烃演化过程中酸性流体演化有关。镜下薄片鉴定表明,该类储层储集空间以长

石次生溶蚀孔隙为主,仅保留少量的原生残余孔隙,且往往在长石次生溶蚀孔隙发育的区域见有大量次生高岭石。进一步研究发现,孔隙和高岭石含量在纵向上具有一致性(图 6),表明生烃过程中形成的酸性环境为长石蚀变成高岭石提供了条件(长石蚀变高岭石化条件:温度 60 ~ 150 ℃; pH 值小于 6.5^[14]),大量长石在蚀变成高岭石的过程中形成微孔,大大改善了该类储层的储集性能^[15]。张善文“十一五”期间专门就东营凹陷滩坝砂长石溶蚀过程进行过详细的研究^[16],认为酸性条件不仅能够改善储集性,还消耗大量的地层水(经计算,研究区滩坝砂体有效耗水区带滩坝砂体的耗水量约为 68 × 10⁸ t),降低流体压力,压力降低导致了外来酸性流体的再次充注,促进了多期酸性流体

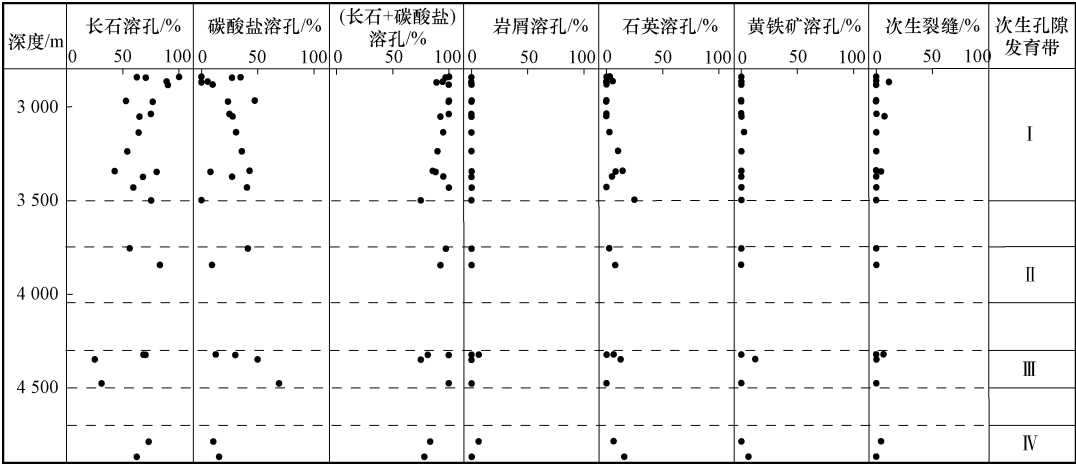


图 4 东营凹陷民丰洼陷深层砂砾岩储层溶蚀次生孔隙演化

Fig. 4 Secondary pore evolution of deep coarse clastic reservoirs in Minfeng Sub-sag, Dongying Sag

长时间溶蚀。经模拟实验计算,钾长石蚀变为高岭石后,岩石体积缩小率为 $(217.2 - 99.2 - 92.3) / 217.2 \times 100\% = 11.83\%$,钠长石蚀变为高岭石后,岩石体积缩小率为 $(203.9 - 99.2 - 92.3) / 203.9 \times 100\% = 6.08\%$ (表 2)。

3 深层优质储层油气成藏

3.1 初始裂陷层序深层红层油气成藏

油源对比结果表明,初始裂陷层序红层储集体的油气主要来源于裂陷扩展层序沙四上亚段的烃源岩,如博兴、纯化和陈官庄局部地区红层油气均来自沙四上亚段烃源岩,仅王家岗地区红层油气同时来自沙四

上亚段与孔店组烃源岩(混合型)^[17]。由于深层红层尚不发育大规模有效储层,砂体的输导能力较为有限^[18],因此,油气主要通过断裂进入有效储层,通常情况下,与烃源岩直接接触的储层才能富集油气成藏,即源储对接油气成藏模式。但并非与烃源岩对接的储层都能成藏,处于流体优势运移通道的砂体(如断阶带砂体)由于流体循环条件好,酸-碱性流体控制下的溶蚀作用强烈,往往是次生孔隙发育带,物性相对较好,容易富集成藏,如博兴洼陷南坡断阶带的高 94 区块,高 94 井孔店组储层(3 775.5 ~ 3 788.8 m),平均孔隙度为 13.9%,平均渗透率为 $17.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,试油获日

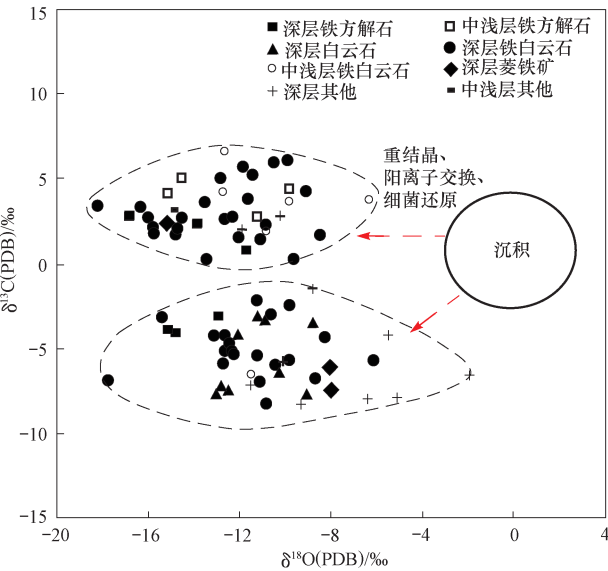


图 5 东营凹陷民丰洼陷盐 18 井氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)和碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)交会图

Fig. 5 Cross plot of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in Well Y18 in Minfeng Sub-sag, Dongying Sag

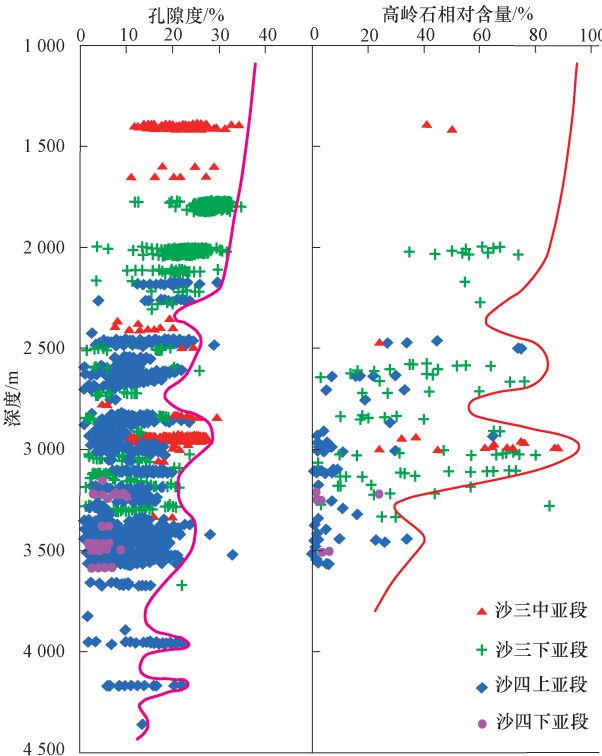


图 6 东营凹陷滩坝砂孔隙度和高岭石相对含量纵向演化
Fig. 6 Vertical porosity and kaolinite content variations of beach bar sandstones in Dongying Sag

表 2 东营凹陷钾长石和钠长石蚀变高岭石体积变化

Table 2 Volume changes of kaolinite altered from K-feldspar and Na-feldspar dissolution in Dongying Sag

岩石	体积变化	反应前		反应后		
		2KAlSi ₃ O ₈	2H ₂ CO ₃	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	2KHCO ₃	4SiO ₂
钾长石	摩尔数	2	2	1	2	4
	摩尔克数/g	278 × 2	62 × 2	258	100 × 2	60 × 4
	密度/(g · cm ⁻³)	2.56	1.05	2.6	2.17	2.6
	反应前后固相体积/cm ³	217.2		99.2		92.3
钠长石	摩尔数	2	2	1	2	4
	摩尔克数/g	262 × 2	62 × 2	258	84 × 2	60 × 4
	密度/(g · cm ⁻³)	2.57	1.05	2.6	2.19	2.6
	反应前后固相体积/cm ³	203.9		99.2		92.3

产 5.75 t。但处于樊家鼻状构造部位的樊深 1 井对应的孔店组(3 998.80 ~ 4 043.35 m 井段),平均孔隙度为 2.5%,平均渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,虽然录井油气显示较为活跃(油斑、荧光级别),但试油结果为干层和含气水层(图 7),这可能与该区流体循环不畅未形成优质储层有关。目前,东营凹陷该类储层已累计上报探明储量 $2\,663 \times 10^4 \text{ t}$,控制储量 $836.9 \times 10^4 \text{ t}$,预测储量 $365.73 \times 10^4 \text{ t}$,且主要分布在南部斜坡具有鼻状构造的断阶带。

3.2 裂隙扩展层序深层砂砾岩油气成藏

裂隙扩展层序陡坡带深层砂砾岩扇体,由于扇根部位分选差,岩屑组分含量高,又紧邻深大断裂体系(深层碱性流体的通道),成岩过程中压实和胶结作用强烈,储层物性差。而扇中不仅残余原生孔隙发育,而且酸性-碱性流体交互溶蚀作用形成的次生孔隙也发育,物性较好,因此,易形成扇根遮挡的成岩圈闭。受成岩耗水作用(长石高岭石化过程)的影响,深层砂砾岩圈闭古压力多为常压或低压^[19],与其侧接的沙四上亚段、沙三下亚段两套优质烃源岩成烃演化过程中形成超压,表现为两套烃源岩开始大量生烃的深度与压

力出现超压的深度吻合,在源-储压差作用下,深层生成的油气源源不断充注于扇中成岩圈闭中富集,最终形成扇根封堵的油气成藏。但并不是所有的深部砂砾岩体都能形成扇根封堵油藏,往往在隔层发育,既受深层碱性流体影响,又受侧向多期源岩排烃影响的深部扇体扇根封堵油藏最为发育,研究区这类油藏一般位于 3 000 m 以下深度。受生烃演化的控制,深层不仅发育扇根封堵的岩性油藏,在其更深的部位往往还发育扇根封堵的凝析气藏(图 8)。因此,确定致密扇根发育程度和范围成为深层砂砾岩体勘探的一项主要任务。主要依据探井油气显示情况和试油成果,通过建立扇体埋藏深度与致密扇根宽度的关系,结合地震响应特征,进行致密扇根的确定。目前,东营凹陷已上报探明储量 $8\,463.56 \times 10^4 \text{ t}$,控制储量 $10\,241.88 \times 10^4 \text{ t}$,预测储量 $3\,985 \times 10^4 \text{ t}$,且主要分布在膏岩盐相对发育的北带中、东段。

3.3 裂隙扩展层序深层滩坝砂和浊积岩油气成藏

不管是深层远岸滩坝砂还是浊积岩油藏,砂体越厚、物性越好、相应的产量也越高。这可能与厚层砂体分布较广,容易造成断裂切割和流体分异,有利于先期

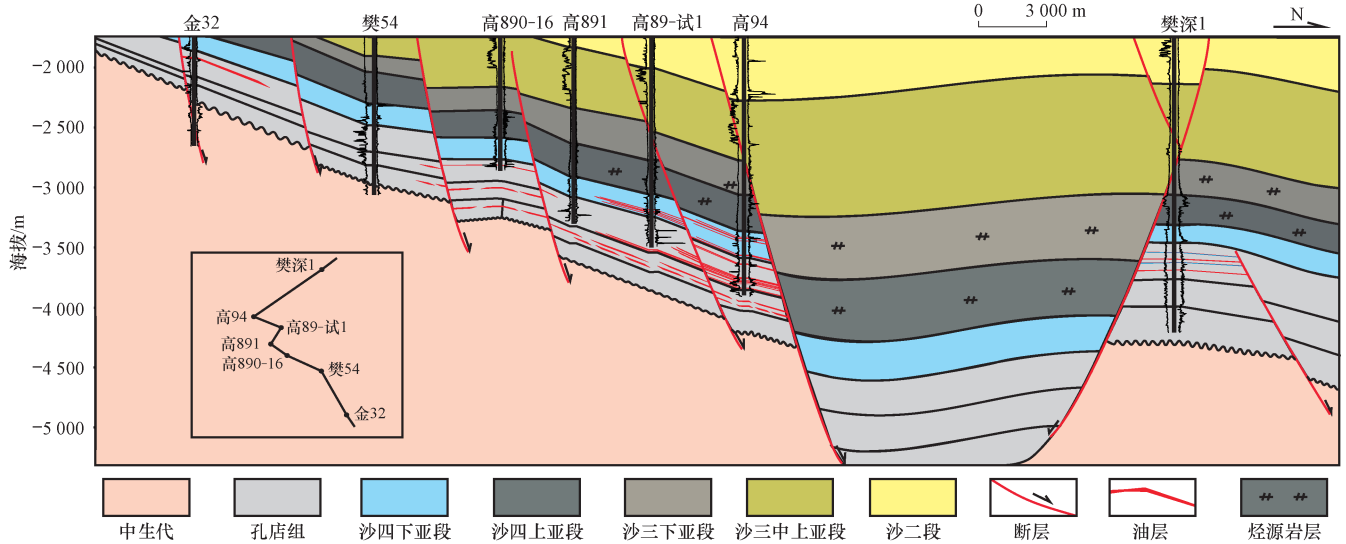


图 7 东营凹陷深层红层源-储对接成藏模式

Fig. 7 Hydrocarbon accumulation pattern of deep red bed reservoir-source rock juxtaposition in Dongying Sag

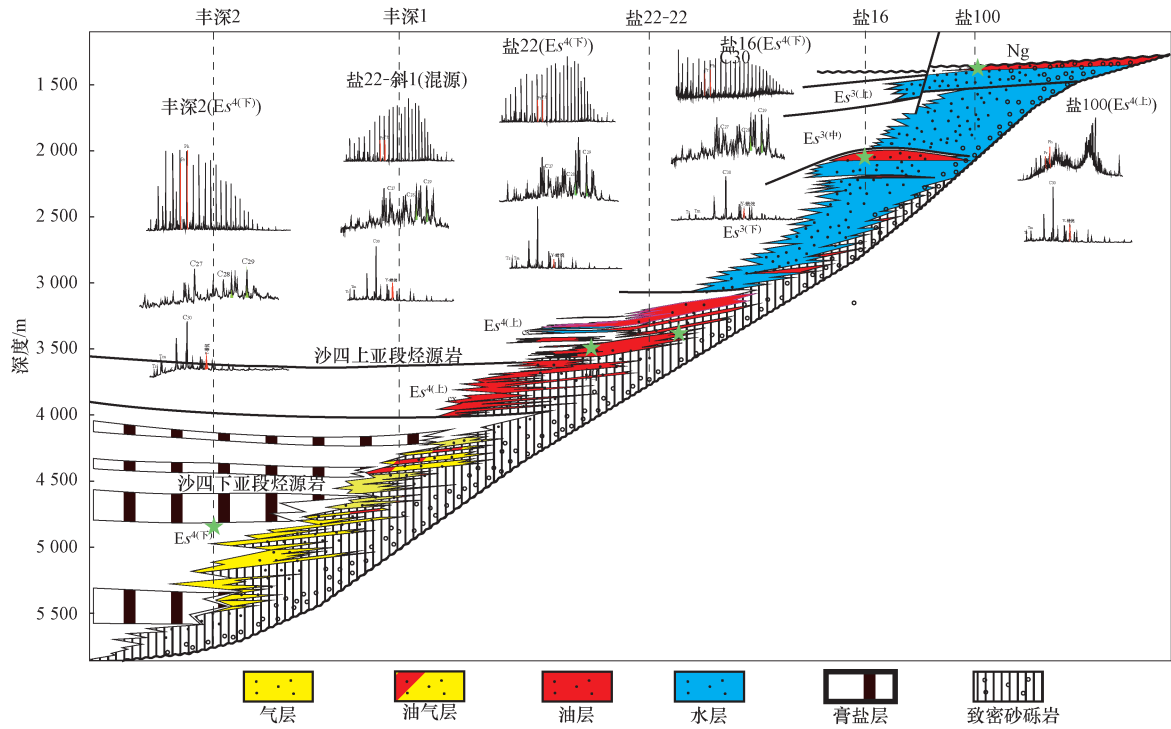


图 8 东营凹陷深层砂砾岩成藏模式

Fig. 8 Hydrocarbon accumulation pattern of deep coarse clastic rocks in Dongying Sag

酸性流体的溶蚀和后期油气充注有关,表现为深层滩坝储层次生孔隙与含油饱和度和日产油量都呈明显的正相关关系,相关系数分别为 0.8 和 0.85。进一步研究表明,次生孔隙不仅是深层有效储层的主控因素,同时,在这些次生孔隙形成的过程中还消耗大量的水,使得储层往往含水很低,甚至不含水,勘探过程中经常遇到的非油即干的现象,由于深层为封闭的水体循环系统,往往会导致孔隙发生亏空,形成低压^[8]。生烃形成的异常高压与储层改善过程中形成的低压所产生的压力差,为该类储集体油气充注提供了动力,最终形成砂体发育规模决定成藏规模,烃源岩广泛超压控制充满程度的“压吸”油气富集特征(图 9)。目前,东营凹陷已实现了近 1 200 km²,12 个油田同一层系的整体含油,发现了 2 × 10⁸ t 级规模的大型滩坝砂油藏,且主要发育在二、三级断裂发育的东营凹陷南坡西段。

4 结论

1) 层序控制下的有效储层是深层油气富集成藏的重要控制因素,其中酸 - 碱流体交替溶蚀改造作用是优质储层形成的关键。

2) 东营凹陷深层发育的两个层序由于沉积、流体环境以及成岩等条件的差异,不同层序优质储层的形成机理不尽相同。初始裂隙层序红层优质储层为碱 - 酸性流体交替溶蚀改造的产物。裂隙扩展层序陡坡带砂砾岩优质储层亦为碱 - 酸性流体交替溶蚀的结果,

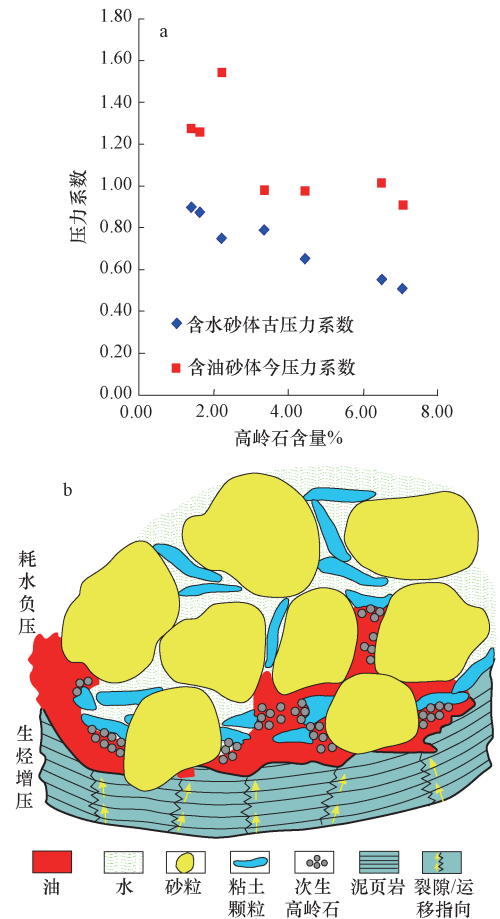


图 9 东营凹陷深层滩坝成藏模式

Fig. 9 Hydrocarbon accumulation pattern of deep beach bar in Dongying Sag

a. 压力系数与高岭石含量关系; b. 压吸充注模式

但以酸性流体溶蚀为主;而裂隙扩展层序的滩坝砂和浊积岩优质储层主要为酸性流体溶蚀改造的结果。

3) 受优质储层、成藏动力、输导条件的控制,初始裂隙层序深层红层主要发育源储对接的油气成藏模式,扩展裂隙层序深层砂砾岩体主要发育扇根封堵油气成藏模式,扩展裂隙层序深层滩坝主要发育“压吸”充注油气成藏模式。

参 考 文 献

- [1] 秦伟军,李娜,付兆辉.高邮凹陷深层系有效储层形成控制因素[J].石油与天然气地质,2015,36(5):788-792.
Qin Weijun, Li Na, Fu Zhaohui. Factors controlling formation of effective reservoirs in deep of the Gaoyou Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 788-792.
- [2] 黄洁,朱如凯,侯读杰,等.深部碎屑岩储层次生孔隙发育机理研究进展[J].地质科学情报,2007,26(6):76-82.
Huang Jie, Zhu Rukai, Hou Dujie, et al. The new advances of secondary porosity genesis mechanism in deep clastic reservoir[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(6): 76-82.
- [3] 曲希玉,陈修,邱隆伟,等.石英溶解型次生孔隙的成因及其对储层的影响—以大牛地气田上古生界致密砂岩储层为例[J].石油与天然气地质,2015,36(5):804-813.
Qu Xiyu, Chen Xiu, Qiu Longwei, et al. Genesis of secondary pore of quartz dissolution type and its influences on reservoir: Taking the tight sandstone reservoir in the Upper Paleozoic of Daniudi gas field as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 804-813.
- [4] 宋国奇,王永诗,程付启,等.济阳拗陷古近系二级层序界面厘定及其石油地质意义[J].油气地质与采收率,2014,21(5):1-9.
Song Guoqi, Wang Yongshi, Cheng Fuqi, et al. Ascertaining secondary order sequence of Palaeogene in Jiyang depression and its petroleum geological significance[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 1-9.
- [5] 邱隆伟,姜在兴,操应长,等.泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响[J].中国科学(D辑),2001,31(9):752-759.
Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Cao Yingchang, et al. Alkaline diagenesis and its influence on reservoir rocks in Miyang depression[J]. Science in China(SerD), 2001, 31(9): 752-759.
- [6] 王健,操应长,高永进,等.东营凹陷古近系红层储层成岩作用及成岩相[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(4):23-30.
Wang Jian, Cao Yingchang, Gao Yongjin, et al. Diagenesis and diagenetic facies of red beds reservoirs of Paleogene in Dongying depression[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(4): 23-30.
- [7] 李小强,赵彦超.东濮凹陷柳屯洼陷盐湖盆地超压成因[J].石油与天然气地质,2013,33(5):686-694.
Li Xiaoqiang, Zhao Yanchao. Overpressure genesis in the Liutun salt-lake sag, Dongpu Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 33(5): 686-694.
- [8] 游国庆,潘家华,刘淑琴,等.东营凹陷古近系砂岩成岩作用与孔隙演化[J].岩石矿物学杂志,2006,25(3):237-242.
You Guoqing, Pan Jiahua, Liu Shuqin, et al. Diagenesis and pore evolution of Paleogene sandstone reservoir in Dongying depression[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 25(3): 237-242.
- [9] 朱世发,朱筱敏,吴冬,等.准噶尔盆地西北缘下二叠统油气储层中火山物质蚀变及控制因素[J].石油与天然气地质,2014,35(1):77-86.
Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Wu Dong, et al. Alteration of volcanics and its controlling factors in the Lower Permian reservoirs at northwestern margin of Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 77-86.
- [10] 邱隆伟,姜在兴,陈文学.一种新的储层孔隙成因类型—石英溶解型次生孔隙[J].沉积学报,2002,20(4):621-627.
Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Chen Wenxue, et al. A new type of secondary porosity-quartz dissolution porosity[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 621-627.
- [11] 施振飞,张振城,叶绍东,等.苏北盆地高邮凹陷阜宁组储层次生孔隙成因机制探讨[J].沉积学报,2005,23(3):429-436.
Shi Zhenfei, Zhang Zhencheng, Ye Shaodong, et al. The mechanism of secondary pores in the reservoir of Funing Formation in Gaoyou depression of Subei basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 429-436.
- [12] 陈忠,罗蜚潭,沈明道,等.由储层矿物在碱性驱替剂中的化学行为到砂岩储层次生孔隙的形成[J].西南石油学院学报,1996,18(2):15-19.
Chen Zhong, Luo Zhetan, Shen Mingdao, et al. Study of secondary pore formation on the basis of chemical behaviour of minerals in alkaline-flooding agents [J]. Journal of Southwestern Petroleum Institute, 1996, 18(2): 15-19.
- [13] 韩元佳,何生,宋国奇,等.东营凹陷超压顶封层及其附近砂岩中碳酸盐胶结物的成因[J].石油学报,2012,33(3):385-393.
Han Yuanjia, He Sheng, Song Guoqi, et al. Origin of carbonate cements in the overpressured top seal and adjacent sandstones in Dongying Depression[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(3): 385-393.
- [14] 董果果,黄文辉,万欢,等.东营凹陷北部陡坡带沙四上亚段砂砾岩储层固体-流体相互作用研究[J].现代地质,2013,27(4):941-948.
Dong Guoguo, Huang Wenhui, Wan Huan, et al. Solid-fluid interaction in glutenite reservoirs of the Upper Submember, Fourth Member, Shahejie Formation in Northern Slope of Dongying Sag[J]. Geoscience, 2013, 27(4): 941-948.
- [15] 张善文.成岩过程中的“耗水作用”及其石油地质意义[J].沉积学报,2007,25(5):701-707.
Zhang Shanwen. “Water consumption” in diagenetic stage and its petroleum geological significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5): 701-707.
- [16] 张善文.再论“压吸充注”油气成藏模式[J].石油勘探与开发,2014,41(1):37-45.
Zhang Shanwen. Re-discussion on the reservoir formation by pressure-suck filling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 37-45.
- [17] 孟江辉,刘洛夫,姜振学,等.东营凹陷南斜坡沙四下亚段-孔店组原油地球化学特征及成因分类[J].现代地质,2010,24(6):1085-1092.
Meng Jianghui, Liu Luofu, Jiang Zhenxu, et al. Characteristics and origin classification of the oils from the lower section of the 4th Member of Shahejie Formation and Kongdian Formation in the southern slope of Dongying Depression, Bohai Bay Basin [J]. Geoscience, 2010, 24(6): 1085-1092.
- [18] 刘传虎,韩宏伟.济阳拗陷古近系红层沉积成藏主控因素与勘探潜力[J].石油学报,2012,33(1):63-70.
Liu Chuanhu, Han Hongwei. Main controlling factors of deposition, hydrocarbon accumulation and exploration potential of Paleogene red beds in jiyang depression[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(1): 63-70.
- [19] 伍松柏.东营凹陷北带不同类型砂砾岩扇体“相-势”控藏作用[J].油气地质与采收率,2008,15(3):39-42.
Wu Songbai. Controlling of facies and fluid potential on the oil accumulation of different glutenite fan in north belt of Dongying Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(3): 39-42.

(编辑 张亚雄)