

文章编号:0253-2697(2013)02-0283-10 DOI:10.7623/syxb201302010

东营凹陷古近系红层储层成岩作用特征及形成机制

王健¹ 操应长¹ 高永进² 刘杰³

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院 山东青岛 266580;

2. 中国石化胜利油田公司地质科学研究院 山东东营 257015; 3. 中国地质大学能源学院 北京 100083)

摘要:东营凹陷古近系孔店组一段(简称孔一段)—沙河街组四段下亚段(简称沙四下亚段)沉积时期发育了规模巨大的干旱气候条件下形成的红层沉积。综合利用钻井岩心、铸体薄片、物性及黏土矿物资料,并结合盆地埋藏演化史,对储层成岩作用特征及成因机制进行了系统研究。储层具有多重碱性成岩环境和酸性成岩环境作用特征。压实作用中等偏强,热压实效应明显。胶结物类型主要包括碳酸盐、铁碳酸盐、石膏、硬石膏和自生石英等,胶结作用在砂体边缘强,砂体内部较弱,砂体中部胶结物含量由断块下部向断块上部逐渐增加。溶解作用主要为碱性环境下形成的石英溶解和酸性环境下形成的长石、碳酸盐胶结物溶解,溶蚀孔隙含量由砂体边缘向砂体内部逐渐增加,由断块下部向断块上部逐渐降低。交代作用主要为碳酸盐、硫酸盐胶结物交代石英、长石颗粒及石英加大、铁碳酸盐交代碳酸盐。红层储层经历了早期碳酸盐及石膏胶结、早期石英溶解→长石及碳酸盐胶结物溶解、自生石英胶结→晚期碳酸盐及硬石膏胶结、晚期石英溶解→晚期少量碳酸盐胶结物、长石溶解的成岩演化序列。多重碱性及酸性成岩环境交替演化和上升流作用机制控制了储层的发育。

关键词:红层;成岩作用;成岩环境;成岩序列;形成机制;古近系;东营凹陷

中图分类号:TE112.22

文献标识码:A

Diagenetic characteristics and formation mechanism of Paleogene red-bed reservoirs in Dongying sag

WANG Jian¹ CAO Yingchang¹ GAO Yongjin² LIU Jie³

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Geological Scientific Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257015, China;

3. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Red-bed deposits developed on a large scale during the Ek₁-Es₄^s stage of Paleogene in Dongying sag under arid climate. Integrated with analyses of burial and evolutionary histories of the basin, diagenetic characteristics and formation mechanism of red-bed reservoirs in the study area were systematically investigated based on data of drilling cores, casting thin sections, physical properties and clay minerals. These red-bed reservoirs are characterized by the formation in multiple alkaline and acidic diagenetic environments, moderate to strong compaction, and apparent thermal compaction. Cement types mainly include carbonate, ferrocarnatite, authigenic quartz, gypsum and anhydrite. Cementation is strong at the boundary belt of sandstones but relatively weak at the middle part of sandstones, where cement contents increase gradually from the lower part to the upper part of fault blocks. Dissolution in red-bed reservoirs occurs mainly as quartz dissolution in an alkaline diagenetic environment or feldspar and carbonate cement dissolution in an acidic diagenetic environment. Dissolution plane porosity increases gradually from the fringe to the bosom of sand bodies but decreases gradually from the lower part to the upper part of fault blocks. Metasomatism occurs mainly in quartz and feldspar grains with carbonate and sulfate cements, authigenic quartz, and carbonate with ferrocarnatite. The diagenetic sequence of red-bed reservoirs was specified from the early carbonate and gypsum cementation, early quartz dissolution to the feldspar and carbonate cement dissolution, authigenic quartz cementation to the late carbonate and anhydrite cementation, late quartz dissolution then to the late carbonate cement and feldspar dissolution. The alternate evolution of multiple alkaline and acidic diagenetic environments and the action mechanism of upwelling current have controlled the development of these reservoirs.

Key words: red bed; diagenesis; diagenetic environment; diagenetic sequence; formation mechanism; Paleogene; Dongying sag

红层是一种红色的沉积层,主要以砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩组成,夹有石灰岩、泥灰岩、石膏及岩

盐等,红层的沉积结构和构造具有一定的规律性^[1]。红层中所含生物化石数量少,沉积环境特殊,剖面往往

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05051-001)和国家自然科学基金项目(No. 40972080)资助。

第一作者及通讯作者:王健,男,1985年12月生,2007年毕业于中国石油大学(华东),现为中国石油大学(华东)博士研究生,主要从事层序地层学、沉积学及储层地质学研究。Email: wangjian8512@yahoo.com.cn

不太稳定,又缺乏标志层^[1-3],研究起来比较困难,但红层中又不乏含矿层和油气藏^[1,4]。近年来众多学者针对红层的层序地层划分及沉积体系分布进行了大量而深入的研究,取得了重要的研究成果^[1-9],但是对于红层储层成岩作用研究报道较少^[10]。随着沙河街组四段上亚段(简称沙四上亚段,Es₄^s,灰层)及以上地层中油气勘探程度的不断提高,位于深部的孔店组一段(简称孔一段,Ek₁)—沙河街组四段下亚段(简称沙四下亚段,Es₄^x)红层沉积越来越受到重视。2009年,博兴洼陷成功钻探的高94井在孔一段及沙四下亚段均获得高产工业油流,进一步揭示了其巨大的油气勘探潜力,成为东营凹陷南坡“十二五”期间(2011—2015年)较为重要的勘探接替阵地。笔者综合利用钻井岩心、铸体薄片、物性及黏土矿物资料,结合盆地理藏演化史

分析,研究孔一段—沙四下亚段储层成岩作用特征及成因机制,对于系统认识红层储层成岩作用及储层分布具有重要的意义。

1 地质背景

东营凹陷为渤海湾盆地济阳拗陷中的一个次级构造单元,是在古生界基岩古地形背景上发育起来的中生代、新生代箕状断陷—拗陷湖盆,盆地断陷初期发育的古近系孔一段—沙四下亚段沉积地层为一套“红砂红泥”或“灰砂红泥”砂、泥岩互层剖面,勘探中将其统称为“红层”(图1)。东营凹陷孔一段—沙四下亚段沉积时期气候干湿交替频繁,以干旱为主,湖泊呈现为高频振荡性盐湖特征^[8-9],碎屑岩沉积作用主要发育在缓坡带广阔地区,沉积砂体类型多样。

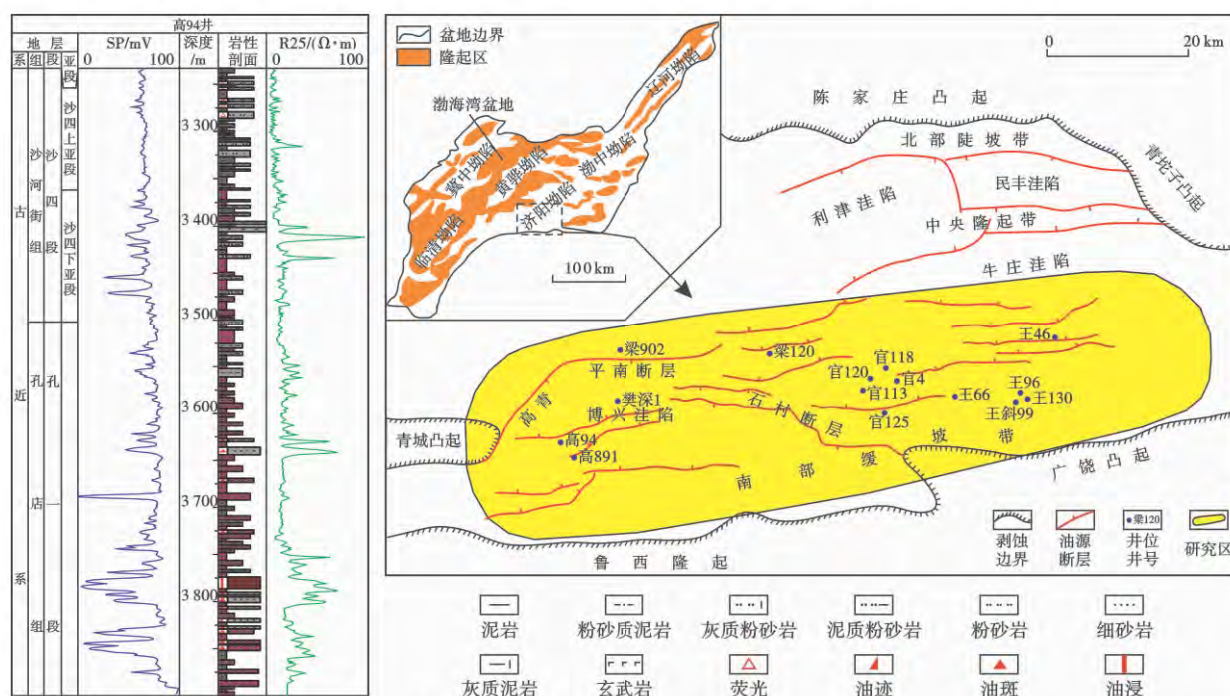


图1 东营凹陷构造位置、沙四下亚段顶部构造特征及孔一段—沙四上亚段岩性剖面

Fig. 1 Tectonic setting, structural characteristics of top Es₄^s and lithologic profile of Ek₁-Es₄^x of Dongying sag

2 储层成岩作用类型及特征

通过岩石薄片镜下观察分析表明,东营凹陷南坡古近系孔一段—沙四下亚段储层成岩作用主要包括压实作用、胶结作用、溶解作用和交代作用。

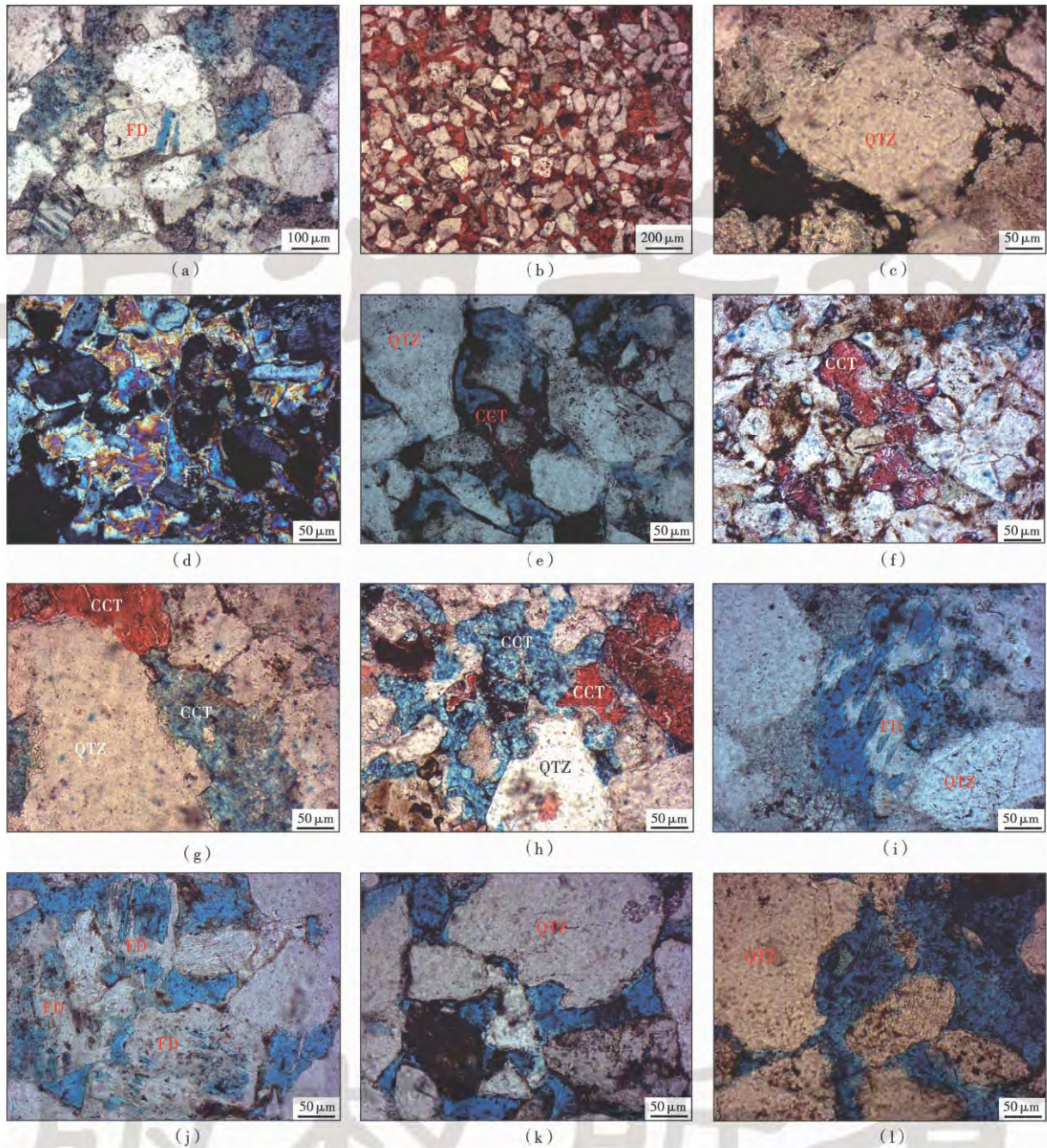
2.1 压实作用

由于孔一段—沙四下亚段储层埋藏深度范围跨度大,压实作用在不同深度范围内存在明显的差异,如王96井区储层埋深一般在1800~2300m,颗粒主要呈点接触或线接触;而樊深1井、高94井等井区的储层埋深一般大于3500m,岩石碎屑颗粒一般表现为线接触、凹

凸接触,甚至可见缝合接触。局部地区可见长石、石英等刚性颗粒在压实作用下发生破碎、断裂[图2(a)]。孔一段—沙四下亚段平均古地温梯度为4.95℃/hm,沙四上亚段平均古地温梯度为4.6℃/hm^[11],前者的热压实效应强于后者^[12]。影响砂岩压实作用的内因主要包括碎屑组分、粒度、分选、杂基含量、胶结物含量及地层压力等^[13],选取处于同一埋藏深度范围内的碎屑组类型及含量基本一致、分选系数为1~1.5、杂基含量小于10%、胶结物含量小于10%、地层压力为常压、溶蚀面孔率小于1.5%的粉砂岩和细砂岩进行对比分析。结果表明,随着埋藏深度的增加,孔一

段—沙四下亚段储层孔隙度降低速度明显快于沙四上亚段储层,并且两者的差值明显增大(图 3),热压

实效应使得孔一段—沙四下亚段储层的压实作用进一步增强。



(a)长石压实断裂(-),梁 902 井 2 532.45 m, Ek₁, 细砂岩; (b)基底式方解石胶结(-),王斜 99 井 2 093.04 m, Ek₁, 细砂岩; (c)自生石英胶结(-),樊深 1 井 3 584.2 m, Ek₁, 中砂岩; (d)基底式石膏、硬石膏胶结(+),官 4 井 2 749.7 m, Es₄^s, 粉砂岩; (e)碳酸盐胶结物溶解(-),王斜 99 井 1 940.23 m, Es₄^s, 粉砂岩; (f)铁方解石交代方解石(-),官 118 井 3 007.7 m, Es₄^s, 粉砂岩; (g)方解石交代石英颗粒、铁白云石交代方解石和石英加大边及石英颗粒(-),樊深 1 井 4 056.7 m, Ek₁, 中砂岩; (h)铁白云石交代方解石及石英颗粒(-),高 891 井 2 808.4 m, Es₄^s, 细砂岩; (i)长石溶解(-),梁 902 井 2 532.45 m, Ek₁, 细砂岩; (j)长石溶解(-),王 130 井 2 182.3 m, Ek₁, 细砂岩; (k)石英及其加大边溶解(-),官 113 井 2 494.49 m, Es₄^s, 细砂岩; (l)石英及其加大边溶解(-),王 96 井 2 155.09 m, Ek₁, 细砂岩。QTZ—石英; FD—长石; CCT—碳酸盐胶结物; 所有薄片均为铸体薄片。

图 2 东营凹陷古近系孔一段—沙四下亚段储层成岩作用类型

Fig. 2 Types of diagenesis of reservoirs of Ek₁-Es₄^s of Paleogene in Dongying sag

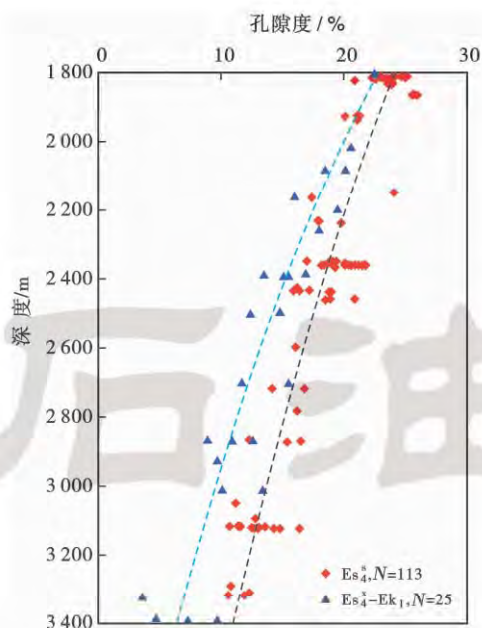


图3 东营凹陷孔一段一沙四下亚段(红层)砂体与沙四上亚段(灰层滩坝)砂体热压实差异

Fig. 3 Difference of sandstones thermal compaction between $Ek_1-Es_3^x$ (red beds) and Es_3^x (gray beds beach-bar) in Dongying sag

2.2 胶结作用

孔一段一沙四下亚段储层中胶结作用类型多样,主要包括碳酸盐胶结、硅质胶结、隐晶质赤铁矿胶结、石膏/硬石膏胶结等[图2(b—d)、图2(e—h)]。碳酸盐胶结是最主要的胶结物类型,含量一般为5%~34%,平均为11.2%。硅质胶结主要以石英自生加大形式出现,局部可见二次加大甚至三次加大。隐晶质赤铁矿

是导致孔一段一沙四下亚段储层呈现红色的主要原因,砂岩薄片常见隐晶质赤铁矿。石膏和硬石膏胶结物主要分布在官4、梁120等井区,集中分布在2500~3000m深度范围内,常以充填原生或次生孔隙的形式出现,沉积时期的干旱气候和盐湖环境是导致石膏和硬石膏胶结的主要因素。由此可见,孔一段一沙四下亚段储层中胶结作用复杂,同时发育碱性成岩环境和酸性成岩环境下的胶结物,具有多期性特征,且碱性成岩作用较强。

孔一段一沙四下亚段沉积呈典型的砂、泥岩互层特征,受互层泥岩成岩作用的影响,砂岩中胶结物具有明显的差异分布特征,进而控制了储层物性分布特征^[14-15]。砂岩中胶结物含量由砂体边缘向砂体中心呈现明显的降低特征,并且在砂体边缘约1m范围内,胶结物含量迅速降低,大于1m的范围内,胶结物含量呈缓慢降低且趋于稳定的特征[图4(a)]。受胶结物分布特征的影响,储层孔隙度呈现与之相反分布特征,即在砂体边缘约1m范围内孔隙度呈现快速增加的特征,大于1m的范围内,孔隙度缓慢增加且趋于稳定[图4(b)]。孔一段一沙四下亚段沉积时期气候干旱,湖水盐度达到40g/L,富含多种金属阳离子^[16],使得互层泥岩中吸附的原生沉积水盐度高,在后期压实成岩过程中,这些吸附水向邻近砂岩排放,在砂体边缘引起强烈胶结作用。较高的古地温梯度、湖水盐度和金属阳离子含量有利于泥岩中黏土矿物的转化^[17],1500~3500m范围内的泥岩中高岭石含量一般小于20%,绿泥石含量一般大于35%,伊利石含量最高可达40%以上,伊蒙混层含量一般小于40%,伊蒙混层比在2250m之上一般在40%~60%,而大于2250m迅速

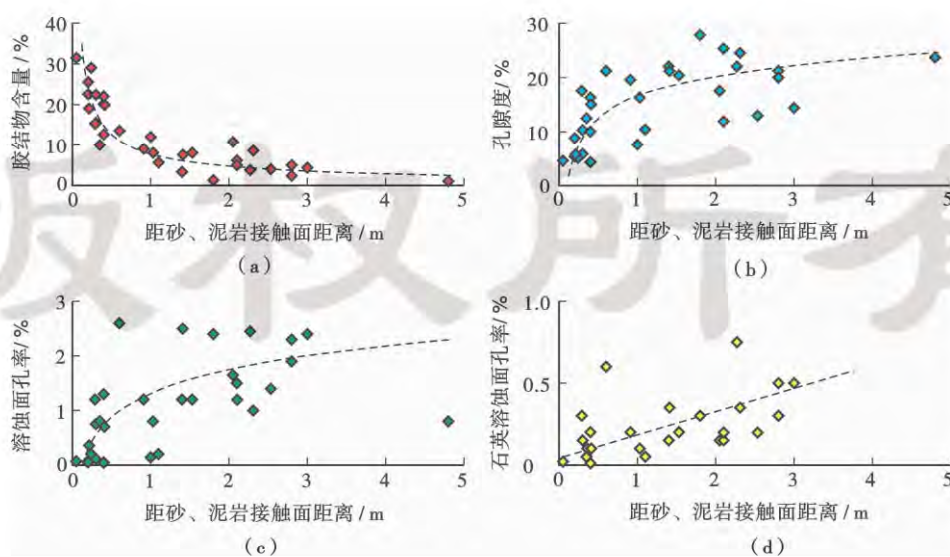


图4 东营凹陷孔一段一沙四下亚段储层胶结物含量、孔隙度及溶蚀面孔隙率与距砂、泥岩接触面距离的关系

Fig. 4 Relationship between content of cement, porosity and dissolution plane porosity of reservoirs of $Ek_1-Es_3^x$ and distance to interface of sandstone and mudstone in Dongying sag

降低为 20%左右(图 5)。泥岩中高岭石、蒙脱石向伊利石、绿泥石转化的深度浅、时间早,黏土矿物转化过程中释放出大量的 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Si^{4+} 等金属阳离子^[18],向邻近砂岩排放后进一步增强了砂体中的胶结作用。泥岩成岩演化流体向邻近砂岩排放过程中,由于胶结作用的发生,使得金属阳离子浓度迅速降低,从而使砂岩中的胶结作用减弱。砂体边缘一般发育基底式方解石胶结作用,储层孔隙度低,并且孔隙度由砂体边缘向砂体内部逐渐增大[图 6(a)],而在砂体中部胶结物含量较少,且多发育铁碳酸盐胶结物,储层孔隙度较高,较为稳定[图 6(b)]。在砂体尖灭带等厚度较小地区,受胶结作用的影响不发育孔隙度稳定带,甚至为致密胶结。

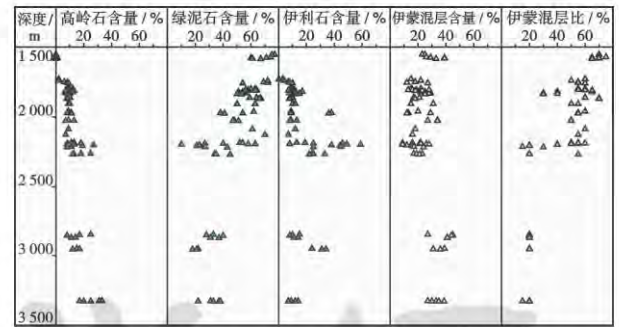


图 5 东营凹陷孔一段一沙四下亚段泥岩中黏土矿物含量及垂向分布特征

Fig. 5 Content and distribution of clay minerals in mudstones of $\text{Ek}_1\text{-Es}_3^x$ in Dongying sag

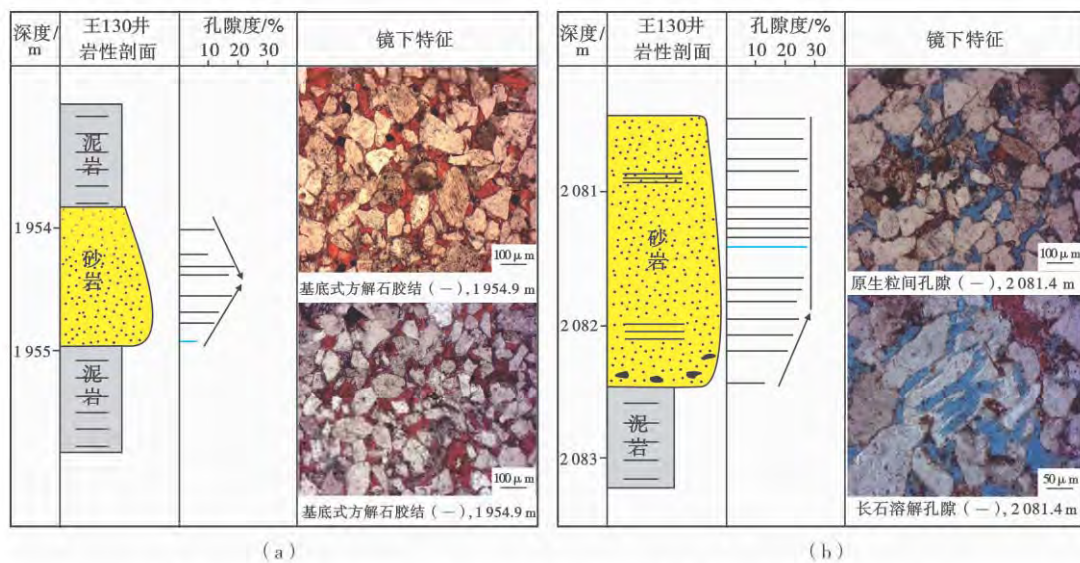


图 6 东营凹陷孔一段一沙四下亚段砂体不同位置储层成岩作用及孔隙度特征

Fig. 6 Characteristics of diagenesis and porosity in different positions of sandstones of $\text{Ek}_1\text{-Es}_3^x$ in Dongying sag

东营凹陷孔一段一沙四下亚段地层被顺向倾斜的油源断层和反向倾斜的遮挡性断层分成多个倾斜的断块,断块下部发育的油源断层能够有效地沟通地层流体,使流体进入储层对其进行改造^[19]。由于砂体边缘一般发育受泥岩成岩演化控制的基底式胶结作用,胶结物含量变化不大,不能有效反映断块不同位置胶结作用差异性,因此,选用砂体中部样品进行分析。砂体中部胶结物主要为铁方解石和铁白云石、少量方解石和白云石及自生石英,碳酸盐胶结物和自生石英含量均呈现为随着距油源断层距离增加而增加的特征(图 7),即断块上部胶结物含量明显高于断块下部,表现为明显的上升流作用特征^[20]。上升流作用使得富含金属阳离子的地层流体由断块下部运移至断块上部,受反向遮挡断层及砂体尖灭带的影响,金属阳离子在断块上部的砂体中富集,使得上部的胶结作用强于下部。

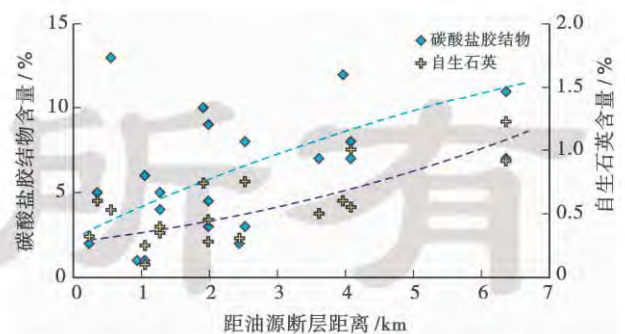


图 7 东营凹陷孔一段一沙四下亚段储层胶结物在断块内的分布特征

Fig. 7 Distribution of cements in reservoirs in fault blocks of $\text{Ek}_1\text{-Es}_3^x$ in Dongying sag

2.3 溶解作用

铸体薄片观察分析表明,储层中溶解作用较为发育,常见长石、石英及碳酸盐胶结物溶蚀孔隙,表现为

酸性和碱性溶解作用并存的特征[图 2(e)、图 2(i)–(l)]。长石溶蚀孔隙相对含量一般大于 50%，是最主要的溶蚀孔隙类型，碳酸盐胶结物溶蚀孔隙含量一般小于 20% (图 8)。有机酸提供 H^+ 的能力是碳酸的 6~350 倍，与碳酸相比，有机酸与硅铝酸盐反应的热驱动性能更强，有机酸阴离子易与 Al^{3+} 离子形成络合离

子的反应能够促进长石在有机酸中的溶解^[21]，长石与有机酸反应的吉布斯自由能明显低于长石与碳酸反应^[22-23]。储层中长石溶蚀孔隙含量是碳酸盐胶结物溶蚀孔隙含量的 2~14 倍，反映了有机酸溶蚀特征。石英溶蚀孔隙相对含量可达 40% (图 8)，为储层中重要的碱性成岩环境下形成的溶蚀孔隙^[24-25]。

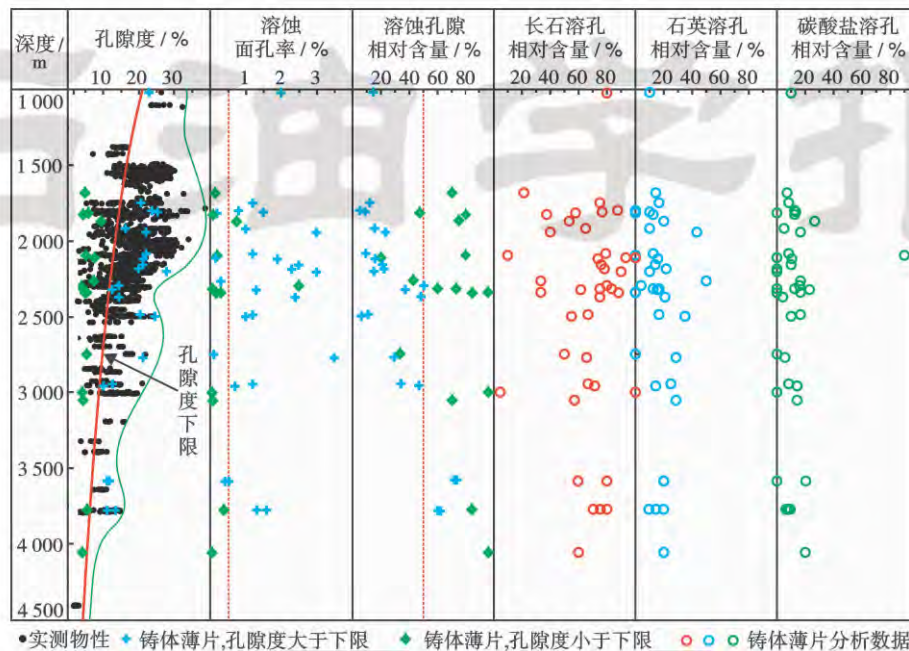


图 8 东营凹陷孔一段一沙四下亚段储层溶蚀孔隙含量及垂向分布特征

Fig. 8 Content and vertical distribution of dissolution pores of reservoirs of Ek_1 - Es_3^x in Dongying sag

通过有效储层物性下限计算，可将孔一段一沙四下亚段储层分为有效储层和非有效储层^[26]，溶蚀孔隙主要分布在有效储层中，其含量(面孔率)一般大于 0.5%，而非有效储层中溶蚀孔隙含量(面孔率)一般小于 0.5%，仅有少量样品含量大于 0.5% (图 8)。溶蚀孔隙高值带集中分布在 1750~3000 m 范围内，溶蚀面孔率最高可达 3.5% 左右。溶蚀孔隙相对含量随着深度的增加呈现出逐渐增大的趋势。非有效储层中溶蚀孔隙含量一般大于 50%，但储层孔隙度和溶蚀孔隙绝对含量却非常低，储层储集空间以次生孔隙为主，表明溶蚀作用发生前压实作用和胶结作用使得储层孔隙大量损失，后期溶蚀作用形成了微量的溶蚀孔隙。在 1000~3000 m 的深度范围内，有效储层中溶蚀孔隙相对含量均小于 50%，储层储集空间以原生孔隙为主，表明溶蚀作用发生前储层保存了大量的粒间孔隙，有利于后期流体进入储层对其进行改造，而深度大于 3500 m 的深部，有效储层溶蚀孔隙相对含量大于 50%，但溶蚀面孔率相对较低，储集空间以次生孔隙为主(图 8)，表明在溶蚀作用发生前，压实作用使得深部储层粒间孔隙大量减少，进入储层的地层流体量较少，形成了较少

的次生孔隙，但却构成了储层主要的储集空间。

在砂体边缘带溶蚀面孔率含量较低，且由边缘向中心迅速增加，而在砂体中部，溶蚀孔隙含量较高且趋于稳定[图 4(c)]。石英溶蚀面孔率与距砂、泥岩界面距离之间同样具有明显的正相关关系[图 4(d)]。储层溶蚀作用受胶结作用影响明显，即溶蚀作用大规模发生前，胶结作用使得砂体边缘储层孔隙度迅速降低，而厚砂体中部则保存了大量的原生粒间孔隙，后期地层流体进入储层后主要集中在砂体中部，难以进入或仅有少量流体进入砂体边缘，使得砂体中部溶蚀作用较强，形成了大量的溶蚀孔隙[图 6(b)]，而砂体边缘则仅发育少量溶蚀孔隙。

断块内长石+碳酸盐溶蚀面孔率和石英溶蚀面孔率均呈现随距油源断层距离增加而降低的特征(图 9)，同样反映了上升流作用特征。酸性和碱性地层流体通过断块下部的开启性断层首先进入断块下部储层对其进行溶蚀，随着地层流体逐渐向断块上部运移，地层流体的溶蚀能力逐渐降低，而溶蚀产物含量却逐渐增加，因此，断块下部储层的溶蚀作用强于上部储层，而胶结作用弱于上部。

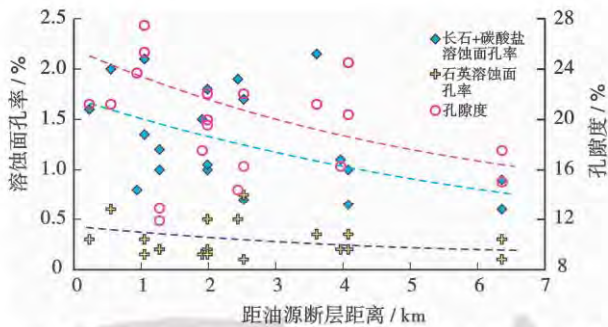


图 9 东营凹陷孔一段—沙四下亚段储层溶蚀面孔隙率及孔隙度在断块内的分布特征

Fig. 9 Distribution of dissolution plane porosity and porosity of reservoirs in fault blocks of Ek₁-Es₄ in Dongying sag

2.4 交代作用

储层中交代作用主要表现为:碳酸盐矿物对碎屑颗粒及其他胶结物的交代作用,如方解石、白云石交代石英、长石颗粒,铁方解石和铁白云石交代石英加大边及石英颗粒[图 2(g)–(h)];各碳酸盐矿物之间的交代作用,如铁方解石交代方解石、铁白云石交代白云石和方解石等[图 2(f)–(h)];石膏、硬石膏对碎屑颗粒及石英加大的交代等[图 2(d)]。交代作用反映了储层成岩自生矿物的形成次序,一般而言,被交代的矿物早于交代矿物的形成时间^[27]。

3 储层成岩演化

成岩作用是一定成岩环境下的产物,储层成岩环境的演化导致储层内发育的各种化学反应的平衡常数被改变,从而使新的成岩作用发生,受水-岩作用及沉积盆地中各种成岩演化流体的影响,同一地区在盆地演化的不同阶段常常具有不同的成岩环境^[25,27],成岩环境的演化控制了储层成岩作用序列。在储层成岩作用分析的基础上,结合东营凹陷埋藏演化史分析^[28-29]表明,孔一段—沙四下亚段储层经历了早期碱性成岩环境及酸性成岩环境、晚期碱性成岩环境及酸性成岩环境的演化特征。

原生沉积水是指沉积物沉积时期包含在沉积物颗粒之间的地层流体,其性质直接影响着碎屑岩孔隙水介质的演化特征和成岩作用的进行^[30],是早期成岩环境的主要控制因素^[31]。东营凹陷孔一段—沙四下亚段沉积时期,气候干旱,陆地剥蚀作用强烈,水体环境较为封闭,呈高盐度碱性特征^[16],使得互层泥岩中高岭石向伊利石和绿泥石快速转化、蒙脱石向伊利石快速转化。原生沉积水和黏土矿物转化水控制了 31.4 Ma 之前早期碱性成岩环境的形成。砂体边缘发育的基底式方解石和石膏强烈胶结使储层孔隙度迅速降低,形成致密胶结带,而砂体中部胶结作用弱,仅发育少量的方

解石胶结物,保存了大量的原生粒间孔隙。碱性条件为储层中早期石英溶解提供了条件,但由于储层埋藏深度较浅,地层温度较低,石英溶蚀量相对较小^[32],在一定程度上增加了储层孔隙度(图 10)。因此,储层中早期碳酸盐和石膏胶结主要发育在砂体边缘,且与石英早期溶蚀作用同时发生。

油源对比表明,东营凹陷孔一段—沙四下亚段储层中的油气主要来自沙四上亚段烃源岩^[19],即沙四上亚段烃源岩埋藏演化过程中释放的有机酸对储层成岩作用具有明显的影响。地层中有机酸的最佳形成和保存温度为 80~120℃^[22]。通过对东营凹陷沙四上亚段烃源岩埋藏演化史分析表明^[29],在距今 31.3~26.4 Ma,黏土矿物转化脱水逐渐停止,烃源岩处于成熟阶段早期,释放出大量的有机酸,使得储层流体由碱性转为酸性,形成酸性成岩环境。由于早期砂体边缘致密胶结,酸性流体主要集中在砂体中部原生粒间孔隙发育带,形成了大量的酸性溶蚀孔隙,使储层孔隙度明显增加(图 10)。与此同时,溶蚀作用产生的大量 SiO₂ 等溶蚀产物在储层中聚集、沉淀,形成自生石英等胶结物。因此,储层中长石、碳酸盐胶结物溶解作用与自生石英胶结作用同时发生,且晚于早期碳酸盐胶结作用。薄片常见方解石及白云石胶结物交代石英颗粒而少见交代石英加大边,也反映了自生石英形成晚于早期碳酸盐胶结作用。

随着埋藏深度的进一步增加,在距今 26.4~21.4 Ma,烃源岩处于成熟阶段晚期,地层温度超过了有机酸大量生成和最佳保存温度,有机酸开始大量分解,使得地层流体 pH 值升高,而发育于盆地洼陷带的膏盐岩层逐渐进入热演化大量脱水的温度范围内,开始大量脱出富含 Ca²⁺、K⁺、Na⁺、Sr²⁺、Al³⁺ 等金属阳离子的碱性水^[28,33],使得地层流体由酸性转为强碱性,形成了晚期碱性成岩环境。受早期成岩作用的影响,碱性流体同样对砂体中部储层中石英及其加大边进行了大量溶解,形成了含量较高的石英溶解型孔隙,使得储层孔隙度明显增加(图 10)。同时,碱性流体中的金属阳离子在储层中聚集、沉淀,形成了晚期碳酸盐、硫酸盐胶结物。薄片广泛发育的铁碳酸盐交代不含铁碳酸盐及石英加大边现象,也说明了铁碳酸盐胶结作用晚于石英加大形成[图 2(g)–(h)]。

距今 21.4~4 Ma 时期,由于东营凹陷整体处于构造抬升—再沉降的状态,使得地层温度降低,膏盐岩停止脱水,烃源岩重新进入生成有机酸的温度范围内,但生成的有机酸量较少,使得储层由强碱性逐渐转变为弱酸性,在储层中形成了少量晚期长石、碳酸盐胶结物溶蚀孔隙,使储层孔隙度稍微增加,基本形成了现今储层孔隙度及成岩作用分布特征(图 10)。因此,孔一段

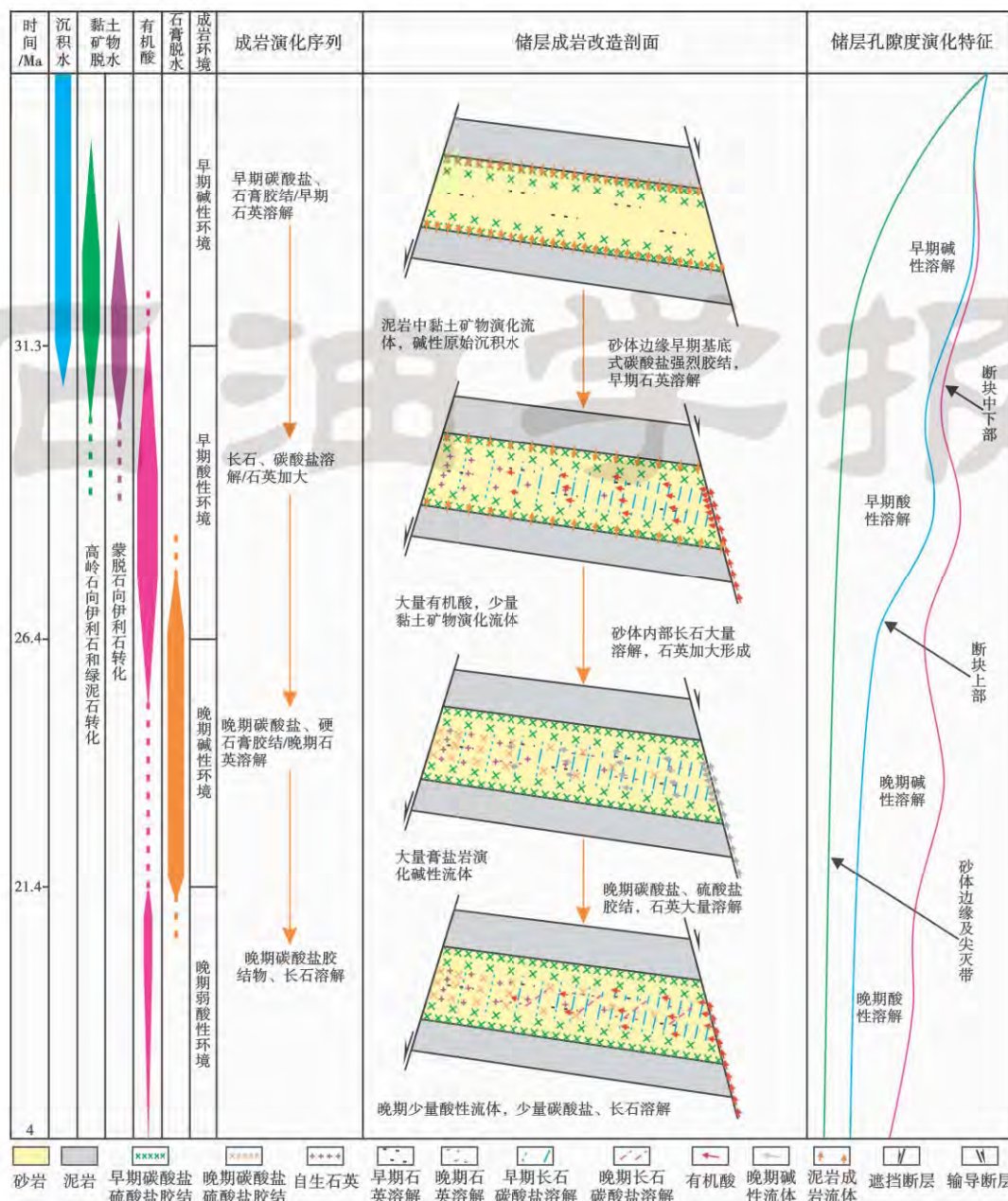


图 10 东营凹陷孔一段一沙四下亚段储层成岩演化序列及形成机制

Fig. 10 Diagenetic sequence and formation mechanism of reservoirs of Ek₁-Es₄ in Dongying sag

一沙四下亚段储层经历了多重碱性和酸性成岩环境的改造,形成了早期碳酸盐及石膏胶结、早期石英溶解→长石及碳酸盐胶结物溶解、自生石英胶结→晚期碳酸盐及硬石膏胶结、晚期石英溶解→晚期少量碳酸盐胶结物、长石溶解的成岩演化序列(图 10),压实作用贯穿于整个成岩演化过程中。

4 储层形成机制

储层成岩作用特征及成岩演化分析表明,多重碱性及酸性成岩环境交替演化和上升流作用机制是孔一段一沙四下亚段储层形成发育的主控因素。

多重碱性及酸性成岩环境交替演化控制了储层成

岩作用及储集空间分布格局。早期碱性成岩环境下发育的成岩作用特征控制了后期酸性和碱性地层流体在储层中的分布规律,为现今砂、泥岩剖面中储层成岩作用和储集空间分布特征奠定了基础。多重碱性及酸性成岩环境交替演化使得储层成岩作用既存在明显分异又呈现多期碱性及酸性成岩作用叠加特征。砂体边缘及尖灭带成岩作用类型单一,主要为早期碱性环境作用的产物,与之相比,厚层砂体中部则呈现为多期叠加的碱性溶蚀及胶结作用和酸性溶蚀及胶结作用。因此,受多重碱性及酸性成岩环境交替演化的影响,储层储集空间主要集中分布在厚层砂体中部,具有原生粒间孔隙、酸性溶蚀孔隙和碱性溶蚀孔隙并存的特征(图 10)。

上升流作用机制促进了断块内厚层砂体中部储层储集物性分异。有机酸和晚期碱性流体通过断块下部的油源断层进入储层后首先对断块下部储层进行溶蚀,形成酸性及碱性溶蚀孔隙,地层流体在由断块下部向断块上部运移的过程中溶蚀能力逐渐减弱,形成的溶蚀孔隙量逐渐降低;同时断块下部溶蚀作用形成的大量溶蚀产物及金属阳离子被上升流携带至断块上部,受封闭性断层及砂体尖灭带的影响,溶蚀产物和金属阳离子在断块上部储层中聚集、沉淀,形成自生石英、晚期碳酸盐及硫酸盐等胶结物充填原生和次生孔隙,使得断块上部储层物性进一步降低。因此,断块中下部储层中溶蚀孔隙含量及孔隙度均明显高于断块上部储层(图9和图10)。

5 结 论

(1) 东营凹陷孔一段一沙四下亚段储层具有多重碱性和酸性成岩作用特征。压实作用中等偏强,热压实效应明显。胶结物主要发育有碱性环境下形成的碳酸盐、铁碳酸盐、石膏及硬石膏和酸性环境下形成的自生石英等,胶结作用在砂体边缘强,而砂体内部较弱,在断块下部较弱,而断块上部较强。溶解作用主要为碱性环境下形成的石英溶解和酸性环境下形成的长石、碳酸盐胶结物溶解,溶蚀孔隙含量由砂体边缘向砂体内部逐渐增加,由断块下部向断块上部逐渐降低。交代作用主要为碳酸盐、硫酸盐胶结物交代石英、长石颗粒及石英加大和铁碳酸盐交代碳酸盐。

(2) 东营凹陷孔一段一沙四下亚段储层经历了早期碱性成岩环境及酸性成岩环境、晚期碱性成岩环境及弱酸性成岩环境作用过程,形成了早期碳酸盐及石膏胶结、早期石英溶解→长石及碳酸盐胶结物溶解、自生石英胶结→晚期碳酸盐及硬石膏胶结、晚期石英溶解→晚期少量碳酸盐胶结物、长石溶解的成岩演化序列及相应的储层孔隙度演化特征。

(3) 多重碱性及酸性成岩环境交替演化控制了储层成岩作用及储集空间分布格局,而上升流作用机制促进了断块内厚层砂体中部储层储集物性分异。

参 考 文 献

- [1] 彭华,吴志才.关于红层特点及分布规律的初步探讨[J].中山大学学报:自然科学版,2003,42(5):109-113.
Peng Hua, Wu Zhicai. A preliminary study on the characteristics and the distribution of red beds[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(5): 109-113.
- [2] 凌秋贤,张显球.广东河源盆地红层的初步研究[J].地质学杂志,2002,26(4):264-271.
Ling Qiuxian, Zhang Xianqiu. Preliminary study of the red beds in the Heyuan Basin of Guangdong[J]. Journal of Stratigraphy, 2002, 26(4): 264-271.
- [3] 朱光有.河南西峡盆地红层划分及沉积相研究[J].石油大学学报:自然科学版,1997,21(6):110-113.
Zhu Guangyou. Stratigraphy and sedimentary facies of red beds in Xixia Basin of Henan province[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science 1997, 21(6): 110-113.
- [4] 韦启新,苑小燕.我国东部油田红层沉积特征与油气成藏规律[J].石油学报,2008,29(2):191-194.
Wei Qixin, Yuan Xiaoyan. Sediment features and oil-gas pool forming regularity of red beds in the eastern China oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 191-194.
- [5] Watker T R. Formation of red beds in morden and ancient deserts [J]. Geological Society of America Bulletin, 1967, 78: 353-368
- [6] 王建伟,赵男生,田海芹.东营-惠民凹陷孔店组层序地层学研究[J].石油大学学报:自然科学版,2001,25(6):1-5.
Wang Jianwei, Zhao Yongsheng, Tian Haiqin. Primary study on sequence stratigraphy of Kongdian Formation in Dongying Huimin sag[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 2001, 25(6): 1-5.
- [7] 袁静.济阳拗陷南部古近系洪水-漫湖沉积[J].中国地质,2005,32(4):131-138.
Yuan Jing. Paleogene flooded lake sediments in the southern part of the Jiyang Depression[J]. Geology in China, 2005, 32(4): 131-138.
- [8] 操应长,王健,高永进,等.济阳拗陷东营凹陷古近系红层-膏盐层沉积特征及模式[J].古地理学报,2011,13(4):375-386.
Cao Yingchang, Wang Jian, Gao Yongjin, et al. Sedimentary characteristics and model of red beds-gypsum salt beds of the Paleogene in Dongying sag, Jiyang Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(4): 375-386.
- [9] 王健,操应长,刘惠民,等.东营凹陷沙四下亚段沉积环境特征及沉积充填模式[J].沉积学报,2012,30(2):274-282.
Wang Jian, Cao Yingchang, Liu Huimin, et al. Characteristics of sedimentary environment and filling model of the lower submember of the fourth member of Shahejie Formation of Dongying Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(2): 274-282.
- [10] 焦养泉,吴立群,陆永潮,等.准噶尔盆地腹部侏罗系顶部红层成岩作用过程中蕴藏的车莫古隆起演化信息[J].地球科学——中国地质大学学报,2008,33(2):219-226.
Jiao Yangquan, Wu Liqun, Lu Yongchao, et al. Evolution of the Chepaizi-Mosuowan Paleo-Uplift, Junggar Basin, China: evidence from diagenesis of late Jurassic red beds[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(2): 219-226.
- [11] 邱楠生,李善鹏,曾贇辉.渤海湾盆地济阳拗陷热历史及构造-热演化特征[J].地质学报,2004,78(2):263-269.
Qiu Nansheng, Li Shanpeng, Zeng Jianhui. Thermal history and tectonic-thermal evolution of the Jiyang Depression in the Bohai Bay Basin, East China[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 263-269.
- [12] 寿建峰,朱国华.砂岩储层孔隙保存的定量预测研究[J].地质科学,1998,33(2):118-124.
Shou Jianfeng, Zhu Guohua. Study on quantitative prediction preservation of porosity in sandstone reservoirs [J]. Chinese Journal of Geology, 1998, 33(2): 118-124.
- [13] 金振奎,苏奎,苏妮娜.准噶尔盆地腹部侏罗系深部优质储层成因[J].石油学报,2011,32(1):25-30.
Jin Zhenkui, Su Kui, Su Nina. Origin of Jurassic deep burial high-

- quality reservoirs in the central Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1): 25-30.
- [14] 钟大康, 朱筱敏, 张琴. 不同埋深条件下砂泥岩互层中砂岩储层物性变化规律[J]. *地质学报*, 2004, 78(6): 863-871.
Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhang Qin. Variation characteristics of sandstone reservoirs when sandstone and mudstone are interbedded at different buried depths[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(6): 863-871.
- [15] 孙海涛, 钟大康, 刘洛夫, 等. 沾化凹陷沙河街组砂岩透镜体表面与内部碳酸盐胶结作用的差异及其成因[J]. *石油学报*, 2010, 31(2): 246-252.
Sun Haitao, Zhong Dakang, Liu Luofu, et al. Carbonate cementation difference and its origin between exterior and interior surfaces of lenticular sandbody in Shahejie Formation of Zhanhua Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(2): 246-252.
- [16] 钱凯, 王素民, 刘淑范, 等. 东营凹陷早第三纪湖水盐度的计算[J]. *石油学报*, 1982, 3(4): 95-102.
Qian Kai, Wang Sumin, Liu Shufan, et al. Calculation of salinity of lake at the stage of Paleogene in Dongying Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1982, 3(4): 95-102.
- [17] 赵杏媛, 陈洪起. 我国含油盆地黏土矿物分布特征及控制因素[J]. *石油学报*, 1988, 9(3): 28-36.
Zhao Xingyuan, Chen Hongqi. Characteristics of the distribution of clay minerals in oil-bearing basin in China and their controlling factors[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1988, 9(3): 28-36.
- [18] 隋风贵, 刘庆, 张林晔. 济阳断陷盆地烃源岩成岩演化及其排烃意义[J]. *石油学报*, 2007, 28(6): 12-16.
Sui Fenggui, Liu Qing, Zhang Linye. Diagenetic evolution of source rocks and its significance to hydrocarbon expulsion in Shahejie Formation of Jiyang Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(6): 12-16.
- [19] 姜振学, 刘洛夫, 于永利, 等. 东营凹陷南坡红层油气藏特征及主控因素研究[R]. 北京: 中国石油大学, 2010.
Jiang Zhenxue, Liu Luofu, Yu Yongli, et al. Characteristics and controlling factors of red beds reservoirs of southern slope in Dongying Depression[R]. Beijing: China University of Petroleum, 2010.
- [20] 金振奎, 陈祥, 明海慧, 等. 泌阳凹陷安棚油田深层系成岩作用研究及其在成岩圈闭预测中的应用[J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 614-620.
Jin Zhenkui, Chen Xiang, Ming Haihui, et al. Study on diagenesis of deeply-buried strata in Anpeng oilfield of Biyang Sag and its application to prediction of diagenetic traps[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 614-620.
- [21] Crossley L J, Frost B R, Surdam R C. Secondary porosity in laumontite-bearing sandstones: Part 2. Aspects of porosity modification[J]. *AAPG Memoir*, 1984, 37: 225-237.
- [22] Surdam R C, Crossley L J, Hagen E S. Organic-inorganic and sandstone diagenesis[J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(1): 1-23.
- [23] 曾澍辉. 东营凹陷第三系水-盐作用对储层孔隙发育的影响[J]. *石油学报*, 2001, 22(4): 39-43.
Zeng Jianhui. Effect of fluid-rock interaction on porosity of reservoir rocks in Tertiary system, Dongying Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(4): 39-43.
- [24] 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 Biyang Depression[J]. *Science in China(Series D)*, 2002, 45(7): 643-653.
- [25] 周瑞琪, 周振柱, 陈勇, 等. 东营凹陷丰地区深部储层成岩环境变化研究[J]. *地学前缘*, 2011, 18(2): 268-276.
Zhou Yaoqi, Zhou Zhenzhu, Chen Yong, et al. Research on diagenetic environmental changes of deep reservoir in Minfeng Area, Dongying Sag[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(2): 268-276.
- [26] 王健, 操应长, 高永进, 等. 东营凹陷古近系红层砂体有效储层的物性下限及控制因素[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(4): 27-33.
Wang Jian, Cao Yingchang, Gao Yongjin, et al. Petrophysical parameter cutoff and controlling factors of the effective reservoir of red beds sandbodies of Paleogene in Dongying Depression[J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2011, 35(4): 27-33.
- [27] 张善文, 袁静, 隋风贵, 等. 东营凹陷北部沙河街组四段深部储层多重成岩环境及演化模式[J]. *地质科学*, 2008, 43(3): 576-587.
Zhang Shanwen, Yuan Jing, Sui Fenggui, et al. Multiple diagenetic environments and evolution model in deep formation of the 4th Member, Shahejie Formation in the northern Dongying Sag[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2008, 43(3): 576-587.
- [28] 王艳忠. 东营凹陷北带古近系次生孔隙发育带成因机制及演化模式[D]. 青岛: 中国石油大学, 2010, 81-87.
Wang Yanzhong. Genetic mechanism and evolution model of secondary pores development zone of Paleogene in the North Zone in Dongying Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010, 81-87.
- [29] 操应长, 王健, 周磊, 等. 东营凹陷南坡沙四下-孔一段沉积储层特征[R]. 青岛: 中国石油大学, 2011.
Cao Yingchang, Wang Jian, Zhou Lei, et al. Sedimentary and reservoir characteristics of Ek₁-Es₄^{*} of southern slope in Dongying Depression[R]. Qingdao: China University of Petroleum, 2011.
- [30] 包书景, 何生. 泌阳凹陷地质流体对砂岩储集层中黏土矿物形成和分布的控制作用[J]. *地质科技情报*, 2005, 24(2): 51-56.
Bao Shujing, He Sheng. Geofluids control of the formation and distribution of clay minerals within the sandstone reservoir in Biyang Depression[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2005, 24(2): 51-56.
- [31] 鲜本忠, 吴战国, 姜在兴, 等. 早期成岩作用研究进展及发展方向[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2004, 28(6): 133-139.
Xian Benzong, Wu Zhanguo, Jiang Zaixing, et al. Research evolution and development direction in the early diagenesis[J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 2004, 28(6): 133-139.
- [32] 钟大康, 朱筱敏, 周新源, 等. 初论塔里木盆地砂岩储层中 SiO₂ 的溶蚀类型及其机理[J]. *地质科学*, 2007, 42(2): 403-414.
Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhou Xinyuan, et al. An approach to categories and mechanisms of SiO₂ dissolution in sandstone reservoirs in the Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42(2): 403-414.
- [33] Jowett E C, Cathles L M, Davis B W. Forecast of depth of releasing water of gypsum in vaporizing salt basin[J]. *Foreign Oil & Gas Exploration*, 1994, 6(4): 391-401.