

东营凹陷古近系红层储层成岩作用及成岩相

王健¹, 操应长¹, 高永进², 贾光华²

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中石化胜利油田地质科学研究院, 山东东营 257015)

摘要:综合利用钻井岩心、铸体薄片及物性资料对东营凹陷古近系孔一段—沙四下亚段红层储层成岩作用特征、成岩相及其对成岩圈闭的影响进行研究。结果表明:红层储层压实作用中等偏强;胶结物主要有碳酸盐、铁碳酸盐、石膏及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,在断块下部较弱,断块上部较强;早期胶结作用抑制了压实作用的进行;溶蚀作用由砂体边缘向内部逐渐增强,由断块下部向上部逐渐减弱,主要是长石、碳酸盐胶结物及石英溶解。红层储层中发育压实成岩相、碳酸盐致密胶结成岩相、硫酸盐致密胶结成岩相、中等压实-溶蚀成岩相和强压实-溶蚀成岩相5种类型;不同成岩相储层物性及有效储层含量具有明显的差异,其空间配置关系控制了红层中成岩圈闭的发育。

关键词:成岩作用;成岩相;成岩圈闭;红层;东营凹陷;储层

中图分类号:TE 122.2 **文献标志码:**A

Diagenesis and diagenetic facies of red beds reservoirs of Paleogene in Dongying depression

WANG Jian¹, CAO Ying-chang¹, GAO Yong-jin², JIA Guang-hua²

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

2. Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257015, China)

Abstract: Based on the data of drilling cores, casting thin sections and physical properties, the characteristics of diagenesis, diagenetic facies and its influences on diagenetic traps of red beds reservoirs of the first member of Kongdian formation (E_{k_1}) and the lower fourth member of Shahejie formation ($E_{s_4}^x$) of Paleogene in Dongying depression were studied. The results show that compaction is moderate to strong, and cements are mainly carbonate, ferro-carbonate, gypsum, anhydrite and authigenic quartz. Dissolution mainly occurs as dissolving of feldspar, quartz and carbonate cement. Cementation is strong at the boundary belt and pinchout belt of sandstones and is weak at the middle part of sandstones. Strength of cementation in middle part of sandstones increases gradually from the lower part to the upper part of fault block. The early cementation restrained the compaction. Strength of dissolution increases gradually with the increasing of distance to interface of mudstone and sandstone and decreases gradually from the lower part to the upper part of fault block. Five types of diagenetic facies occur mainly: compaction diagenetic facies, dense carbonate cementation diagenetic facies, dense sulfate cementation diagenetic facies, medium compaction-dissolution diagenetic facies and strong compaction-dissolution diagenetic facies. The reservoir physical properties and effective reservoirs content of different diagenetic facies are obviously different. The space allocation of diagenetic facies controls the development of diagenetic traps in red beds.

Key words: diagenesis; diagenetic facies; diagenetic traps; red beds; Dongying depression; reservoir

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、新生代箕状断陷-拗陷湖盆,中生代后期至古近

纪,凹陷北部的陈南断裂活动强烈,落差大;南部断层活动较弱,落差小,形成北陡南缓的箕状断陷湖盆。盆地断陷初期发育的古近系孔一段和沙四下亚段沉

积地层为一套“双红”或者是“单红”砂泥岩互层剖面,勘探中将其统称为“红层”。东营凹陷孔一段一沙四下沉积时期气候干湿交替频繁,以干旱为主^[1-2],沉积砂体类型多样,主要为冲积扇、浅水型三角洲及滨湖滩坝等,由于气候相对干旱,蒸发作用强烈,在盆地的洼陷带发育了厚度巨大的膏盐岩沉积^[3-4]。随着沙四上亚段及以上地层中油气勘探程度的不断提高,位于深部的红层沉积越来越受到重视,近年来勘探表明,多条断裂沟通了沙四段和深部油源,形成了多个有利于油气聚集的构造带。目前对于东营凹陷红层的研究主要集中在沉积特征方面,对于储层特征尤其是成岩作用特征研究较少,而成岩作用是制约储层质量的关键因素。因此,笔者依据钻井岩心、铸体薄片及物性资料,对红层储层成岩作用、成岩相及其对成岩圈闭形成的控制作用进行研究。

1 红层储层成岩作用类型及特征

1.1 压实作用

由于红层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,如丁家屋子油田红层储层埋深一般在1.8~2.3 km,颗粒一般呈点接触或线接触;博兴洼陷樊深1井、高94井等井区的红层储层埋深一般大于3.5 km,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。整体而言,红层储层的压实作用中等偏强,常见特征主要有:①塑性颗粒如泥岩岩屑、云母等在压实作用下发生塑性变形(图1(a));②长石、石英等刚性颗粒在压实作用下发生破碎、断裂,特别在构造应力作用下,颗粒中发育多条不规则裂缝,裂缝一般切过颗粒(图1(b)、(c));③颗粒支撑的砂岩中颗粒多呈线接触、凹凸接触(图1(d))。红层储层视压实率一般小于60%,随深度增加无明显增加的趋势,在深度大于3.5 km的部分储层中大于60%(图2),视压实率由砂体边缘向砂体中部逐渐增加(图3(a))。

1.2 胶结作用

红层储层中胶结作用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。碳酸盐胶结物是红层储层中最主要的胶结物类型,含量一般为5%~34%,平均为11.2%,受有机质裂解形成的CO₂及蒙脱石向伊利石转化释放Fe³⁺的影响^[5],深部储层中碳酸盐胶结物以铁方解石和铁白云石为主,方解石和白云石含量随着深度增加呈现减少的趋势。硅质胶结主要以石英的自生加大形式出现,红层储层中石英胶结作用较为发育,局部可

见二次加大甚至三次加大。隐晶质赤铁矿是导致红色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2.5~3.0 km,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背景以及成岩过程中膏岩层脱水是导致石膏和硬石膏胶结的主要因素。

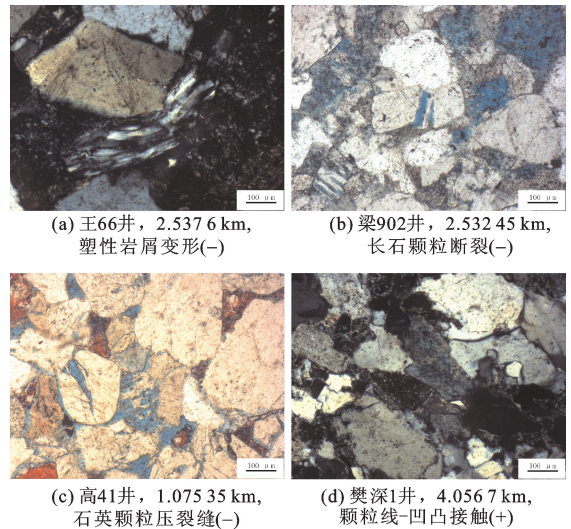


图1 红层储层压实作用表现形式

Fig. 1 Photos show compaction of red beds reservoirs

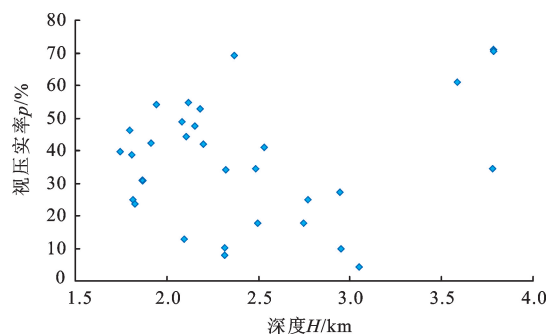


图2 红层储层视压实率与深度的关系

Fig. 2 Relationship between apparent compacting rate and depth of red beds reservoirs

由于气候干旱,红层沉积时期湖水呈碱性特征,含有大量的金属阳离子,盐度较高^[6],使得砂泥岩互层剖面泥岩中黏土矿物快速转化^[7],释放出大量的Ca²⁺、Na⁺、Fe²⁺、Mg²⁺、Si⁴⁺等金属阳离子^[8],随着地层流体向邻近砂岩排放,在砂体边缘形成了早期基底式碳酸盐和硫酸盐胶结作用,金属阳离子浓度迅速降低,而使储层胶结作用由砂体边缘向砂体中部逐渐减弱。胶结物含量和视胶结率均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,胶结物含量和视胶结率迅速降低,大于1m的范围内,胶结物含量和视胶结率呈缓慢降

低且趋于稳定的特征(图3(b))。由此可见,视胶结率和视压实率呈反比特征,即早期基底式胶结作用减缓了压实作用的进行,使视压实率随深度无明显变化关系,而与距离砂泥岩界面距离呈正比关系。受胶结物分布特征的影响,储层孔隙度呈现与之相反的分布特征(图3(c))。如果砂体厚度较小,如砂体尖灭带,受胶结作用的影响不发育孔隙度稳定带,甚至致密胶结。

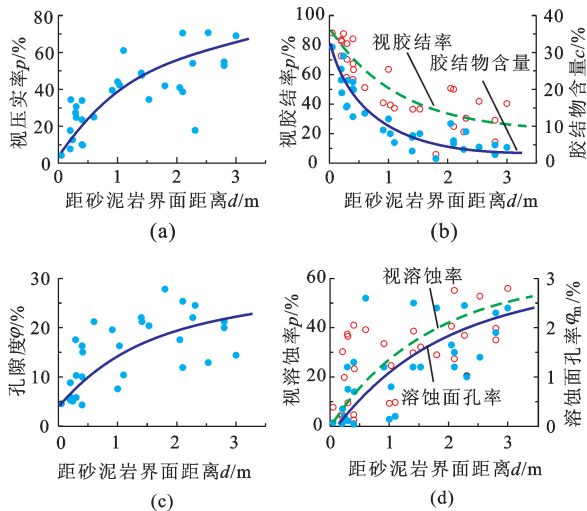


图3 红层储层中成岩和储集参数
与距砂泥岩接触面距离的关系

Fig. 3 Relationship between diagenetic and reservoir parameters of red beds reservoirs and distance to interface of sandstone and mudstone

东营凹陷孔一段—沙四下亚段红层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,使其进入储层对其进行改造^①。由于砂体边缘一般发育基底式胶结作用,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,胶结物含量和视胶结率均呈现随着距油源断层距离增加而增加的特征(图4(a))。红层砂体主要发育在东营凹陷缓坡带,顺向断层使得砂体与洼陷内部的沙四上烃源岩对接,烃源岩埋藏过程中发育的超压使地层流体由洼陷深部向盆地边缘流动,呈上升流特征,由断块下部运移至断块上部^[9],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,使上部胶结作用强于下部。

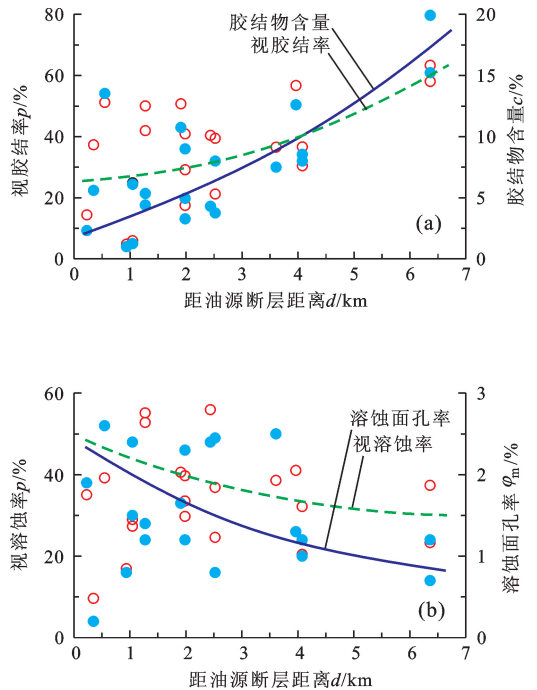


图4 红层储层视胶结率、胶结物含量、视溶蚀率及溶蚀面孔率在断块内的分布特征

Fig. 4 Distribution of apparent cementing rate, content of cements, apparent dissolving rate and dissolution plane porosity of red beds reservoirs in fault blocks

1.3 溶解作用

东营凹陷红层储层中溶解作用较为发育,常见长石、碳酸盐胶结物及石英溶蚀孔隙。油源对比表明,东营凹陷红层储层中油气主要来自沙四上烃源岩^①,表明沙四上烃源岩热演化释放的有机酸控制了红层储层中酸性溶蚀作用的发生,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%,相对较低;红层沉积时期气候干旱,地层水呈碱性特征^[6],且随埋藏深度增加,洼陷带发育的膏盐岩热演化释放出大量的碱性流体,进入储层后使成岩环境变为强碱性^[10],在此条件下形成的石英溶蚀孔隙相对含量可达40%,为红层储层中重要的溶蚀孔隙类型。通过有效储层物性下限计算可将红层储层分为有效储层和非有效储层^[11],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%(图5)。溶蚀孔隙高值带集中分布在1.75~3.0 km,溶蚀面孔率最高值约为3.5%。整体而言,溶蚀孔隙相对含量和视溶蚀率随着深度的增加呈逐渐增大的趋势。非有效储层中溶蚀孔隙相对含量一般大

① 姜振学,刘洛夫,于永利,等. 东营凹陷南坡红层油藏特征及主控因素研究. 中国石油大学(北京),2010.

于50%,视溶蚀率一般小于15%,储层孔隙度和溶蚀孔隙绝对含量低,储集空间以溶蚀孔隙为主,表明溶蚀作用发生前压实作用和胶结作用使储层孔隙大量损失,后期溶蚀作用形成了微量的溶蚀孔隙。深度在1.0~3.0 km,有效储层中溶蚀孔隙含量均小于50%,视溶蚀率一般为15%~50%,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3.0 km的深部有效储层溶蚀孔隙相对含量大于50%,部分视溶蚀率大于50%,储集空间以溶蚀孔隙为主(图5),表明在溶蚀作用发生前压实作用使深部储层粒间孔隙大量减少,进入储层的地层流体量较少,形成了较少的溶蚀孔隙,却构成了储层主要的储集空间。

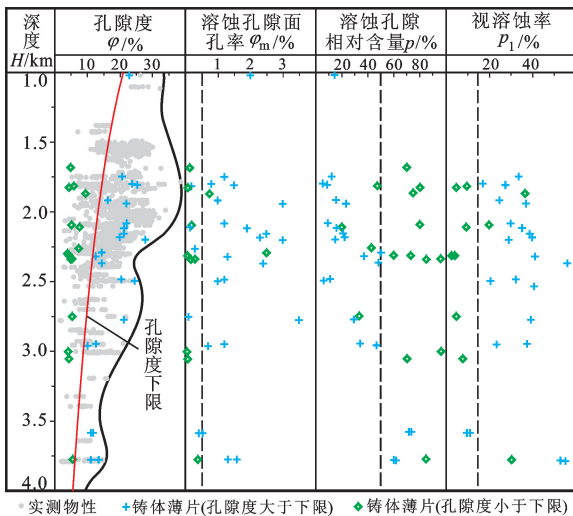


图5 东营凹陷红层储层溶蚀作用垂向分布特征

Fig. 5 Vertical distribution of dissolution of red beds reservoirs in Dongying depression

砂泥岩互层中溶蚀面孔率与视溶蚀率由砂体边缘向中心明显增加(图3(d)),表明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分布在砂体中部,形成了大量的溶蚀孔隙,而砂体边缘则仅发育少量溶蚀孔隙。断块内溶蚀面孔率和视溶蚀率均呈现出随距油源断层距离增加而降低的特征(图4(b))。地层流体通过油源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,其溶蚀能力逐渐降低,溶蚀产物含量逐渐增加,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。

2 红层储层成岩相类型及特征

成岩相是在一定成岩环境控制下,各种成岩作

用综合的物质表现,它以各类成岩特征为基础,高度综合和概括成岩演化规律,可准确预测研究地区潜在储层的成因、性质、规模和展布,以及深入评价储盖组合和成岩圈闭^[9, 12]。在成岩作用特征分析的基础上,将东营凹陷古近系红层储层成岩相划分为压实成岩相、碳酸盐致密胶结成岩相、硫酸盐致密胶结成岩相、中等压实-溶蚀成岩相和强压实-溶蚀成岩相5种类型。

压实成岩相视溶蚀率和视胶结率一般小于20%,压实作用是储层物性变化的主要因素,视压实率一般为30%~60%,岩石多表现为杂基支撑(图6(a)),储层储集物性中等(表1)。

碳酸盐致密胶结成岩相分布广泛,以基底式碳酸盐胶结为特征(图6(b)),砂体边缘及尖灭带的碳酸盐致密胶结成岩相的形成时间早,胶结物以方解石为主;断块顶部砂体中发育的碳酸盐致密胶结成岩相的形成时间相对较晚,胶结物以铁方解石和铁白云石为主。视胶结率一般大于40%,甚至最大大于80%;溶蚀作用弱,视溶蚀率一般小于20%,储层储集物性低(表1)。

硫酸盐致密胶结成岩相以基底式石膏、硬石膏胶结为特征(图6(c)),其形成主要受盐湖沉积环境和晚期膏盐岩热演化脱水影响。视胶结率一般大于40%,可超过70%;溶蚀作用弱,视溶蚀率一般小于20%,储层储集物性低(表1)。

中等压实-溶蚀成岩相压实作用中等,视压实率一般为25%~60%,碎屑颗粒主要呈点-线接触和线接触;胶结作用较弱,胶结物含量一般小于10%,视胶结率一般小于40%;溶蚀作用较为发育,薄片常见发育广泛的长石及石英溶蚀孔隙(图6(d)、(e)),溶蚀面孔率一般大于1%,视溶蚀率一般大于30%,储层储集物性高(表1)。

强压实-溶蚀成岩相压实作用较强,视压实率一般大于60%,碎屑颗粒主要呈线-凹凸接触甚至缝合接触;胶结作用弱,胶结物含量一般小于10%,视胶结率一般小于35%;溶蚀作用较为发育,常见长石及石英溶蚀孔隙(图6(f)),溶蚀面孔率一般为0.5%~2%,视溶蚀率可达60%,储层储集物性较好。

上述各类成岩相的储层孔隙度、渗透率、有效孔隙度、有效渗透率及有效储层含量如表1所示。碳酸盐致密胶结成岩相及硫酸盐致密胶结成岩相储层质量差,有效储层含量低,一般低于15%;中等压实-溶蚀成岩相和强压实-溶蚀成岩相储层质量较好,有效储层含量高,一般大于75%,是优质储层主要的分布区;压实成岩相储层质量中等,有效储层含量

中等偏低。

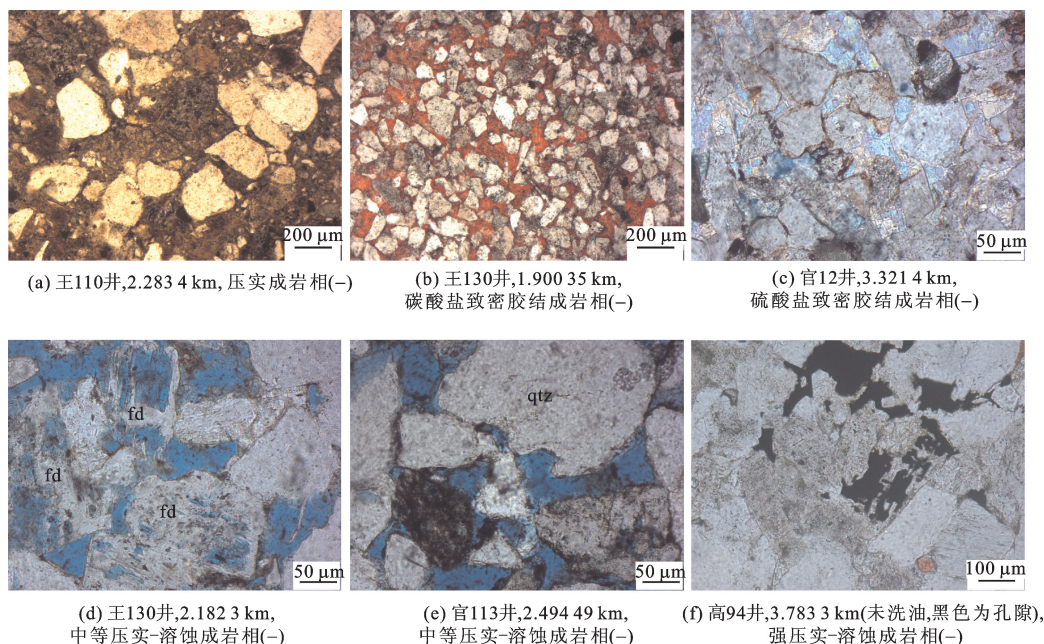


图 6 东营凹陷古近系红层储层成岩相类型及特征

Fig. 6 Types and characteristics of diagenetic facies of red beds reservoirs of Paleogene in Dongying depression

表 1 红层储层成岩相类型、分布及物性特征

Table 1 Types, distribution and physical properties of diagenetic facies of red beds reservoirs

成岩相	压实成岩相	碳酸盐致密胶结成岩相	硫酸盐致密胶结成岩相	中等压实-溶蚀成岩相	强压实-溶蚀成岩相
分布特征	主要发育在盆地边缘冲积扇发育区	分布广泛,主要发育在砂体边缘、尖灭带及断块顶部	主要分布在梁 120、官 12 井区,发育在砂体边缘及尖灭带	分布广泛,主要发育在深度 3.0 km 以上厚层砂体中部及断块中下部	主要发育在博兴洼陷深度大于 3.0 km 的厚层砂体中部及断块中下部
样品数/个	366	281	47	581	94
孔隙度 φ /%	$\frac{2.7 \sim 27.1}{15.01}$	$\frac{3.8 \sim 23.1}{12.7}$	$\frac{3.6 \sim 16.6}{12.7}$	$\frac{10.6 \sim 33.7}{19.9}$	$\frac{5.8 \sim 15.9}{11.9}$
渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	$\frac{0.01 \sim 869.5}{21.7}$	$\frac{0.03 \sim 292.6}{5.6}$	$\frac{0.01 \sim 6.1}{1.4}$	$\frac{0.36 \sim 1651.8}{97.8}$	$\frac{0.06 \sim 5.41}{1.7}$
有效孔隙度 φ_e /%	$\frac{0.01 \sim 14.6}{4.7}$	$\frac{0.04 \sim 7.2}{2.3}$	$\frac{0.13 \sim 5.9}{2.9}$	$\frac{0.26 \sim 19.3}{7}$	$\frac{0.15 \sim 8.6}{5.3}$
有效渗透率 $k_e/10^{-3} \mu\text{m}^2$	$\frac{0.28 \sim 865}{40.4}$	$\frac{0.11 \sim 285}{13.8}$	$\frac{0.43 \sim 1.5}{0.91}$	$\frac{0.03 \sim 1651.1}{106.1}$	$\frac{0.04 \sim 5}{1.6}$
有效储层含量/%	43.4	15.3	10.6	87.3	78.7

注:文中数值表示为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

3 成岩相对成岩圈闭的影响

红层储层成岩作用及成岩相特征分析表明,埋藏时期内砂体单元的各部分对成岩作用具有不同的响应特征,使储层成岩相具有不同的分布规律,进而控制了储层储集物性差异性。受泥岩成岩作用及上升流作用机制的影响,碳酸盐致密胶结成岩相及硫酸盐致密胶结成岩相主要分布在砂泥岩互层中的砂体边缘及砂体尖灭带和断块上部砂体中部(图 7),储层物性低,形成砂体边缘致密胶结带和上倾尖灭致密胶结带;中等压实-溶蚀成岩相和强压实-溶蚀

成岩相主要分布在断块中下部厚层砂体中部,储层物性好,发育大量的原生和次生孔隙,形成原生粒间孔隙及溶蚀孔隙发育带。因此,红层储层成岩相在砂体单元中的差异分布特征引起了储集空间的分割变形和再分配,导致储层物性差异增大,非均质性增强。空间上,碳酸盐和硫酸盐致密胶结成岩相与压实-溶蚀成岩相具有良好的配置关系。碳酸盐和硫酸盐致密胶结成岩相发育的砂体部位经地层水束缚后,很容易产生水锁效应,形成很高的毛细管压力,使该砂岩层成为油气藏的直接盖层;发育压实-溶蚀成岩相的砂体部位保存了大量的储集空间,为油

气聚集的良好储层。因此,受成岩相分布特征的影响,东营凹陷古近系红层中发育一定规模的成岩圈闭。2009年在博兴洼陷成功钻探的高94井孔一段高产工业油流井段即位于断块下部的厚层砂体中部

(图7)。成岩圈闭中优质储层主要发育在断块中下部厚层砂岩中部,其发育规律具有良好的可预测性,对东营凹陷古近系红层油气勘探具有重要的实践意义。

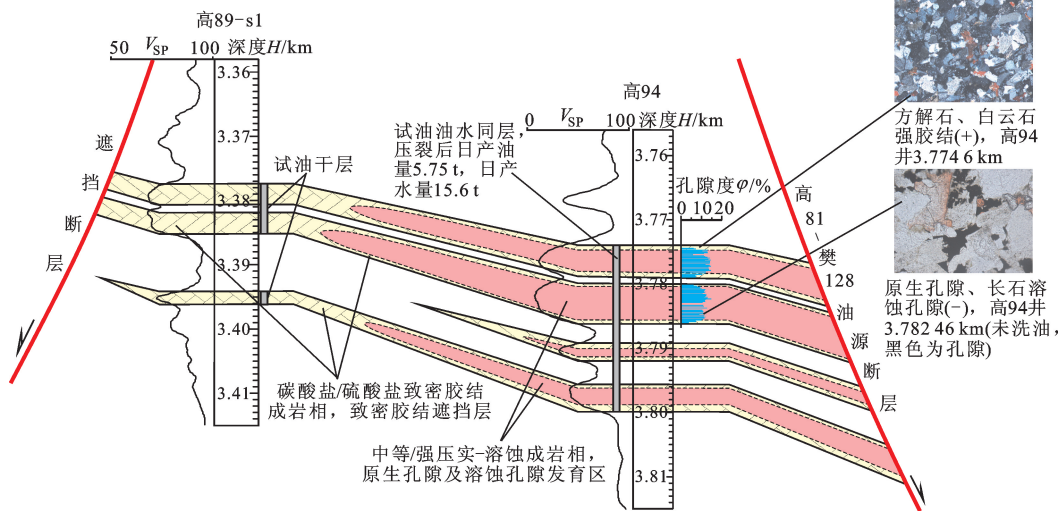


图7 东营凹陷红层储层成岩相分布特征及成岩圈闭

Fig. 7 Distribution of diagenetic facies and diagenetic traps of red beds reservoirs in Dongying depression

4 结论

(1) 东营凹陷古近系红层储层压实作用中等偏强,早期胶结作用抑制了压实作用的进行;胶结物以碳酸盐、铁碳酸盐、石膏及硬石膏和自生石英为主,胶结作用由砂体边缘向砂体内部减弱,由断块下部向上部逐渐增强;溶解作用主要为长石、碳酸盐胶结物及石英溶解,由砂体边缘向内部逐渐增强,由断块下部向上部逐渐减弱。

(2) 东营凹陷红层储层中发育中等压实-溶蚀成岩相、强压实-溶蚀成岩相、压实成岩相、碳酸盐致密胶结成岩相和硫酸盐致密胶结成岩相,储集物性及有效储层含量依次降低。

(3) 不同类型成岩相的空间配置关系控制了东营凹陷红层储层中成岩圈闭的发育。

参考文献:

[1] 操应长,王健,高永进,等. 济阳坳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 Ying-chang, WANG Jian, GAO Yong-jin, 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.

[2] 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):66-74.

WANG Jian, CAO Ying-chang, LIU Hui-min, et al. Characteristics of sedimentary environment and sedimentary filling model of the lower submember of the fourth member of Shahejie formation of Dongying depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(2):66-74.

[3] 杨勇强,邱隆伟,孙宝强. 陆相“红层”等时地层对比新方法在东营凹陷南斜坡的应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2012, 36(2):16-21.

YANG Yong-qiang, QIU Long-wei, SUN Bao-qiang. Application of new method of time-stratigraphic comparison of terrestrial red beds in southern slope of Dongying depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(2):16-21.

[4] 徐磊,操应长,王艳忠,等. 东营凹陷古近系膏盐岩成因模式及其与油气藏的关系[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(3):30-36.

XU Lei, CAO Ying-chang, WANG Yan-zhong, et al. Genetic model of salt-gypsum rock of Paleogene in Dongying depression and its relationship with hydrocarbon reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(3):30-36.

[5] 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 Yuan-jia, HE Sheng, SONG Guo-qi, 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.

- [6] 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 Su-min, LIU Shu-fan, et al. Calculation of salinity of lake at the stage of Paleogene in Dongying depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 1982, 3(4): 95-102.
- [7] 王生朗,任来义,王英,等. 盐湖环境成岩作用特征及其对高孔隙带形成的影响[J]. 石油勘探与开发,2003,30(5):47-49.
WANG Sheng-lang, REN Lai-yi, WANG Ying, et al. Characteristics of diagenesis in saline lake environment and its effect on high porosity zones [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 47-49.
- [8] 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 Da-kang, ZHU Xiao-min, 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.
- [9] 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 Zhen-kui, CHEN Xiang, MING Hai-hui, 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.
- [10] 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 Long-wei, JIANG Zai-xing, CAO Ying-chang, et al. Alkaline diagenesis and its influence on reservoir rocks in Miyang depression [J]. Science in China (Ser D), 2001, 31(9): 752-759.
- [11] 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 Ying-chang, GAO Yong-jin, 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.
- [12] 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 Cai-neng, TAO Shi-zhen, ZHOU Hui, et al. Genesis, classification and evaluation of diagenetic facies [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 526-540.

(编辑 徐会永)

(上接第22页)

- [8] 陈迎宾. 柴达木盆地北缘构造发育特征及其对油气成藏的控制[D]. 北京:中国地质大学(北京)能源学院,2010.
CHEN Ying-bing. Tectonic developmental feature and its control for hydrocarbon accumulation in northern margin of Qaidam Basin [D]. Beijing: School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [9] 王小凤,武红岭,马寅生,等. 柴达木盆地北缘地区构造应力场、流体势场对油气运聚的控制作用[J]. 地球学报,2006,27(5):419-423.
WANG Xiao-feng, WU Hong-ling, MA Yin-sheng, et al. Tectonic stress and fluid potential fields and their controls over the migration and accumulation of petroleum and natural gas in Northern Qaidam Basin [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2006, 27(5): 419-423.
- [10] ZHENG Wen-jun, ZHANG Pei-zhen, HE Wen-gui, et al. Transformation of displacement between strike-slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau: evidence from decadal GPS measurements and late Quaternary slip rates on faults [J]. Tectonophysics, 2013, 584: 267-280.
- [11] GRAVELEAU F, MALAVIELLE J, DOMINGUEZ S. Experimental modelling of orogenic wedges: a review [J]. Tectonophysics, 2012, 538: 1-66.
- [12] MOURGUES R, LECOMTE E, VENDEVILLE B, et al. An experimental investigation of gravity-driven shale tectonics in progradational delta [J]. Tectonophysics, 2009, 474(3/4): 643-656.
- [13] ZHOU Jian-xun, XU Feng-yin, WANG Tie-cheng, et al. Cenozoic deformation history of the Qaidam Basin, NW China: results from cross-section restoration and implications for Qinghai-Tibet Plateau tectonics [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 243(1/2): 195-210.
- [14] SCHRANK C E, BOUTELIER D A, et al. The analogue shear zone: from rheology to associated geometry [J]. Journal of Structural Geology, 2008, 30(2): 177-193.
- [15] KOONS P O. Two-sided orogen: collision and erosion from the sandbox to the Southern Alps, New Zealand [J]. Geology, 1990, 18(8): 679-682.

(编辑 修荣荣)