

文章编号:1672-6561(2013)01-0048-08

塔里木盆地塔河油田石炭系卡拉沙依组 砂岩储层特征与物性控制因素

钟大康¹, 漆立新², 云 露², 杨素举², 刘康宁¹, 吴亚生¹

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油化工股份有限公司
西北油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要:综合普通岩石薄片、铸体薄片、电子探针、X 衍射、扫描电镜等多种资料,对塔里木盆地塔北隆起塔河油田石炭系卡拉沙依组储层特征、成岩作用、孔隙类型及物性特征进行了探讨,并就储层物性控制因素进行了讨论。结果表明:研究区石炭系卡拉沙依组储层主要为潮坪沉积的中—粗粒岩屑石英砂岩、长石石英砂岩,其次是岩屑长石砂岩;虽然储层岩石现今埋深达 5 000 m,但其孔隙度和渗透率平均值分别为 9.93% 和 $34.46 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于中孔中渗储层,储层孔隙主要为粒间碳酸盐胶结物溶蚀孔隙;砂岩深埋优质储层的主要原因与成岩序次和后期碳酸盐胶结物溶蚀有关,早期碳酸盐胶结抑制了压实作用,后期的碳酸盐胶结物溶蚀为储层提供了大量储集空间;成岩序次是控制该地区储层物性的关键,溶蚀作用是前提,沉积条件是基础。

关键词:储层;物性;控制因素;砂岩;石炭系;卡拉沙依组;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:P618.130.2⁺1;TE122.2⁺3

文献标志码:A

Reservoir Characteristics and Controlling Factors on Physical Properties of Sandstones in Kalashayi Formation of Carboniferous from Tahe Oilfield of Tarim Basin

ZHONG Da-kang¹, QI Li-xin², YUN Lu², YANG Su-ju², LIU Kang-ning¹, WU Ya-sheng¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Institute of Petroleum
Exploration and Development, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: Based on examination and analysis of ordinary thin sections, casting sections, SEM and X-ray diffractions, the characteristics of reservoir and physical properties, diagenesis and pore type in Kalashayi Formation of Carboniferous from Tahe oilfield of Tabei uplift, Tarim Basin were analyzed, and controlling factors on physical properties of sandstones were discussed. The results showed that the reservoirs in Kalashayi Formation of Carboniferous from the study area were mainly medium-coarse lithic quartz sandstone and feldspar quartz sandstone deposited in tidal flat, and secondly lithic feldspar sandstone; although the present depth of reservoir was 5 000 m, the average values of porosity and permeability were 9.93% and $34.46 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ respectively, and they were moderate; the main diagenesis included compaction, cementation and dissolution during burial, and the main type of reservoir pore was dissolution pore with intergranular carbonate cement; deep burial reservoir with high quality in sandstone was related with diagenesis process and later dissolution of carbonate cement, the early carbonate cementation

收稿日期:2012-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41072104);国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2011CB201104)

作者简介:钟大康(1961-),男,四川资中人,教授,博士研究生导师,理学博士,E-mail:zhongdakang@263.net。

restrained the compaction, and the later dissolution of carbonate cement supplied a lot of reservoir space; diagenesis process was the key to control the reservoir physics property, dissolution was precondition, sedimentary environment was foundation.

Key words: reservoir; physical property; controlling factor; sandstone; Carboniferous; Kalashayi Formation; Tahe oilfield; Tarim Basin

0 引言

塔河油田位于塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起的西南部,其主要油气产自下古生界奥陶系碳酸盐岩^[1-5]。但近年来的钻井资料表明,在上古生界石炭系卡拉沙依组碎屑岩也具有良好的油气显示,并有多口井试采。目前的勘探开发和研究表明,塔河油田卡拉沙依组虽然有一定的勘探开发潜力,但开发难度较大,造成这一现象的原因之一是对石炭系卡拉沙依组碎屑岩储层宏观展布、微观物性特征以及储层质量认识不完全清楚,尽管前人在储层方面做过一些工作^[6-16],但是研究程度仍然较低。因此,研究该地区石炭系卡拉沙依组储层特征与物性控制因素,对于塔河油田的高产稳产、寻找后备储量和资源具有重要意义。

目前,国内外对碎屑岩储层的评价大多从沉积条件和成岩作用2个方面入手,讨论储层物性控制因素首先要分析其沉积环境,其次是讨论其在埋藏过程中所发生的成岩作用类型及特征^[17-27],但对成岩序次的研究较少,砂岩物性好坏除了与所经历的成岩作用有关之外,实际上在很大程度上是受成岩序次控制的,也就是说2个地区砂岩所经历的成岩作用类型及特征相似,但如果不同作用的顺序不同,则可能会导致其物性差异很大。笔者根据研究区30口取芯井的普通岩石薄片、铸体薄片、电子探针、X衍射、扫描电镜以及物性数据,首先对石炭系卡拉沙依组储层岩石学特征及成岩作用与物性特征进行分析,在此基础上重点研究其成岩序次与孔隙演化的关系,明确指出该地区砂岩深埋优质储层的主要原因与砂岩的成岩序次有关,早期先发生碳酸盐胶结,占据大量粒间孔隙,后期这些碳酸盐胶结物再溶蚀形成次生孔隙,于是形成良好的储层。

1 储层岩石学特征

根据前人研究,石炭系卡拉沙依组(图1)主要为潮坪沉积,可分为潮汐水道、潮间砂坪、砂泥混合坪和泥坪沉积,自上而下分为I~IV砂组^[9-12,17-18]。

通过对30口井岩芯的观察,卡拉沙依组储层以中砂岩、粗砂岩、细砂岩及粉砂岩为主,另外还存在一定的含砾砂岩及细砾岩。砂岩一般分选较好,而砾岩在上部I砂组成分较杂,分选差一中、磨圆次棱角状,向下(II~IV砂组)泥砾逐渐增多。纵向上,I砂组砂质较粗,尤其是其顶部;平面上,北部较粗,如S92、S75、S101、T902、T901等井。

从工区整个卡拉沙依组砂岩分类三角图(图2)可以看出,4个砂组储层总体上都以石英砂岩为主,包括岩屑质石英砂岩、长石质石英砂岩、长石岩屑质石英砂岩,并含有少量岩屑质长石砂岩、长石砂岩。其中:I、II砂组的岩屑含量大于长石含量,岩屑砂岩较多;III、IV砂组岩屑质长石砂岩、长石砂岩含量比I、II砂组含量稍高一些;IV砂组长石含量比I~III砂组含量稍高。

卡拉沙依组砂岩填隙物含量(质量分数,后文同)为8%~15%,平均9.6%,包括杂基和胶结物。泥质杂基含量一般小于5%,多为1%~3%,主要为高岭石和伊-蒙混层矿物。胶结物主要为方解石,少量白云石、高岭石及绿泥石等。方解石含量为0%~25%,平均7.23%。卡拉沙依组砂岩以孔隙式胶结为主,颗粒之间以点-线接触、线接触为主,少部分凹凸接触;分选差一中等,磨圆次棱角一次圆状。粒径一般为0.15~0.5 mm,部分粒径小于0.12 mm。

2 储层孔隙类型及物性特征

通过对S59、S70、T901等井的铸体薄片和扫描电镜观察,卡拉沙依组砂岩储集空间以次生孔隙为主,主要为粒间碳酸盐胶结物溶孔及少量杂基溶孔,其次为长石和岩屑粒内溶孔(图3)。

尽管塔河地区石炭系卡拉沙依组砂岩储层现今埋深达4 800~5 200 m,但仍表现为中等物性的储层。岩芯孔隙度为0.7%~23.6%,平均9.93%,主峰位于12%~15%(表1);渗透率为 $(0.01\sim4\,767)\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$,平均 $34.46\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$,峰值区间为 $(5\sim 30)\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$,总体上属中孔中渗储层,孔隙度与渗透率呈良好的正相关线性关系(图4)。这表明工区内砂岩属于孔隙型储层,各油组物性存在一

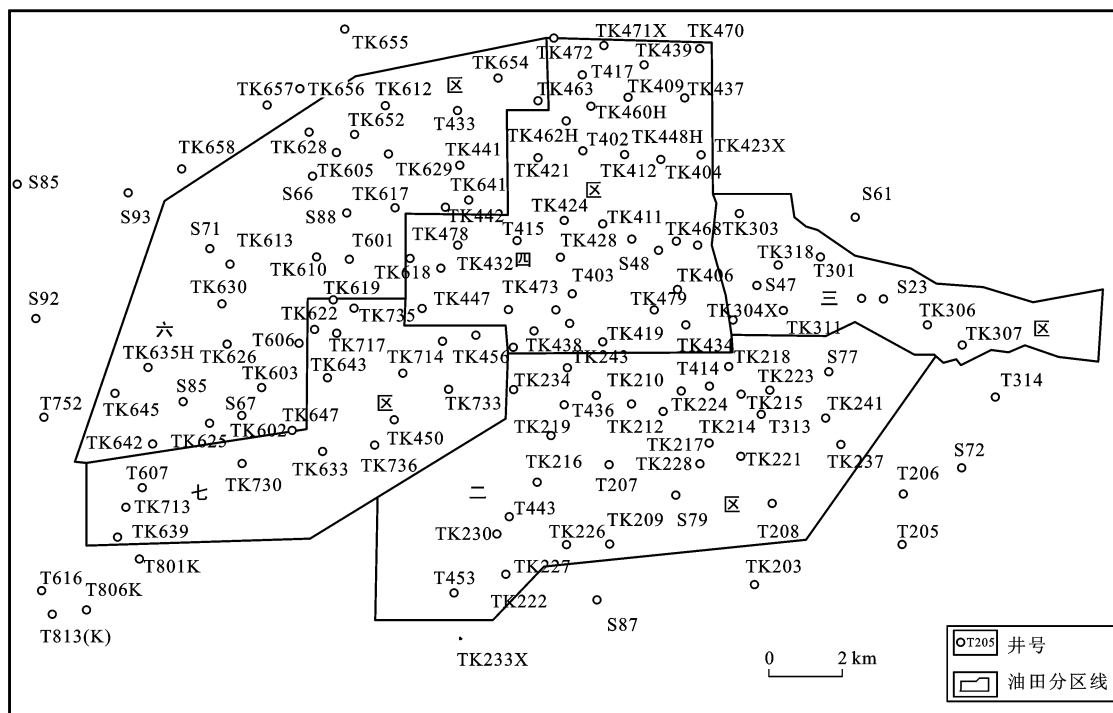


图 1 研究区位置及井位分布

Fig. 1 Location of Studied Area and Distribution of Wells

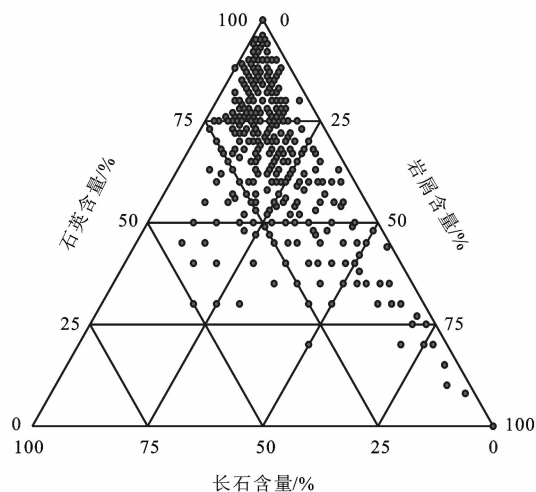


图 2 卡拉沙依组砂岩分类三角图

Fig. 2 Triangular Diagram of Sandstone Types in Kalashayi Formation

些差异。

3 成岩作用特征

通过对普通薄片、铸体薄片及扫描电镜等资料的分析,该地区储层经历了压实作用、胶结作用(如石英、长石次生加大、方解石、白云石和黏土胶结、黄铁矿、沸石等胶结,但以碳酸盐胶结为主)、溶蚀作用(主要为碳酸盐、长石及岩屑的溶蚀)以及交代作用等。

表 1 卡拉沙依组各岩性段储层物性特征

Tab. 1 Petrophysical Properties of Each Section in Kalashayi Formation

| 砂组 | 样品数 | 孔隙度/% | | | 渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | | |
|-----|-----|-------|-------|------|------------------------------|-------|-------|
| | | 最小值 | 平均值 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 最大值 |
| I | 335 | 1.2 | 9.74 | 20.1 | 0.008 | 20.32 | 751 |
| II | 192 | 1.6 | 10.16 | 23.6 | 0.030 | 46.12 | 1 385 |
| III | 339 | 1.0 | 10.11 | 20.4 | 0.008 | 33.69 | 589 |
| IV | 373 | 1.3 | 10.56 | 19.5 | 0.004 | 52.18 | 4 767 |

3.1 压实作用

通过镜下观察,工区内卡拉沙依组储层岩石压实作用属于中—弱,碎屑颗粒间一般为点—线接触及线接触(图 5)。因压实作用,塑性颗粒(如云母)发生明显弯曲变形[图 5(b)],个别岩屑含量较高的地方,颗粒呈线接触和凹凸接触[图 5(a)]。总体上,研究区砂岩与对应的埋深相比,压实作用不是很强,处于中等—弱压实。这与该地区砂岩的早期碳酸盐胶结有关,早期碳酸盐胶结抑制了后来的压实作用,表现为方解石胶结发育处颗粒呈点接触或漂浮状,部分颗粒被方解石强烈交代,压实作用弱,而方解石不发育处颗粒呈点—线接触,压实作用中等。

3.2 胶结作用

塔河地区石炭系卡拉沙依组砂岩在埋藏过程中经历了各种胶结作用,如石英、长石次生加大、方解

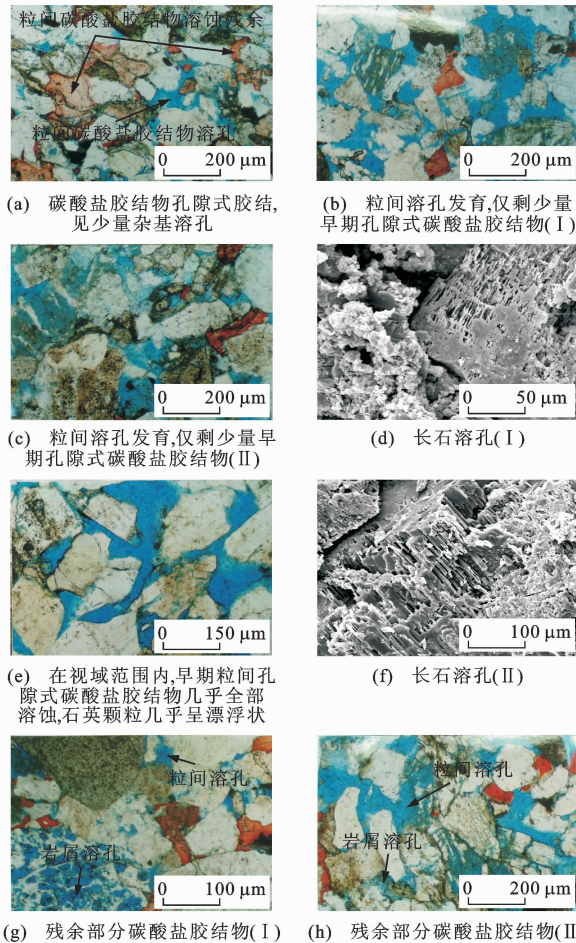


图 3 各种溶蚀成因的次生孔隙

Fig. 3 Various Secondary Porosities from the Dissolution

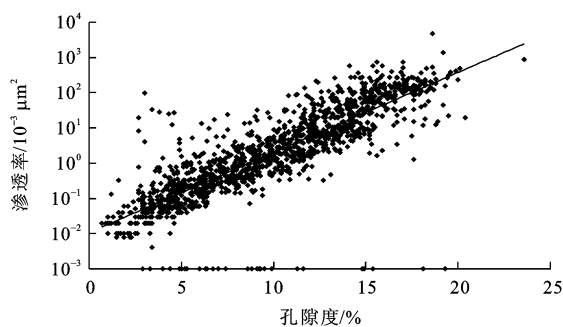
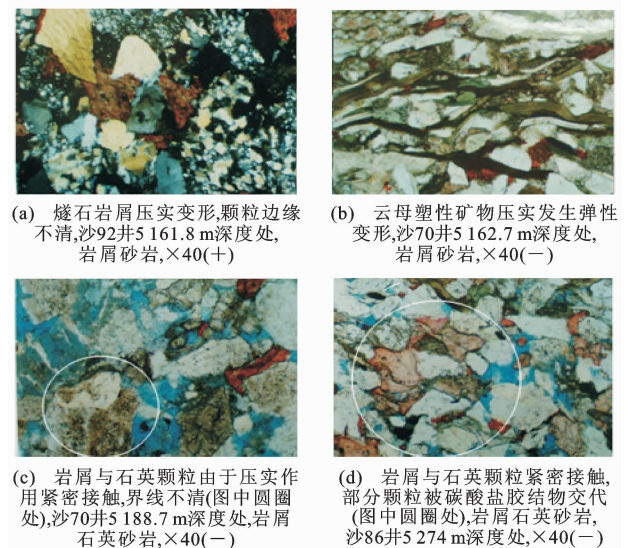


图 4 孔隙度与渗透率的关系

Fig. 4 Relationship Between Porosity and Permeability

石、白云石和黏土胶结、黄铁矿、沸石等胶结,但以碳酸盐胶结为主。

(1) 碳酸盐胶结。该地区的碳酸盐胶结主要为方解石胶结,染色为红色。电子探针分析表明,方解石的铁含量为 0.2%~1%,属于普通方解石,仅个别样品见少量含铁方解石、白云石和铁白云石,白云石胶结物在扫描电镜下为菱面体[图 6(b)]。镜下观察表明,方解石胶结物含量较高,平均为 7.23%,个别达



×40(一)代表放大 40 倍,光性为阴性;×40(十)代表

放大 40 倍,光性为阳性

图 5 储层压实作用特征

Fig. 5 Characteristics of Reservoir Compaction

20%。其分布有 2 种形式:一种是分布于岩石颗粒之间的孔隙;另一种是围绕颗粒分布,有时可以见到碎屑颗粒漂浮在碳酸盐胶结物之中。碳酸盐胶结物的这一结构特征充分说明早期胶结作用在起作用,也显示岩石还没有经过充分压实,碳酸盐胶结就已完成。这种胶结作用对砂岩的孔隙演化有重要影响,为后期碳酸盐胶结物溶蚀次生孔隙形成奠定了基础。

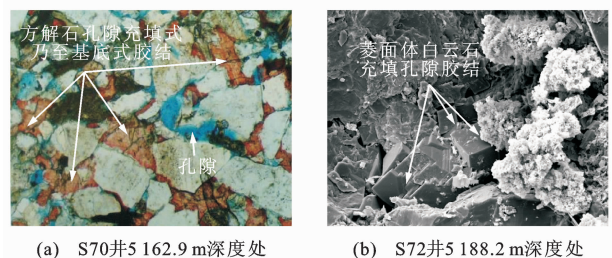


图 6 碳酸盐胶结特征

Fig. 6 Characteristics of Carbonate Cementation

(2) 硅质胶结。工区内硅质胶结主要是石英次生加大和粒间自生石英小晶体,多数以自生加大边的形式存在。石英次生加大多分布于方解石胶结物不发育的孔隙空间,次生石英含量普遍小于 1%。

(3) 黏土矿物胶结。工区内主要有自生高岭石、绿泥石、伊利石和伊-蒙混层矿物胶结等,自生高岭石一般呈假六边形片状,以结晶较好的蠕虫状分布于粒间。例如:S59 井 4 698.2 m 深度处、S72 井 5 186.4 m 深度处充填蠕虫状高岭石,伊利石和绿泥石一般呈片状充填于粒间或者在粒表以膜状分布,自生绿泥石含量极少;S86 井 5 271.11 m 深度

处、S91 井 5 268.6 m 深度处有绿泥石以膜状分布, S91 井 5 268.6 m 深度、S59 井 4 843 m 深度处有伊利石以膜状分布。伊-蒙混层矿物以丝片状充填于粒间或者膜状分布于粒表。

(4)其他胶结作用。根据电子显微镜和电子探针分析,本区石炭系卡拉沙依组砂岩还包括黄铁矿胶结,沸石、石膏胶结等其他胶结作用类型。

3.3 溶蚀作用

本区石炭系卡拉沙依组砂岩的溶蚀作用主要表现为碳酸盐胶结物、长石颗粒以及部分岩屑的溶蚀,另外还可见到少量杂基溶蚀和石膏胶结物溶蚀(图 7)。例如: S70 井 5 246.8 m 深度处、S70 井 5 165 m 深度处可见长石的溶蚀; S91 井 5 269.8 m 深度处、S59 井 4 697.5 m 深度处可见碳酸盐胶结物的溶蚀(图 7)。目前,碎屑岩中的溶蚀作用主要分为烃源岩成熟产生的有机酸溶蚀、碳酸溶蚀和大气淡水溶蚀 3 种类型^[28-35],其中有机酸溶蚀能力是碳酸的 7~320 倍,溶蚀对象较广,除了碳酸盐胶结物外,长石和岩屑也将受溶蚀,而碳酸的溶蚀对象主要是碳酸盐胶结物及部分基性长石如钙长石,大气淡水溶蚀主要是对长石的淋滤,一般发生在不整合面附近,而且距离不整合面越近溶蚀越强。根据目前镜下溶蚀特征看,研究区碳酸盐胶结物、长石颗粒以及部分岩屑均受到了溶蚀,且溶蚀不具有分带性,说明这些溶蚀作用可能与有机质成熟产生的有机酸有关。

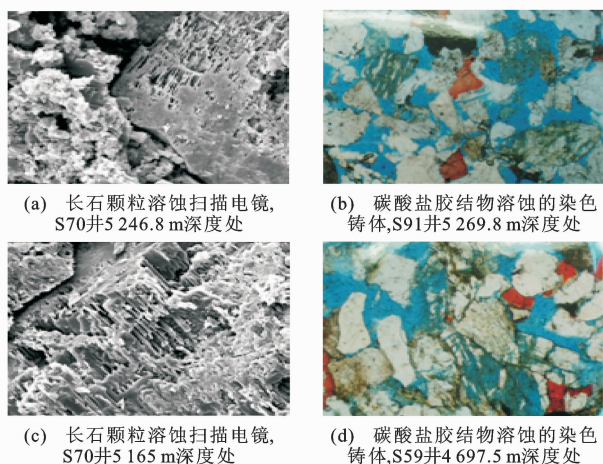


图 7 长石颗粒溶蚀和碳酸盐胶结物溶蚀

Fig. 7 Dissolution of Feldspar and Carbonate Cementation

3.4 交代作用

本区卡拉沙依组砂岩的交代作用主要有方解石交代石英和长石、白云石交代长石等现象。方解石交代石英和长石后,这些颗粒的边缘呈锯齿状,或呈不规则的边缘,这一作用的出现说明埋藏过程中孔

隙水介质基本上处于碱性环境,因为在碱性成岩环境下,石英是不稳定的,方解石易于沉淀。由于交代作用对砂岩孔隙影响较小,故此处论述从简。

4 储层物性控制因素

砂岩储层物性常受多种因素控制,如沉积条件、成岩作用以及构造运动、油气成藏过程等,但是具体在某个地区,其储层物性往往受其中一到两个主要因素控制,具有一定的特殊性^[36-42]。

综合研究区砂岩的岩石学特征、成岩作用序次,认为卡拉沙依组砂岩储层物性主要受成岩序次和后期溶蚀作用控制。其依据为:从铸体薄片镜下特征(图 3)可以看到,目前碳酸盐胶结物保存比较多的视域,碳酸盐胶结物基本上都是孔隙式-基底式胶结,说明碳酸盐胶结发生的时间较早,岩石还没有经过充分压实就出现了碳酸盐胶结,在后来碳酸盐胶结物发生溶蚀后,在溶蚀程度较高的视域可以见到石英颗粒呈“漂浮”状和碳酸盐胶结物呈“零星”分布特征,这一现象说明碳酸盐胶结发生较早。如果岩石是先发生强烈的压实作用,粒间孔隙大量损失,碳酸盐胶结出现较晚,则碳酸盐胶结物充填的仅为压实后剩余的粒间孔,碳酸盐胶结物含量较低,即使后期出现碳酸盐胶结物的溶蚀,也很难形成如图 3(b)、(c)、(e)、(h)的溶蚀孔隙,这种情况下砂岩的物性也不会太好。这一现象在潮汐水道和潮间砂坪的中—粗粒石英砂岩中比较明显,在砂泥混合坪和泥坪内的细粒砂岩中不常见。

5 结 语

(1)塔里木盆地塔河油田卡拉沙依组砂岩成岩序次为:早期弱压实→原生孔隙部分损失→早期碳酸盐孔隙式胶结和黏土矿物胶结→大部分原生孔隙消失→后期碳酸盐胶结物溶蚀→次生孔隙大量形成。

(2)埋藏早期的方解石充填孔隙胶结抑制了后期岩石的压实作用,对保存粒间孔隙起到重要作用;埋藏中期,这些碳酸盐胶结物的再次溶蚀使原来的孔隙得以还原,形成了良好的优质储层。

(3)成岩序次是控制该地区储层物性的关键,溶蚀作用是前提,沉积条件是基础。先胶结后压实再溶蚀这一成岩序次是控制储层物性形成优质储层的关键。

参考文献:

References:

- [1] 张 抗. 塔河油田的发现及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 120-124.

- ZHANG Kang. The Discovery of Tahe Oilfield and Its Geologic Implication[J]. Oil and Gas Geology, 1999, 20(2):120-124.
- [2] 苏江玉,俞仁连. 对塔河油田油气成藏地质研究若干问题的思考[J]. 石油实验地质, 2011, 33(2):105-112.
SU Jiang-yu, YU Ren-lian. Discussion of Several Problems in Petroleum Accumulation Geologic Research in Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(2):105-112.
- [3] 翟晓先. 塔里木盆地塔河特大型油气田勘探实践与认识[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4):323-331.
ZHAI Xiao-xian. Exploration Practice and Experience of Tahe Giant Oil-and-gas Field, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(4):323-331.
- [4] 丁勇,彭守涛,李会军,等. 塔河油田及塔北碳酸盐岩油藏特征与成藏主控因素[J]. 石油实验地质, 2011, 33(5):488-494.
DING Yong, PENG Shou-tao, LI Hui-jun, et al. Features and Main Controlling Factors of Carbonate Reservoirs in Tahe Oilfield and Northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(5):488-494.
- [5] 王祥,吕修祥,刘国勇,等. 塔河油田碳酸盐岩油气输导体系与勘探方向[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1):14-18.
WANG Xiang, LU Xiu-xiang, LIU Guo-yong, et al. Hydrocarbon Carrier System of Carbonate Rock and Exploration Direction in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(1):14-18.
- [6] 魏福军,何发岐,蒲仁海. 塔河油田卡拉沙依组储层物性及评价[J]. 石油实验地质, 2004, 26(4):344-348.
WEI Fu-jun, HE Fa-qi, PU Ren-hai. Petrophysics and Evaluation of the Kalashayi Formation, Tahe Oilfield[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2004, 26(4):344-348.
- [7] 李永宏,闫相宾,张涛,等. 塔河油田石炭系卡拉沙依组储层特征及其控制因素[J]. 石油实验地质, 2004, 26(1):17-22.
LI Yong-hong, YAN Xiang-bin, ZHANG Tao, et al. Reservoir Characteristics and Their Controlling Factors of the Carboniferous Karashayi Formation in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2004, 26(1):17-22.
- [8] 宋杉林,张春冬,王琪. 新疆塔河油田石炭系卡拉沙依组储层特征及油气分布[J]. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(2):53-57.
SONG Shan-lin, ZHANG Chun-dong, WANG Qi. The Characteristics and Distribution of the Hydrocarbon Reservoirs in the Carboniferous Karashayi Formation, Tahe Oil Field, Xinjiang[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2002, 22(2):53-57.
- [9] 何发岐,翟晓先,俞仁连,等. 塔河油田石炭系卡拉沙依组沉积与成因分析[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3):258-262.
HE Fa-qi, ZHAI Xiao-xian, YU Ren-lian, et al. Deposition and Genetic Analysis of Carboniferous Kalashayi Formation in Tahe Oilfield[J]. Oil and Gas Geology, 2004, 25(3):258-262.
- [10] 郭齐军,赵省民. 塔河地区石炭系沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1):99-102.
GUO Qi-jun, ZHAO Xing-min. Depositional Characteristics of Carboniferous in Tahe Region[J]. Oil and Gas Geology, 2002, 23(1):99-102.
- [11] 樊怀阳,陈文,刘百春. 塔河油田卡拉沙依组砂组沉积相与储层研究[J]. 新疆地质, 2004, 22(4):417-421.
FAN Huai-yang, CHEN Wen, LIU Bai-chun. Kalashayi Formation Reserve and Comprehensive Evaluation in Tahe Oil Field[J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(4):417-421.
- [12] 王少立,宋杉林. 塔里木盆地北部阿克库勒凸起石炭系沉积特征[J]. 新疆石油学院学报, 2001, 13(1):17-21.
WANG Shao-li, SONG Shan-lin. The Sedimentary Characteristics of the Carboniferous in Akekule Heave in Northern Tarim Basin[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2001, 13(1):17-21.
- [13] 司马立强,张凤生,赵冉,等. 塔河油田碳酸盐岩真假储层测井识别方法研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2012, 34(6):73-78.
SIMA Li-qiang, ZHANG Feng-sheng, ZHAO Ran, et al. Study on True or False Carbonate Reservoir Recognition Methods Based on Well Logging in Tarim Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2012, 34(6):73-78.
- [14] 曹建文,金意志,夏日元,等. 塔河油田4区奥陶系风化壳古岩溶作用标志及控制因素分析[J]. 中国岩溶, 2012, 31(2):220-226.
CAO Jian-wen, JIN Yi-zhi, XIA Ri-yuan, et al. Marks and Controlling Factors of the Paleo-karstification in the Ordovician Weathered Crust at the 4th Block of Tahe Oilfield[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(2):220-226.
- [15] 张琴,庞正炼,葛明娜. 塔中泥盆系东河砂岩油气成藏及有利区预测[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2012, 27(5):1-8.
ZHANG Qin, PANG Zheng-lian, GE Ming-na. Hydrocarbon Accumulation and Favorable Area Prediction of Donghe Formation in Tazhong Area[J]. Jour-

- nal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2012, 27(5): 1-8.
- [16] 张 斌, 朱光有, 苏 劲, 等. 塔北隆起西部东河塘油气来源及分布[J]. 地学前缘, 2012, 19(4): 276-283.
ZHANG Bin, ZHU Guang-you, SU Jin, et al. Origin and Distribution of Hydrocarbon in Donghetang Oilfield, West Tabei Uplift, Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(4): 276-283.
- [17] 姜红霞, 吴亚生, 罗晓容, 等. 鄂尔多斯盆地中南部三叠系延长组 8 油层组成岩作用及其对储层物性的控制[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27(1): 54-61.
JIANG Hong-xia, WU Ya-sheng, LUO Xiao-rong, et al. Diagenesis and Controls on the Physical Properties of the Triassic Chang-8 Oil Reservoirs in the South-central Part of the Ordos Basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(1): 54-61.
- [18] 库丽曼, 刘树根, 朱 平, 等. 成岩作用对致密砂岩储层物性的影响——以川中地区上三叠统须四段气藏为例[J]. 天然气工业, 2007, 27(1): 33-36.
KU Li-man, LIU Shu-gen, ZHU Ping, et al. Influence of Diagenesis on Poroperm Characteristics of Tight Sand Reservoirs—Taking the Gas Reservoirs in the 4th Member of Xujiahe Formation in the Upper Triassic as Examples [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(1): 33-36.
- [19] 李 红, 柳益群, 刘林玉. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长 8₁ 低渗透储层成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 209-217.
LI Hong, LIU Yi-qun, LIU Lin-yu. Diagenesis of Chang-8₁ Reservoir with Low Permeability in Xifeng Oilfield, Ordos Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2006, 27(2): 209-217.
- [20] 黄思静, 侯中健. 地下孔隙率和渗透率在空间和时间上的变化及影响因素[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 224-232.
HUANG Si-jing, HOU Zhong-jian. Spatio-temporal Variation of Subsurface Porosity and Permeability and Its Influential Factors [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 224-232.
- [21] 郭少斌, 杜 佳, 林小云. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 2 油层组次生孔隙控制因素及有利区预测[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(4): 236-238.
GUO Shao-bin, DU Jia, LIN Xiao-yun. Control Factors for Secondary Porosity and Prediction of Potential Development Area of Triassic Chang-2 Formation in Ordos Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(4): 236-238.
- [22] 冯娟萍, 李文厚, 欧阳征健, 等. 河流相和三角洲相储层成岩作用及其对储层的影响——以青化砭油田长 2 油层组和长 6 油层组砂岩为例[J]. 地球学报, 2008, 29(2): 189-198.
FENG Juan-ping, LI Wen-hou, OUYANG Zheng-jian, et al. Diagenesis and Its Influence on Reservoir Quality of Fluvial and Delta Sandstone—A Case Study of the Upper Triassic Sandstones of Chang-2 and Chang-6 Formations in the Qinghuabian Oil Field [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(2): 189-198.
- [23] 伏万军. 黏土矿物成因及对砂岩储集性能的影响[J]. 古地理学报, 2000, 2(3): 59-68.
FU Wan-jun. Influence of Clay Minerals on Sandstone Reservoir Properties [J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(3): 59-68.
- [24] 刘辰生, 郭建华, 苏 娟. 塔里木盆地阿克库勒地区石炭系卡拉沙依组成岩作用[J]. 新疆地质, 2005, 23(3): 288-291.
LIU Chen-sheng, GUO Jian-hua, SU Juan. Diagenesis of Kalashayi Formation, Carboniferous, Akekule Area, Tarim Basin [J]. Xinjiang Geology, 2005, 23(3): 288-291.
- [25] 严继新, 赵习森, 何云峰, 等. 塔里木盆地巴什托油气田石炭系碳酸盐岩沉积相特征[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 353-358.
YAN Ji-xin, ZHAO Xi-sen, HE Yun-feng, et al. Sedimentary Facies of Carboniferous Carbonate Rock in Bashitop Oilfield, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(4): 353-358.
- [26] 梁积伟, 王若谷, 刘振军, 等. 鄂尔多斯盆地安塞油田塞 202 井区长 6₁ 储层成岩作用[J]. 西安科技大学学报, 2012, 32(2): 228-233.
LIANG Ji-wei, WANG Ruo-gu, LIU Zhen-jun, et al. Diagenetic characteristics of the Chang-6₁ Reservoir of Sai202 Well Area in Ansai Oilfield of Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2012, 32(2): 228-233.
- [27] 肖莹莹, 樊太亮, 王宏语. 苏德尔特油田南屯组成岩作用与储集层特征[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(1): 23-25.
XIAO Ying-ying, FAN Tai-liang, WANG Hong-yu. Diageneses and Reservoir Characteristics of Nantun Formation in Sudeerte Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(1): 23-25.
- [28] 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 Da-kang, ZHU Xiao-min, ZHOU Xin-yuan, 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.
- [29] 钟大康,朱筱敏,周新源,等. 次生孔隙形成期次与溶蚀机理——以塔中地区志留系沥青砂岩为例[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 21-24.
- ZHONG Da-kang, ZHU Xiao-min, ZHOU Xin-yuan, et al. Phases of Secondary Pore Generation and Dissolution Mechanism—Taking Silurian Asphaltic Sandstone in Central Tarim Basin as an Example[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 21-24.
- [30] 吕修祥,周新源,杨海军,等. 塔中北斜坡碳酸盐岩岩溶储层油气差异富集特征[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4): 441-452.
- LU Xiu-xiang, ZHOU Xin-yuan, YANG Hai-jun, et al. Differential Enrichment of Oil and Gas in Carbonate Karst Reservoir on Northern Slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(4): 441-452.
- [31] 余敏,朱吟,沈安江,等. 塔中北斜坡鹰山组碳酸盐岩溶蚀的模拟实验研究[J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 234-239.
- SHE Min, ZHU Yin, SHEN An-jiang, et al. Simulation Experiment for the Dissolution of Carbonate Rocks of the Yingshan Formation on the Northern Slope of Tazhong Uplift[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(3): 234-239.
- [32] 康志宏,陈琳,鲁新便,等. 塔河岩溶型碳酸盐岩缝洞系统流体动态连通性研究[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 110-120.
- KANG Zhi-hong, CHEN Lin, LU Xin-bian, et al. Fluid Dynamic Connectivity of Karst Carbonate Reservoir with Fracture and Cave System in Tahe Oilfield[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 110-120.
- [33] 邹光辉,王春和,玛丽克,等. 塔里木盆地古隆起斜坡对碳酸盐岩油气藏的控制作用[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(1): 6-9.
- WU Guang-hui, WANG Chun-he, MA Li-ke, et al. Controlling Effects of Paleo-uplift Slopes on Marine Carbonate Reservoirs in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(1): 6-9.
- [34] 温晓红,邓继学,苏敏文,等. 塔中I号气田东部碳酸盐岩储层的试井特征分析[J]. 天然气工业, 2012, 32(5): 36-38.
- WEN Xiao-hong, DENG Ji-xue, SU Min-wen, et al. Characteristics of Well Tests in the Carbonate Reservoirs of the Eastern Tazhong-1 Gas Field, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(5): 36-38.
- [35] 严威,王兴志,丁勇,等. 塔河南部奥陶系海西早期岩溶的发现[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2011, 33(3): 53-60.
- YAN Wei, WANG Xing-zhi, DING Yong, et al. The Discovery and Characteristics of Covered-pressurization Karst During Early Hercynian in South Tahe Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2011, 33(3): 53-60.
- [36] SURDAM R C, BOESE S, CROSSEY L J. Role of Organic and Inorganic Reactions in Development of Secondary Porosity in Sandstones[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(5): 635-642.
- [37] TAYLOR T R, GILES M R, HATHON L A, et al. Sandstone Diagenesis and Reservoir Quality Prediction: Models, Myths, and Reality[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1093-1132.
- [38] WELLER J M. Compaction of Sediments[J]. AAPG Bulletin, 1959, 43(2): 273-310.
- [39] WORDEN R H, BURLEY S D. Sandstone Diagenesis: The Evolution of Sand to Stone[C]//BURLEY S D, WORDEN R H. Sandstone Diagenesis: Recent and Ancient. Hoboken: John Wiley and Sons, 2003: 3-44.
- [40] 陈恭洋,周艳丽,胡勇. 碎屑岩储层岩石物理特征及岩性解释方法[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2011, 33(2): 21-27.
- CHEN Gong-yang, ZHOU Yan-li, HU Yong. The Petrophysics Characterization of Clastic Reservoir and the Methods of Lithology[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2011, 33(2): 21-27.
- [41] 赵宁,石强. 裂缝孔隙型火山岩储层特征及物性主控因素[J]. 天然气工业, 2012, 32(10): 14-23.
- ZHAO Ning, SHI Qiang. Characteristics of Fractured and Porous Volcanic Reservoirs and the Major Controlling Factors of Their Physical Properties[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(10): 14-23.
- [42] 黎菁,赵峰,刘鹏,等. 苏里格气田东区致密砂岩气藏储层物性下限值的确定[J]. 天然气工业, 2012, 32(6): 31-35.
- LI Qing, ZHAO Feng, LIU Peng. Determination of Lower Limits of Porosity and Permeability of Tight Sand Gas Reservoirs in the Eastern Block of the Sulige Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(6): 31-35.