

层序格架内成岩特征差异及其成因机制

韩如冰¹, 田昌炳¹, 孙海航², 王培俊², 徐怀民³, 李维禄³

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000;
3. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249)

摘要:综合利用各项资料,结合孔隙演化定量研究方法,对层序格架内成岩特征差异及成因机制进行研究。结果表明:层序格架内成岩特征差异包括层序界面和层序单元两个方面;层序界面对胶结作用和溶蚀作用控制较强,界面附近胶结物含量一般更高,部分层序界面附近溶蚀强度更大;层序单元方面,受层序演化控制,不同单元沉积环境、沉积物特征不同,经历相同的成岩过程后,其压实、胶结、溶蚀作用强度不同;对于压实作用,早期海侵前滨砂岩和早期高位过渡带砂岩强度较高,而晚期海侵临滨砂岩程度较弱;对于胶结作用,早期高位过渡带砂岩、早期海侵前滨砂岩、晚期海侵临滨砂岩胶结强度依次减弱;对于溶蚀作用,早期海侵前滨砂岩、晚期海侵临滨砂岩、早期高位过渡带砂岩强度依次增强。

关键词:层序;成岩作用;东河砂岩;层序界面;层序单元

中图分类号:TE 121.3

文献标志码:A

引用格式:韩如冰,田昌炳,孙海航,等. 层序格架内成岩特征差异及其成因机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(2):12-20.

HAN Rubing, TIAN Changbing, SUN Haihang, et al. Sequence stratigraphy's control on diagenesis and its mechanisms [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(2): 12-20.

Sequence stratigraphy's control on diagenesis and its mechanisms

HAN Rubing¹, TIAN Changbing¹, SUN Haihang², WANG Peijun², XU Huaimin³, LI Weilu³

(1. Research institute of petroleum exploration and development, Beijing 100083, China;

2. Tarim Oilfield Corporation, PetroChina, Korla 841000, China;

3. College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: With a comprehensive use of multiple data and calculation method of porosity evolution, the mechanisms and differences in diagenesis characteristics of sequence stratigraphy framework were studied. The results show that the differences in diagenesis include sequence boundary level and sequence unit level. Sequence boundary has strong effects on cementation and dissolution. Compared with the sequence unit, the content of cements and degree of dissolution near sequence boundary are significantly higher. For the sequence units, the sequence framework controls the sedimentary environment and characteristics of the sediments. After diagenesis, the strength of compaction, cementation and dissolution of each sequence unit may be different. For compaction, the sequence framework controls the characteristics of the sediments, such as grain sorting and composition. The strength of compaction of early transgressive system tract (E-TST) and early high stand system tract (E-HST) is higher than late transgressive system tract (L-TST). For cementation, the sequence framework controls the geochemical characteristics of the pore water, the source of calcium and the distribution of feldspar, and the content of cements of E-HST, E-TST and L-TST decreased in sequence. For dissolution, the sequence framework controls the geochemical characteristics of the pore water and the source of cements, and the degree of dissolution of L-TST, E-TST and E-HST increases in sequence.

Keywords: sequence stratigraphy; diagenesis; Donghe sandstone; sequence boundary; sequence unit

收稿日期:2016-10-06

基金项目:国家科技油气专项(2011ZX05009-003)

作者简介:韩如冰(1988-),男,博士研究生,研究方向为油田开发地质。E-mail:harbin2018@163.com。

通讯作者:徐怀民(1962-),男,教授,研究方向为油藏地质评价、油田开发地质。E-mail:xuhuaimin@sina.com。

东河 1 油田位于塔里木盆地塔北隆起中段,是一个受北界逆断层控制的北东-南西走向的短轴背斜。东河砂岩油藏为受构造控制的具有统一油水界面的块状底水油藏。生产动态研究发现东河砂岩层间非均质性对油气开采影响较大,造成垂向动用不均和注入水单层突进。东河砂岩油藏主体上是一套分布相对稳定的前、临滨海相砂岩沉积^[1-2],沉积时储层性质好,后期构造运动影响较弱,储层物性变化主控因素为成岩作用。目前国外学者针对层序格架内储层成岩特征差异研究主要集中于碳酸盐岩,对砂岩储层研究相对少,且大多数仅利用微观观察对不同层序单元内部成岩特征进行描述,深入的定量研究较少^[3-5]。中国学者相关研究起步较晚,受资料限制,定性描述居多,缺乏系统研究和定量评价^[6-7]。笔者利用研究区丰富的分析化验资料,采用定性与

定量相结合的方法对层序格架内成岩特征差异及其机制进行研究。

1 层序地层特征

在前人基础上^[2],结合露头、岩心、地震和测井资料,将东河砂岩划分为 1 个三级层序、3 个体系域(准层序组)、9 个准层序。

1.1 层序界面识别

首先识别三级层序界面,在三级层序框架内对四级、五级层序界面进行研究。露头、岩心、地震剖面均发现东河砂岩下部角度不整合于泥盆系或志留系沉积,其上与含砾砂岩段不整合接触,顶底均为三级层序界面。据此将东河砂岩划分为三级层序^[2](图 1)。

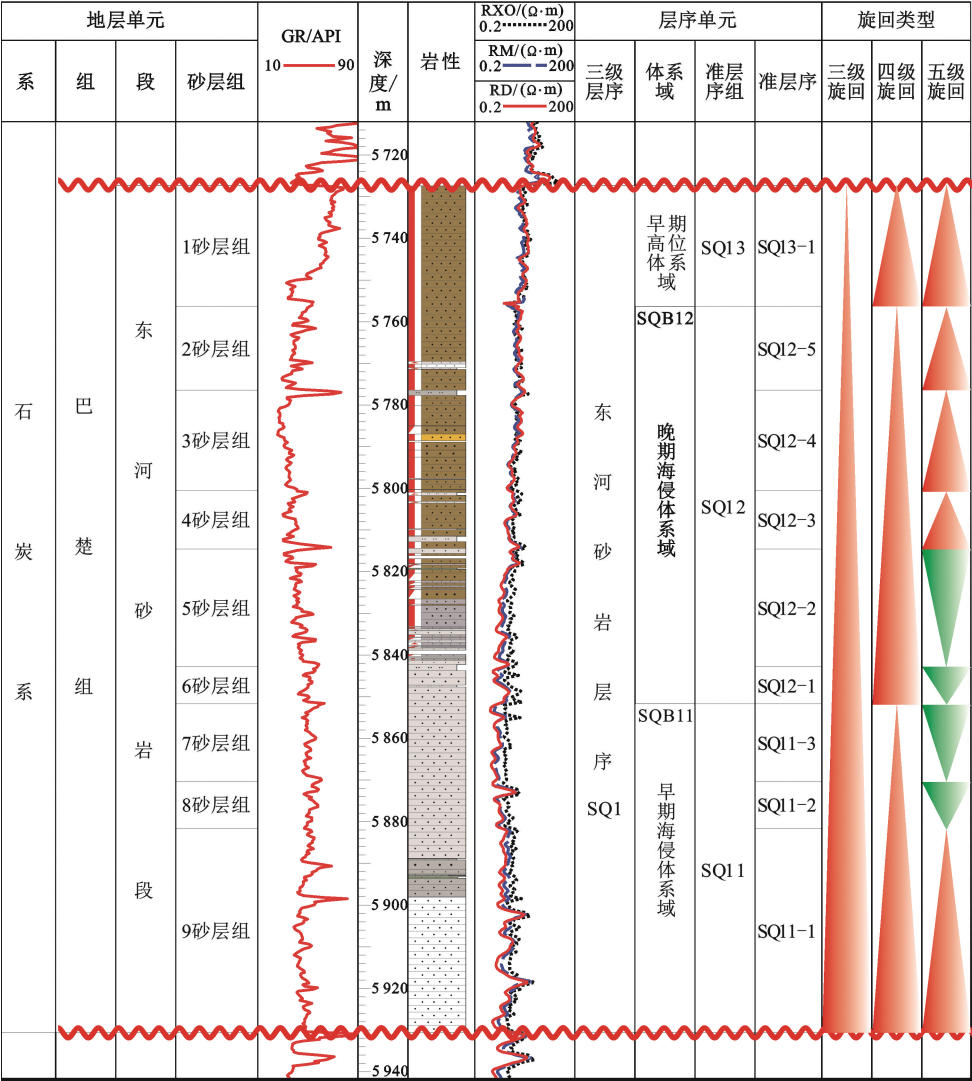


图 1 DH1 井东河砂岩层序地层划分方案

Fig.1 Sequence stratigraphic framework of Donghe sandstone in well DH1

本次研究共识别出 SQB11、SQB12 两个四级层序界面,在露头、岩心上均显示为较大规模海泛时形成的分布稳定的泥质层,岩性包括泥岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩等,对应于 GR 曲线高值,界面上下测井曲线差异明显。部分界面附近钙质胶结增强,界面之上生物扰动较强,之下生物扰动减弱,地震上对应于中强振幅、高连续性地震反射轴。

利用垂向分辨率较高的岩心、测井资料对五级层序界面进行识别,识别标志包括岩性、岩性组合及叠加样式、旋回对称性、小型冲刷面及测井曲线形态突变现象等。

1.2 层序地层格架

结合四级层序界面,根据相对海平面变化特征,将东河砂岩层序划分为早期海侵体系域(E-TST)、晚期海侵体系域(L-TST)和早期高位体系域(E-HST)^[3],各含 1 个准层序组。早期和晚期海侵体系域发育时相对海平面不断上升,且早期海侵体系域相对海平面上升速率低于晚期海侵体系域发育前期,分别发育前滨亚环境和临滨亚环境;早期高位体系域发育时,相对海平面处于高位,上升速率显著降低并继续缓慢上升,逐渐达到最大值,发育过渡带亚环境(位于平均低潮面和风暴浪基面之间)。结合五级层序界面将各体系域细分为 9 个准层序,代表 9 个低级次相对海平面变化旋回,分别对应 9 个砂层组(图 1)。

1.3 层序单元特征

东河砂岩性为灰白色或绿灰色(含油时为棕褐

色)细砂岩、粉砂岩,总体上成分、结构成熟度均较高。前人认为东河砂岩是一套石炭系早期的海侵沉积,广泛发育无障壁浪控滨岸体系^[2],本文中共识别出 3 个沉积亚环境:由岸向海依次为前滨、临滨以及过渡带。层序格架控制了滨岸环境的空间迁移,造成研究区垂向上由老到新为早期海侵-前滨、晚期海侵-临滨和晚期高位-过渡带的层序沉积分布。

大量岩心分析资料表明不同层序沉积单元沉积物特征存在差异(表 1)。对于颗粒矿物成分,晚期海侵体系域砂岩石英含量较高、长石和岩屑含量较低;而早期海侵和早期高位体系域砂岩石英含量相对低、长石和岩屑含量相对高。对于填隙物成分,由早期海侵至早期高位体系域,泥质含量逐渐增加,黄铁矿胶结物含量逐渐降低,碳酸盐胶结物呈“高一中一低”趋势。对于高岭石(占黏土矿物相对含量大于 90%)绝对含量,由早期海侵至早期高位体系域逐渐增大。对于平均粒径,晚期海侵临滨沉积最大,早期海侵前滨沉积次之,早期高位过渡带沉积最小。对于分选,受沉积环境影响,早期海侵体系域前滨砂岩受到海水的反复冲刷、淘洗,分选最好。晚期海侵体系域临滨砂岩在水动力和海底地形的相互作用下,形成了滩坝沉积,分选次之。早期高位体系域过渡带砂岩为间歇性沉积,分选最差。对于储层物性,晚期海侵临滨沉积最好,早期海侵前滨沉积次之,早期高位过渡带沉积最差,由下之上呈现“中一高一低”趋势。

表 1 东河砂岩各层序单元岩心分析特征

Table 1 Mineral composition of different sequence stratigraphic units in Donghe sandstone

体系域	颗粒相对含量			填隙物绝对含量			高岭石 绝对含 量/%	平均粒径/ mm	颗粒分 选系数	平均孔隙 度/%	平均 渗透率/ 10 ⁻³ μm ²
	石英/ %	长石/ %	岩屑/ %	泥质/ %	碳酸盐胶 结物/%	黄铁矿/ %					
早期高位	64.5	8.9	26.6	5.87	5.87	0.102	2.71	0.13	1.37	14.26	15.61
晚期海侵	73.4	5.0	21.6	4.68	4.68	0.247	2.63	0.19	1.31	15.62	93.52
早期海侵	67.1	10.4	22.5	2.86	6.96	0.464	2.46	0.16	1.25	14.50	23.09

注:通过薄片和扫描电镜观察,发现泥质填隙物主要包括黏土矿物胶结物和细粒碎屑物质,其中黏土矿物胶结物为主要成分,相对含量一般大于 80%。

2 成岩作用特征

综合利用各项分析化验资料,对研究区东河砂岩所经历的成岩作用类型和所处成岩阶段进行整体研究。

2.1 成岩作用类型

研究发现东河砂岩所经历成岩作用主要包括压实作用、胶结作用、溶蚀作用和交代作用。

对于压实作用,薄片观察发现东河砂岩主要的接触关系为点接触和线接触,缺少凹凸接触和缝合接触,以机械压实为主,化学压实较少,整体较弱^[1]。胶结作用在早成岩、中成岩阶段均可发生,主要胶结物为碳酸盐、黏土矿物、硅质及黄铁矿,含量依次降低(图 2)。碳酸盐胶结是最主要的胶结物类型,胶结物包括方解石、白云石、铁方解石和铁白云石,绝对含量分别为 4.67%、1.42%、0.85% 和

0.78%。综合露头、岩心、薄片、碳氧稳定同位素分析、微量元素分析等资料,结合前人研究成果^[8-9],将成因分为 3 类:浅埋藏淡水成因、蒸发作用成因以及深埋藏环境成因。黏土矿物是重要的胶结物类型,区内黏土矿物胶结物绝对含量平均值为 2.72%。其中,高岭石相对含量为 92.34%,伊利石为 6.82%,伊蒙混层为 0.84%。硅质胶结在研究区主

要为石英次生加大,在东河砂岩中非常普遍,但含量低。石英胶结物大多充当碎屑石英颗粒周缘厚度在 10~100 μm 的同轴、自形加大,也可呈微晶石英包围颗粒、部分甚至完全堵塞粒间孔隙。黄铁矿胶结物含量少,绝对含量平均值仅为 0.22%,但可指示缺氧还原性质的成岩环境,对成岩环境的判断具有重要意义。

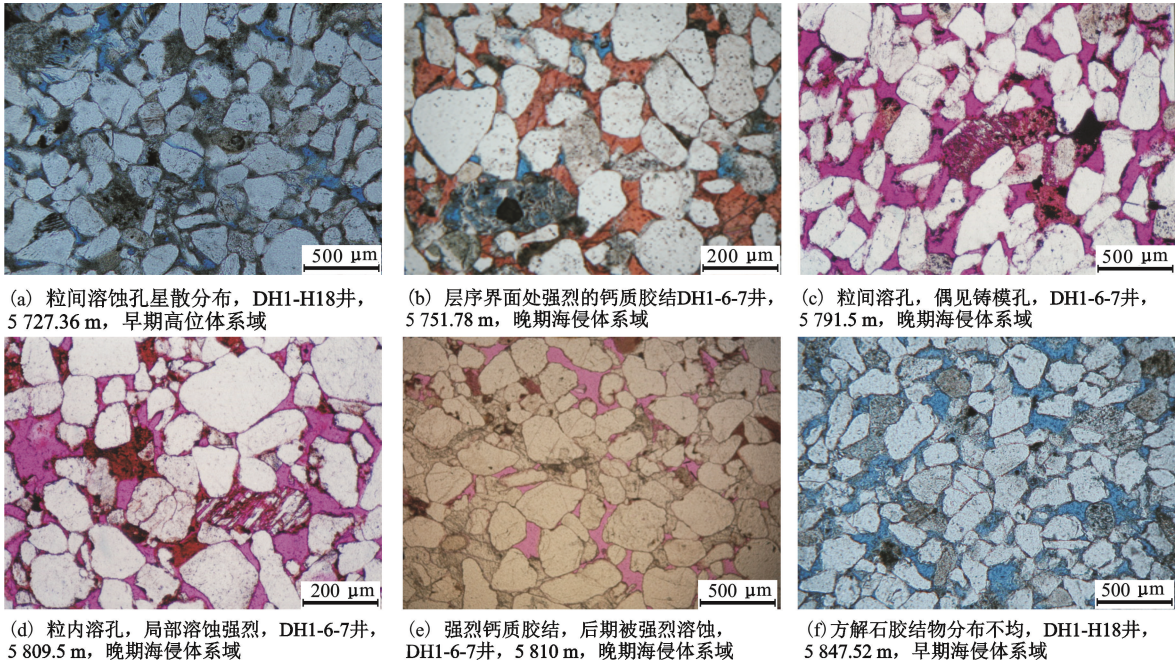


图 2 东河砂岩铸体薄片特征

Fig.2 Casting thin sections of Donghe sandstone

通过薄片和扫描电镜观察,发现溶蚀作用分布广泛,总体程度低,主要包括长石、碳酸盐胶结物的溶蚀。交代作用主要类型为高岭石交代长石,方解石交代石英、方解石交代长石、少量铁方解石与铁白云石交代石英、长石、岩屑等。

2.2 成岩作用阶段

在前人研究基础上,对东河砂岩成岩阶段进行研究,认为其早石炭世沉积之后直到古近纪较长地质时间的浅埋藏(深度小于 2500 m)属早成岩期,从新近纪至今较短时间的深埋藏(深度大于 2500 m)属中成岩 A 期^[10]。

3 孔隙演化特征

成岩作用的强弱影响储层物性,直接体现在对储层孔隙度的控制上,因此首先进行储层孔隙演化研究,明确各成岩作用造成的孔隙度变化。

选取 DH1-6-6、DH1-6-7、DH1-6-8 和 DH1-H18 等 4 口取心井的粒度及薄片分析资料,分别计

算原始孔隙度,压实作用、胶结作用引起的孔隙度变化^[11-12](图 3)。

研究表明,压实作用造成孔隙减少 26.13%,胶结作用造成孔隙减小 7.81%。对于压实作用,早期海侵前滨砂岩和早期高位过渡带砂岩引起孔隙减小较明显,而晚期海侵临滨砂岩程度较弱;对于胶结作用,早期高位过渡带砂岩引起孔隙减小程度较高,其次为早期海侵前滨砂岩,晚期海侵临滨砂岩程度较低。

对 DH1-H18 井进行薄片观察,结果表明长石平均溶蚀面孔率为 0.91%,其中早期海侵、晚期海侵和早期高位体系域砂岩溶蚀面孔率逐渐增大;碳酸盐胶结物平均溶蚀面孔率为 2.28%,其中早期海侵和早期高位体系域砂岩溶蚀面孔率高,晚期海侵体系域砂岩溶蚀面孔率相对小(图 4)。总体上,早期海侵、晚期海侵和早期高位体系域砂岩溶蚀强度依次增强。

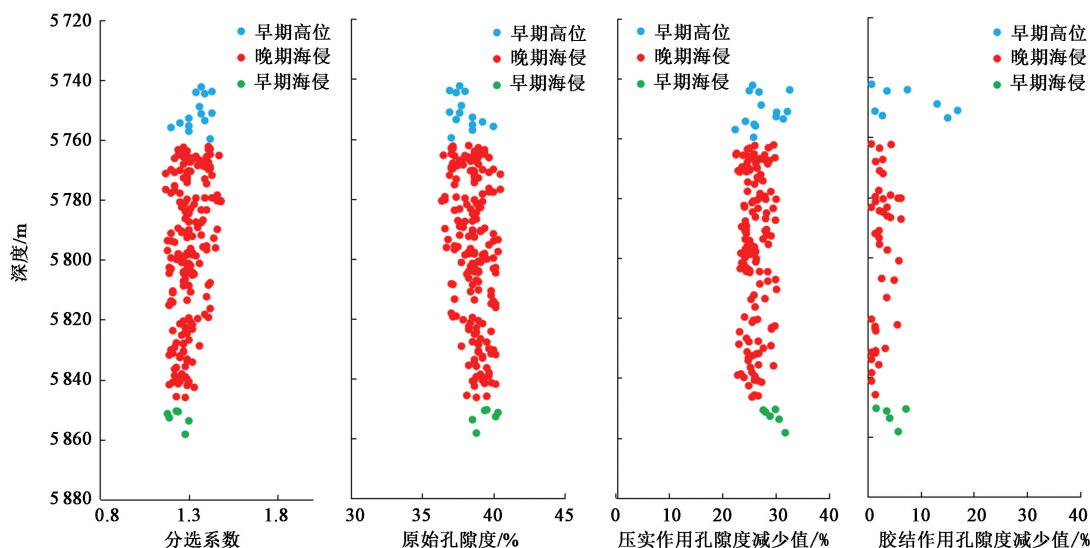


图3 东河砂岩孔隙演化定量评价

Fig. 3 Quantitative evolution of pores in Donghe sandstone

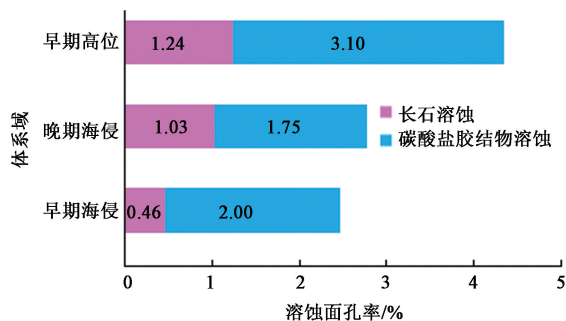


图4 DH1-H18井溶蚀孔隙面孔率

Fig. 4 Dissolution porosity of Donghe Sandstone in well DH1-H18

4 层序格架内成岩特征差异

层序格架内成岩特征差异主要体现在层序界面和层序单元两个方面。区内东河砂岩厚度为150~200 m,而埋深大于5 500 m,可以近似认为在成岩过程中层序格架内部成岩演化路径相同,忽略埋深对内部成岩特征差异的影响。

4.1 层序界面引起的成岩特征差异及其机制

东河砂岩层序界面对胶结、溶蚀的强度变化均具有较强的控制作用。

4.1.1 胶结作用

层序单元内部相比,层序界面附近碳酸盐胶结、黏土矿物胶结更为发育。

露头、岩心观察发现,不同体系域内,胶结作用在界面附近的分布特征存在差异。在早期海侵和晚期海侵体系域内部,前、临滨砂岩内强烈的碳酸盐胶结常与泥质层序界面伴生,碳酸盐胶结可位于其上部、下部、与其互层或者形成钙泥质隔夹层,甚至独

立存在作为层序界面^[8,13-15]。对不同厚度钙质隔夹层进行研究,发现厚度大于0.5 m的可对应于体系域和准层序组甚至准层序界面;厚度0.15~0.5 m的可对应于准层序界面;厚度小于0.15 m的在砂岩内部随机分布。对于早期高位体系域,强烈的胶结作用常发生于砂泥岩界面处,部分砂泥岩界面为层序界面。通过DH1-6-9井铸体薄片系统观察,分析发现随距层序界面的距离减小,碳酸盐胶结物含量有增大趋势,层序界面附近碳酸盐胶结更为发育(图5(a)中绿色虚线内样点厚度小于或等于0.2 m,在砂岩内部随机分布)。

由于高岭石胶结物占黏土矿物胶结物的90%以上,研究主要对其含量分布进行研究。前人研究表明,砂岩中高岭石形成的母体物质为长石,其成因有两种:①物源高岭石,母岩的风化阶段长石溶蚀即可生成,在搬运过程中继承和发展,原有高岭石晶型受到不同程度的破坏;②成岩高岭石,在成岩过程中形成,又可分为直接析出成因和交代成因^[16-20]。SEM观察发现区内高岭石主要为成岩高岭石,镜下显示以长石溶蚀产物直接析出成因为主,晶型好,呈假六方板状或不规则板状,集合体呈书页状、蠕虫状,常与粒间自生石英伴生,充填孔隙空间,甚至堵塞孔隙,而交代成因高岭石含量较低,呈不规则的片状分布于长石颗粒表面,晶型差。对自生高岭石形成后观察进一步分析,研究发现东河1油田和附近区块东河4油田、东河6油田高岭石绝对含量及垂向变化趋势较为接近,相对含量均为80%~95%。通过扫描电镜和薄片观察,未发现高岭石胶结物在

垂向上、平面上或区块内部、区块之间存在大规模迁移现象,因此高岭石胶结物从孔隙水析出后,大部分原地堆积,含量可指示长石溶蚀作用的强弱。对 DH1-6-9 井 X 衍射分析结果进行研究,发现随样品与最近层序界面距离减小,高岭石胶结物含量有升高的趋势(图 5(b)),究其原因,主要为层序界面处渗透性好,成岩过程中长石溶蚀作用所致。一方

面,区内黏土矿物作为胶结物存在;另一方面,黏土矿物含量也可指示溶蚀作用的强弱。

上述分析表明,层序界面对碳酸盐胶结和黏土矿物胶结均有控制作用。实际上,二者之间也存在一定关系:随着黏土矿物绝对含量增加,碳酸盐胶结物含量逐渐降低(图 5(c)),黏土矿物胶结物的存在可抑制碳酸盐胶结。

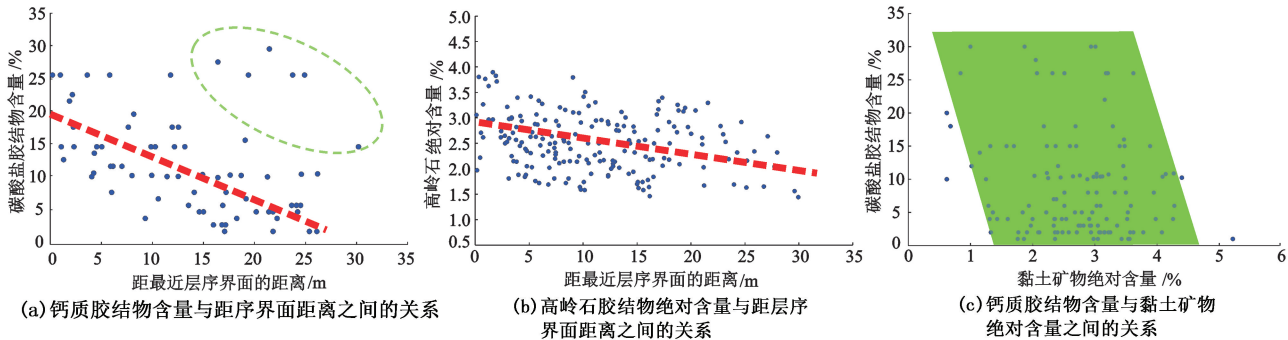


图 5 DH1-6-9 井系统取样分析
Fig. 5 Systemic analysis of cores in well DH1-6-9

4.1.2 溶蚀作用

薄片和扫描电镜观察发现各级层序界面对长石和碳酸盐胶结物的溶蚀控制较强(图 2(e)、图 5(c))。对 DH1-6-9 井进行系统研究,结果表明距层序界面越近、自生高岭石含量越高,指示长石溶蚀强度越大(图 5(b))。

层序界面对胶结和溶蚀均有较强的控制作用。一般层序界面附近胶结致密处由于孔隙水难以进入导致溶蚀较弱,同时溶蚀作用较强处后期在条件适宜时可出现胶结作用,甚至可观察到不同期次的溶蚀-胶结旋回。

4.2 各层序单元成岩特征差异及其机制

综合利用各项资料,对层序格架内各层序单元压实、胶结和溶蚀特征差异进行研究。

4.2.1 压实作用

由孔隙演化研究结果可以看出,早期海侵前滨砂岩和早期高位过渡带砂岩压实强度较高,而晚期海侵临滨砂岩程度较弱。

首先对不同层序单元压实强度差异的控制因素进行研究。对于与沉积物相关的因素,如各层序单元分选、颗粒矿物成分存在差异,可导致压实强度出现差异。由于区内东河砂岩整体上分选较好,粒度、形状和圆度等都较为相近,本文未考虑其对压实作用的影响。对与沉积物无关的因素进行研究,结果表明由于东河砂岩整体上胶结、溶蚀强度不大,分布范围有限,且均为顺层分布,对砂体压实影响较小。

综上,对压实强度差异影响较大的因素为与沉积物相关的因素,即颗粒的分选和矿物成分。

对于分选而言,在不考虑其他因素条件下,早期海侵、晚期海侵和早期高位体系域砂岩依次变差,抗压实能力依次变弱。对于颗粒矿物成分而言,较稳定矿物如石英含量越高,骨架颗粒抗压实能力较强,压实造成的孔隙减小较少,压实强度越弱。理论上,晚期海侵体系域砂岩压实强度较弱,早期海侵和早期高位体系域砂岩压实强度较强。对于早期海侵砂岩,虽然分选较好,但由于其长石含量较高,抗压实能力较弱。

4.2.2 胶结作用

研究发现层序格架内各层序单元沉积环境、沉积物特征不同,各类胶结物分布特征亦不同:早期高位过渡带砂岩、早期海侵前滨砂岩、晚期海侵临滨砂岩胶结物含量依次降低,胶结作用依次减弱。下面对各类胶结物在不同层序单元内部含量变化及其机制进行研究。

通过对 DH1-6-9 井铸体薄片系统观察,发现早期海侵前滨砂岩和早期高位过渡带砂岩中碳酸盐胶结最为发育,晚期海侵临滨砂岩发育相对少(表 3)。研究发现不同成因碳酸盐胶结影响因素不同。研究区的碳酸盐胶结主要受钙质来源、蒸发环境、泥质含量和砂泥岩接触界面的影响。对于钙源,滨岸沉积一般为生物成因的钙质碎屑、灰岩岩屑以及斜长石等^[9]。薄片鉴定发现,东河砂岩钙源单一,主

要为钙质生物碎屑,临滨砂岩较前滨砂岩丰富,过渡带砂岩最差。对于蒸发环境,前滨砂岩位于潮间带,经常出露地表,蒸发作用强,临滨和过渡带砂岩均较差。对于泥质含量,前滨、临滨及过渡带砂岩含量依次增加,对碳酸盐胶结的抑制作用依次增强。对于砂泥岩接触界面,其附近砂岩与泥岩接触面积大,离子交换充分,是形成碳酸盐胶结的有利部位。研究发现对不同体系域内不同沉积类型砂体,碳酸盐胶结分布主控因素不同。对于早期海侵和晚期海侵的前、临滨砂岩,碳酸盐胶结分布的主控因素为蒸发环

境和钙质来源,在二者控制下,碳酸盐胶结在前滨砂岩最为发育、其次为临滨砂岩;对于过渡带砂岩,碳酸盐胶结分布的主控因素为砂泥岩接触界面,具备一定的钙质来源,其较为发育。整体上,前滨和过渡带砂岩碳酸盐胶结最为发育、临滨相对差(表1)。

东河砂岩黏土矿物胶结分布广泛,含量仅次于碳酸盐胶结(图6)。统计各层序单元黏土矿物总含量和高岭石绝对含量,整体趋势为早期海侵前滨砂岩、晚期海侵临滨砂岩、早期高位过渡带砂岩逐渐变高。

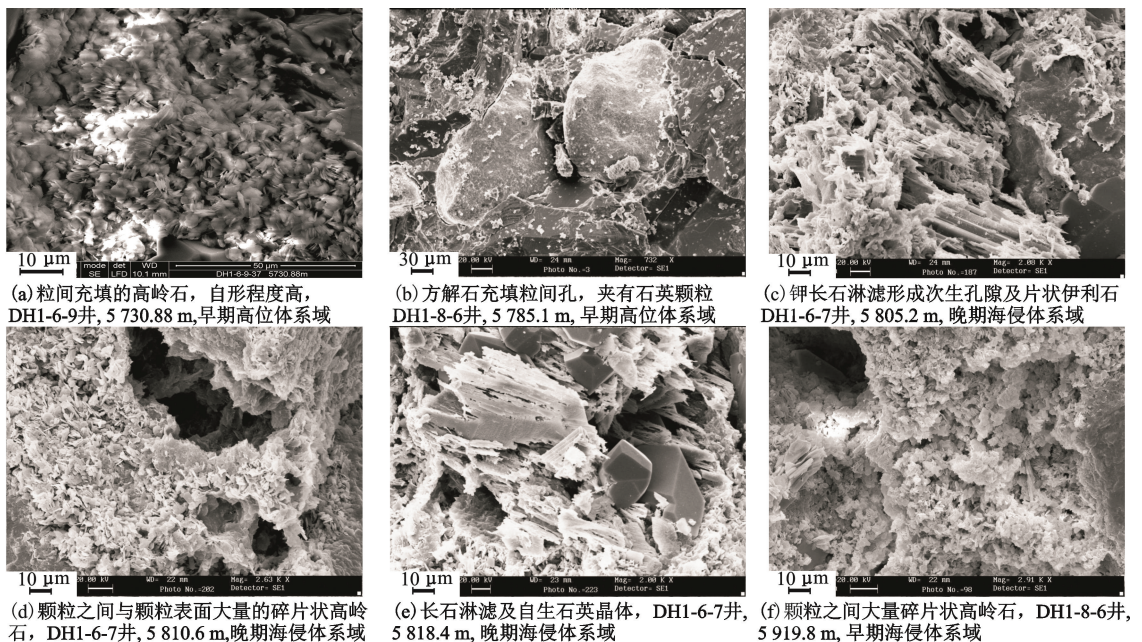


图6 东河砂岩扫描电镜特征

Fig. 6 SEM photos of Donghe sandstone

4.2.3 溶解(蚀)作用

对碳酸盐胶结、长石溶蚀在不同层序单元内部差异进行研究。

薄片观察表明早期海侵前滨砂岩和早期高位过渡带砂岩碳酸盐胶结物溶解孔隙面孔率分别为2%、3.1%,高于晚期海侵临滨砂岩的溶解孔隙面孔率1.75%(图4)。究其原因,可能与碳酸盐胶结物的分布有关。为证实这一观点,对碳酸盐胶结形成时孔隙水性质进行研究。前人研究发现,可通过碳酸盐胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 数值区分沉积水体的古盐度,从而区分形成环境,并给出具体公式:

$$Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50).$$

式中, Z 值大于120的碳酸盐应属海水型,小于120的碳酸盐属淡水型,而 Z 值接近120为未定型^[21]。对东河砂岩碳酸盐胶结物碳氧稳定同位素数据进行统计发现,研究区所有样点的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为-

7.243‰ ~ -2.040‰、 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-15.240‰ ~ -5.732‰。计算其 Z 值,结果均明显小于120,指示形成于相同的孔隙水性质——淡水型。东河砂岩为一独立油水系统,内部没有厚层分布稳定隔层,且形成强烈碳酸盐胶结时孔隙水性质相似,就此推断储层孔隙水性质在成岩演化过程中整体特征相近。由此可知,碳酸盐胶结物的溶蚀强度与碳酸盐胶结物的分布有关;早期海侵前滨砂岩和早期高位过渡带砂岩碳酸盐胶结物含量高,可供溶蚀的物质丰富,溶解作用强;反之晚期海侵临滨砂岩溶解作用弱。

对DH1-H18井铸体薄片进行系统观察,结果表明早期海侵、晚期海侵和早期高位体系域砂岩长石溶蚀强度逐渐增大。另外,统计结果表明早期海侵、晚期海侵和早期高位体系域自生高岭石平均含量分别为2.56%、3.75%和4.24%,数值依次升高,显示长石溶蚀强度依次增大(图4)。在碳酸盐胶结

溶解研究中曾推断成岩过程中储层整体孔隙水性性质接近,由于研究区长石成分较单一,主要为钾长石,因此长石溶蚀强度亦主要取决于其含量。理论上,对于长石的溶蚀,早期海侵和早期高位体系域砂岩长石含量较高、强度应较大,晚期海侵体系域砂岩长石含量较低、强度应较小(表1)。对于早期海侵砂岩长石溶蚀,理论分析认为强度较高似乎与薄片观察显示强度较低矛盾,对其进一步研究。薄片观察发现长石被溶蚀后,除了析出自生高岭石外,一部分直接析出形成石英次生加大,虽然被溶蚀的长石体积要明显大于次生加大的石英体积,但这一过程使长石溶蚀造成的孔隙增加显著减小,溶蚀孔隙面孔率减小,显示溶蚀强度降低。由于此种情况下长石溶蚀形成石英加大造成孔隙减小量难以获得,且对储层性质影响小,研究中对其忽略,仅考虑长石溶蚀后直接析出高岭石部分。

另外,长石的溶蚀也可使孔隙水中酸性物质含量增加,导致与晚期海侵体系域砂岩相比,早期海侵和早期高位体系域砂岩孔隙水酸性程度轻微增大,这也是导致碳酸盐胶结物溶蚀强度出现“强—弱—强”的原因之一。

5 结 论

(1)破坏性成岩作用中,压实作用平均造成孔隙减小数值为26.13%,胶结作用平均造成的孔隙减小数值为7.81%,压实作用对储层孔隙影响更大;建设性成岩作用中,溶蚀作用强度较弱,平均溶蚀面孔率为3.19%。

(2)层序界面对胶结作用和溶蚀作用控制较强。与单元内部相比,界面附近碳酸盐、黏土矿物等胶结物含量一般更高,特别对钙质胶结的产状和分布有较大影响,部分层序界面附近溶蚀作用强度更大。

(3)在颗粒分选和矿物成分等沉积特征影响下,早期海侵前滨砂岩和早期高位过渡带砂岩压实强度较高,而晚期海侵临滨砂岩程度较弱;层序格架控制了各层序单元内孔隙水地球化学性质、钙质来源和不稳定矿物长石的分布等,从而对碳酸盐、黏土矿物等胶结类型进行控制,总体上早期高位过渡带砂岩、早期海侵前滨砂岩、晚期海侵临滨砂岩胶结作用依次减弱;对于溶蚀,层序格架控制了孔隙水地球化学性质和胶结物分布,进而对长石、碳酸盐矿物等的溶蚀作用进行控制,总体上早期海侵前滨砂岩、晚期海侵临滨砂岩、早期高位过渡带砂岩强度依次增

强。

参考文献:

- [1] 顾家裕,张兴阳,郭彬程,等.塔里木盆地东河砂岩沉积和储层特征及综合分析[J].古地学报,2006,8(3):285-294.
GU Jiayu, ZHANG Xingyang, GUO Bincheng, et al. Characteristics of sedimentation and reservoir of the Donghe Sandstone in Tarim Basin and their synthetic analysis [J]. Journal of Palaeogeography, 2006,8(3):285-294.
- [2] LIU Jingyan, RONALD J S, LIN Changsong, et al. Geomorphology control on the development of reservoir depositional systems, Devonian Donghetang formation in the Tabei Uplift of the Tarim Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012,38(1):177-194.
- [3] DAVID J D, RICHARD L H. Lithofacies evolution from transgressive to highstand systems tracts, holocene of the Alabama Coastal zone[J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 1994,44:145-153.
- [4] MASOUMEH K, BRIAN T, SALEM A M K. Linking diagenesis to sequence stratigraphy in fluvial and shallow marine sandstones: evidence from the Cambrian-Ordovician lower sandstone unit in southwestern Sinai, Egypt [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(8): 1554-1571.
- [5] MORAD S, AL-RAMADAN K, KETZER J M, et al. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: a review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy[J]. AAPG Bulletin, 2010,94(8): 1267-1309.
- [6] 赖锦,王贵文,柴毓,等.库车坳陷白垩系巴什基奇克组成岩层序地层特征[J].沉积学报,2015,33(2):394-406.
LAI Jin, WANG Guiwen, CHAI Yu, et al. Diagenetic sequence stratigraphy characteristics of Lower Cretaceous Bashijiqike formation in Kuqa Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015,33(2):394-406.
- [7] 毕明威,陈世悦,周兆华,等.苏里格气田苏6区块盒8段致密砂岩储层次生孔隙成因探讨[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(1):8-16.
BI Mingwei, CHEN Shiyue, ZHOU Zhaohua, et al. Genesis of secondary pores of tight sandstone reservoir in He 8th Member in Su 6 area of Sulige gas field[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(1):8-16.
- [8] 韩如冰,刘强,江同文,等.钙质隔夹层特征、成因及分布:以塔里木盆地哈得油田东河砂岩为例[J].石油勘探与开发,2014,41(4):428-437.

- HAN Rubing, LIU Qiang, JIANG Tongwen, et al. Feature, origin and distribution of calcareous interlayers: a case of carboniferous Donghe sandstone in Hade Oil Field, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(4): 428-437.
- [9] BJØRKUM P A, WALDERHAUG O. Geometrical arrangement of calcite cementation within shallow marine sandstones[J]. *Earth-Science Reviews*, 1990, 29(1/2/3/4): 145-161.
- [10] 张关龙, 陈世悦, 鄢继华, 等. 东营凹陷郑家王庄地区沙河街组粘土矿物特征及其与储层伤害的关系[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(6): 7-12.
- ZHANG Guanlong, CHEN Shiyue, YAN Jihua, et al. Relation between clay mineral characteristics and formation damage of Shahejie group of Zhengjia-Wangzhuang areas in Dongying Depression[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2006, 30(6): 7-12.
- [11] 于川淇, 宋晓蛟, 李景景, 等. 长石溶蚀作用对储层物性的影响: 以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(6): 765-770.
- YU Chuanqi, SONG Xiaojiao, LI Jingjing, et al. Impact of feldspar dissolution on reservoir physical properties: a case from Dongying Sag, the Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(6): 765-770.
- [12] 李汶国, 张晓鹏, 钟玉梅, 等. 长石砂岩次生溶孔的形成机理[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 36(2): 220-229.
- LI Wenguo, ZHANG Xiaopeng, ZHONG Yumei, et al. Formation mechanism of secondary dissolved pores in arcose[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 36(2): 220-229.
- [13] 伏万军. 粘土矿物成因及对砂岩储集性能的影响[J]. *古地纪学报*, 2000, 2(3): 59-68.
- FU Wanjun. Influence of clay minerals on sandstone reservoir properties [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000, 2(3): 59-68.
- [14] 刘林玉, 柳益群, 陈刚. 吐鲁番坳陷中—上侏罗统碎屑岩中的自生粘土矿物特征及其成岩意义[J]. *岩石学报*, 1998, 14(2): 258-268.
- LIU Linyu, LIU Yiqun, CHEN Gang, et al. Property and diagenetic significance of authigenic clay mineral in upper and middle Jurassic clastic rock of Tulufan Depression, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(2): 258-268.
- [15] 朱筱敏, 赵澄林, 钟大康. 塔里木盆地东河砂岩沉积储层特征[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 93-108.
- [16] 张创, 孙卫, 高辉, 等. 基于铸体薄片资料的砂岩储层孔隙度演化定量计算方法: 以鄂尔多斯盆地环江地区长8储层为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(2): 365-375.
- ZHANG Chuang, SUN Wei, GAO Hui, et al. Quantitative calculation of sandstone porosity evolution based on thin section data: a case study from Chang8 reservoir of Huanjiang area, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 365-375.
- [17] HOUSEKNECHT D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones[J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(6): 633-642.
- [18] TAYLOR K G, MACHENT P G. Systematic sequence-scale controls on carbonate cementation in a siliciclastic sedimentary basin: examples from Upper Cretaceous shallow marine deposits of Utah and Colorado, USA [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(7): 1297-1310.
- [19] PROSSER D J, DAWS J A, FALLICK A E, et al. Geochemistry and diagenesis of stratabound calcite cement layers within the Rannoch formation of the Brent Group, Murchison Field, North Viking Graben (northern North Sea) [J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 87(1/2/3/4): 139-164.
- [20] KEVIN G T, PHILIP G M. Extensive carbonate cementation of fluvial sandstones: an integrated outcrop and petrographic analysis from the Upper Cretaceous, Book Cliffs, Utah[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(8): 1461-1474.
- [21] 林治家, 陈多福, 刘芊. 海相沉积氧化还原环境的地球化学识别指标[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(1): 72-80.
- LIN Zhijia, CHEN Duofu, LIU Qian. Geochemical indices for redox conditions of marine sediments[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(1): 72-80.

(编辑 徐会永)