

文章编号: 1000-0550 (2005) 03-0406-06

塔里木盆地阿克库勒凸起西缘东河砂岩 储集物性非均质性研究

郭建华¹ 石媛媛² 刘辰生¹ 朱 锐¹

1(中南大学地学与环境工程学院 长沙 410083) 2(长江大学地球科学学院 湖北荆州 434023)

摘 要 阿克库勒凸起西缘东河砂岩发育良好,但其岩性及其储集物性与塔里木盆地其它地区的东河砂岩相比则相差甚远。岩石类型主要有砂岩、泥岩及泥—粉砂过渡岩类。砂岩是区内主要的储集层。物性分析资料表明,储层以中—差为主,并且在垂向上与横向上均具有极强的非均质性。综合分析表明,储集物性的这种非均质性除了受层序格架中体系域控制之外,主要还受成岩作用的控制,尤其是碳酸盐的胶结与东河砂岩顶部 型层序边界的大气淡水淋滤溶蚀作用的控制。另一方面,高频海平面升降变化导致储层的储集物性在垂向上形成颇具特色的“韵律层”。

关键词 储层 非均质性 东河砂岩 阿克库勒地区

第一作者简介 郭建华 男 教授 博士生导师 沉积学与储层地质学

中图分类号 P588.2 **文献标识码** A

1 引言

阿克库勒凸起是塔里木盆地沙雅隆起带中的一个二级构造单元,其西为哈拉哈塘凹陷,东为草湖凹陷,北为雅克拉断凸所限,向南则过渡到盆地的另一一级构造单元北部拗陷带的满加尔凹陷(图 1)。受后期构造运动的影响,区内的构造格局主要呈现为走向北东—南西向的背斜古隆起,构造高部位位于轮南—塔河一线。加里东运动晚期(志留纪末),强烈的抬升使研究区下伏地层遭受不同程度的剥蚀,而海西早期的(泥盆纪晚期)由西南向东北的大规模海侵形成了向古隆起不断超覆、尖灭的一套地层。东河砂岩就是形成于这次海侵早期,超覆于不整合面之上的一套砂岩层,主要分布在该凸起的西部与西南部,最大厚度 96 m,由西至东或由西南向东北方向变薄直至尖灭。关于东河砂岩形成的时代问题,以及其形成的古地理环境、沉积相、储集特征等方面的问题,目前已有大量的研究成果^[1-5]。但是,通过笔者近期的专题研究,发现研究区内的东河砂岩在沉积岩相、储层的成岩作用及其对孔隙形成与演化的控制,以及储层特征等方面均与邻区相差较大。本文试图通过该区内东河砂岩的岩石学特征、成岩作用与成岩环境特征,揭示出影响和控制东河砂岩储层储集物性的关键

因素。

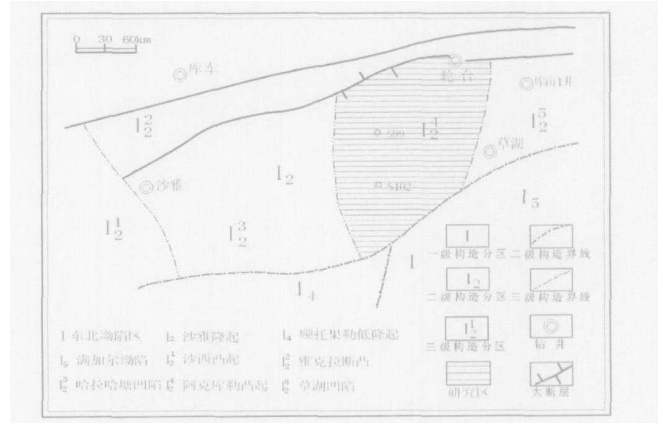


图 1 阿克库勒地区构造区划与研究区位置略图

Fig 1 Structural division and location of Akekule area

2 岩石学特征

阿克库勒地区的东河砂岩并不是纯净的、分选好的砂岩类型,对 11 口井的东河砂岩岩石类型的统计表明,砂岩类只占 43%,粉砂岩占 36%,而泥岩类却占了 21%。

砂岩类 主要呈灰白、灰褐色,部分砂岩呈紫红色,中厚层状。按三端元组份含量及粒径大小,区内砂岩的岩石类型主要为石英砂岩、岩屑石英砂岩、长

石质岩屑砂岩与岩屑质长石砂岩,长石砂岩与长石石英砂岩较少。粒径以中—细粒为主,分选好至中等。常见的沉积构造有中小型交错层理,大型单斜层理,平行层理,槽状交错层理,还见有双向交错层理和冲刷面构造。

粉砂岩类 主要为灰白色和红褐色。粒径从细粉砂至粗粉砂,以石英粉砂岩为主,中厚层状,发育的沉积构造有小型沙纹层理、波纹层理、水平层理、脉状与波状构造等。

以上两种岩石类型的碳酸盐胶结物含量较高,其含量大多在 5% ~ 20%,最高可达 46%;泥质含量通常为 2% ~ 8%。

泥岩类 以灰褐色、棕红色为主,还见有薄层状的灰绿色泥岩。灰褐、棕红色泥岩往往含有较多的粉砂质,组成含粉砂或粉砂质泥岩。在这种泥岩中,主要的沉积构造是水平层理、波痕和泥裂。灰绿色泥岩常较纯,呈薄层状夹于灰褐、棕红色泥岩中。

3 储层的物性特征

3.1 储层参数特征

塔里木盆地内其它地区的东河砂岩是以其砂质纯、物性好、储层均质性好为特征。但是,阿克库勒地区东河砂岩的储集物性表现为孔隙度和渗透率均较低,并且其物性非均质性还极强。从孔隙度及渗透率直方图中可清楚的看出样品的孔隙度主要分布在 2% ~ 12% 之间(图 2),渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 77% 之多。

通过 303 块岩样的储层物性参数统计表明,东河砂岩的最大渗透率值为 $154 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最小仅 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;平均渗透率值为 $5.41 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率值标准偏差为 17.59。由此可计算出东河砂岩储层的突进系数(最大渗透率值/平均渗透率值)为 28.5,渗透率级差(最大渗透率值/最小渗透率值)为 15 400,渗透率变异系数(渗透率值标准偏差/渗透率值算术平均值)为 3.25。这 3 个储层均质程度的参数反映了研究区东河砂岩具有极强的非均质性,与塔里木其它地区形成了鲜明的对比。

3.2 储层物性垂向上的变化特征

东河砂岩的孔隙度和渗透率在单井垂向上也存在极大的差异。以沙 99 井为例,在井深 5 868 m 之上孔隙度介于 10% ~ 20%,渗透率介于 $2 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;在这一界面之下,孔隙度基本小于 10%,尤其是在 5 876 m 之下孔隙度已小于 5%,渗透

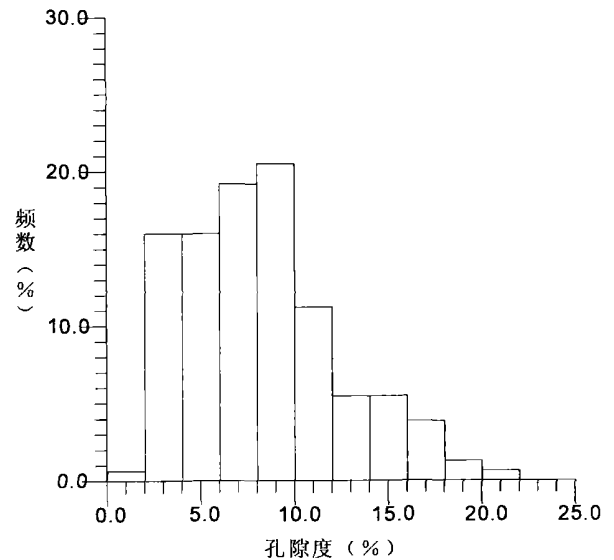


图 2 阿克库勒地区东河砂岩孔隙度分布直方图

Fig 2 Histogram of porosity distribution in Donghe sandstone in Akekule area

率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 3)。另一方面,孔隙度和渗透率值还呈多个米级的韵律变化现象。

4 储层非均质性控制因素分析

4.1 沉积体系域、沉积相带对东河砂岩储层非均质性的控制

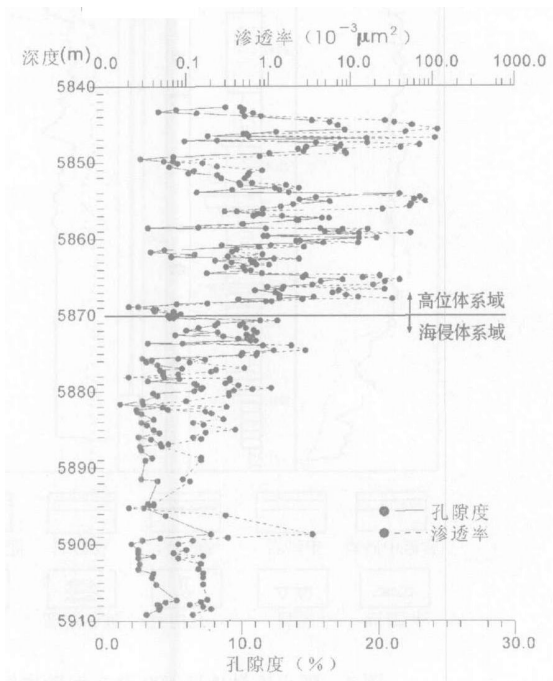


图 3 阿克库勒地区 S99 井东河砂岩孔隙度、渗透率垂向变化图

Fig 3 Vertical variety of porosity and permeability in Donghe sandstone of Well S99, Akekule area

区内层序地层学的研究表明,东河砂岩是一个完整的海平面升降旋回过程中沉积的一套地层,顶、底由两个不整合面为界的“型标准层序”^[1]。由于这种克拉通内凹陷型盆地与被动大陆边缘型盆地的形态差异,层序格架内低位体系域不发育,仅见低位晚期的河流充填沉积^[6,7],但海侵体系域与高位体系域发育。详细的沉积环境与沉积岩相的研究表明,区内东河砂岩海侵体系域是受潮汐控制的滨岸沉积,高位体系域则是以受波浪控制的滨岸沉积(图 4)。这两种不同性质的滨岸环境所形成的原始沉积物质及其特

征则具有明显的差异,正是这种差异导致了东河砂岩储集物性上的差异。高位体系域是以临滨和前滨沉积的砂体组成,这种沉积砂岩具有矿物组成的成分成熟度高,颗粒的分选性好,杂基含量极低的沉积特征。因此,高位体系域中的砂岩是极好的储层。相反,海侵体系域储层则是由潮下潮汐砂坝、潮间中—低坪砂体组成,其成分成熟度及颗粒的分选性能比受波浪控制的滨岸砂要差得多,因此,其储集物性也相差较多。另外,海平面的高频升降旋回所形成的副层序也导致了储集物性的非均质性。研究区内一个滨岸副层序

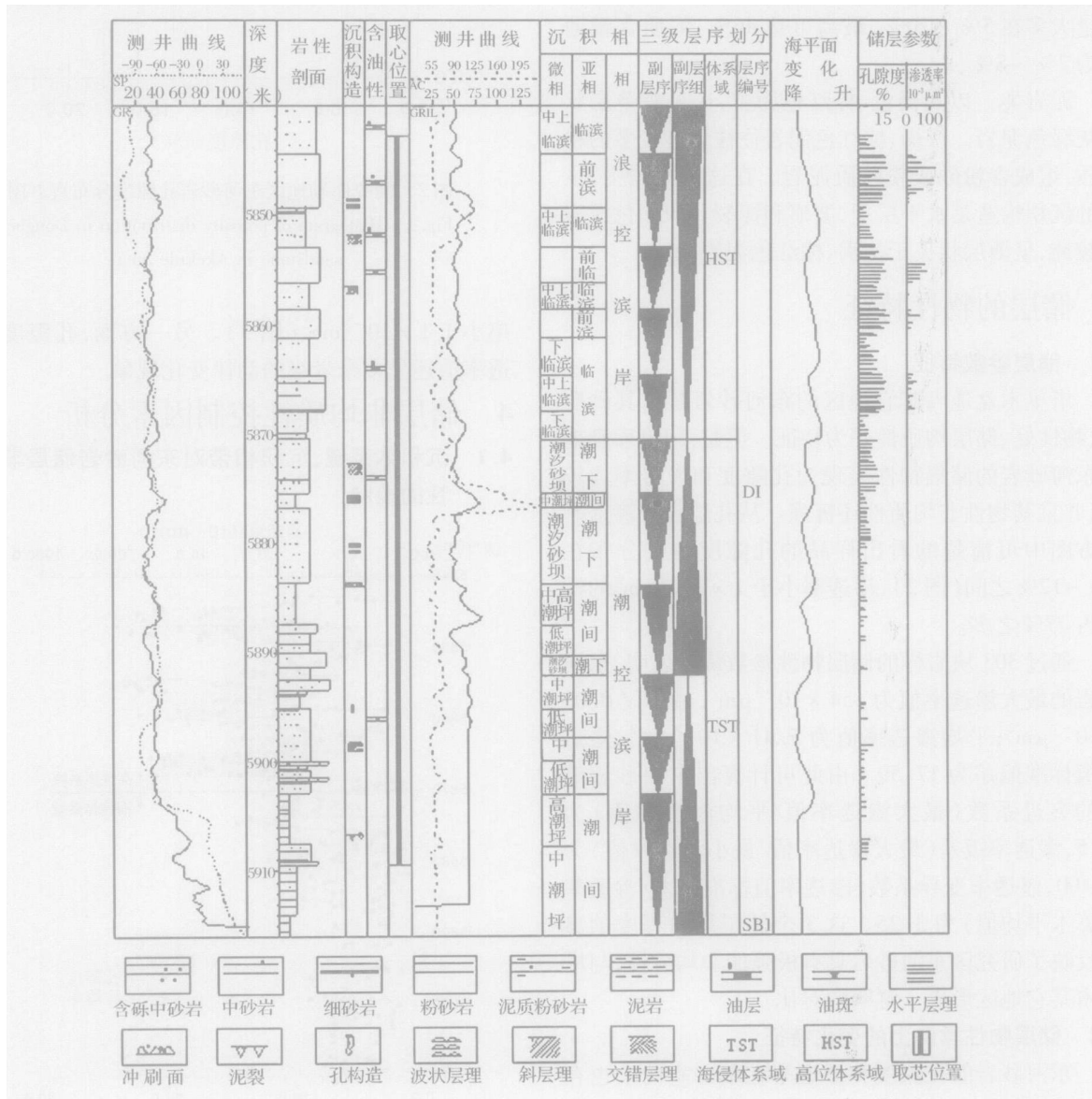


图 4 阿克库勒地区 S99井东河砂岩沉积体系域、沉积相带与储集物性的相关性
 Fig 4 Correlation between deposit system tract, deposit facies and reservoir quality in Donghe sandstone of Well S99, Akekule area

的组成自下而上往往由远下临滨至滨外开始,往上逐渐为下临滨、中上临滨,直至前滨沉积,组成一个向上不断变浅和变粗的沉积序列,储集物性则随之向上变好。多个副层序的叠加则导致储集物性的旋回性或韵律性(图 4),这种特性在含油性上也表现得极为明显。一个潮汐滨岸的副层序的组成自下而上往往由潮汐砂坝或潮间低潮坪沉积开始,往上逐渐过渡为潮间低潮坪、潮间中潮坪、潮间高潮坪,甚至到潮上坪,组成一个向上不断变浅但变细的沉积序列,储集物性越往上则越差,多个这种副层序的叠加也出现储集物性的旋回性或韵律性(图 4)。

4.2 成岩期碳酸盐的胶结作用对储层非均质性的控制

对岩心观察和储集物性分析表明,研究区东河砂岩的储集物性非均质较强,除了与原始沉积物有关外,还受碳酸盐胶结物含量大小的控制(图 5)。从图 5 中可以看出孔隙度的大小与碳酸盐胶结物的含量有密切的相关性,孔隙度大的区间对应的碳酸盐胶结物含量较少,而孔隙度小的区间对应的碳酸盐胶结物含量明显变大,说明碳酸盐胶结物含量是影响孔隙度大小的重要因素。研究区东河砂岩大多数样品的碳酸盐含量达 10% 以上,最高可达 46%。样品孔隙度和渗透率差值大,孔隙度约一半样品小于 10%;而渗透率则为低渗—特低渗,甚至为非储层。从地质背景分析,研究区位于轮南凸起的西南边缘,该区自中晚奥陶世开始直至三叠纪早期长期处于隆升剥蚀状态,大量的碳酸盐岩地层被剥蚀,因此,为其周边地层成岩期提供了丰富的碳酸盐物质(图 6)。碳酸盐胶结物含量在平面上的分布趋势大体上还是反映了越靠近碳酸盐剥蚀区其含量越高的趋势,而物性的变化趋势则越靠近碳酸盐剥蚀区物性越差。对塔中、满西地区来说,它远离碳酸盐岩地层剥蚀区,因此,东河砂岩的碳酸盐胶结物含量低,基本不超过 5%,这是其物性好的主要原因之一,但详细的碳酸盐胶结成岩机理及其对孔隙形成与演化的关系还需进一步研究。

4.3 型层序边界大气淡水的溶蚀作用对储层非均质性的控制

任何一个层序都经历过成岩作用的改造,因此,成岩地层学与层序地层学有密切的关系,特别是与表生成岩作用有非常密切的关系,在许多不整合面上形成区域性的成岩标志,如溶蚀作用、硅化作用、白云岩化作用、土壤化作用、交代作用等。目前,已有许多研究者都对成岩作用与层序地层学之间的关系进行了深入的研究^[8~10]。通过层序地层学的研究,本区东

河砂岩沉积之后即遭受暴露、剥蚀和大气淡水的淋滤溶蚀作用,靠近东河砂岩尖灭线的部分井中,高位体系域甚至被剥蚀。另一方面,上覆石炭系与塔中地区对比^[6],其底部已缺失了 2~3 个岩性段,也反映了东河砂岩沉积之后的暴露与剥蚀。大量的岩石薄片和扫描电镜的观察,发现越靠近东河砂岩的顶部型层序边界附近,粒间溶孔和粒内溶孔越发育,是主要的孔隙类型,铸体图像定量分析的结果也完全一致(表 1)。

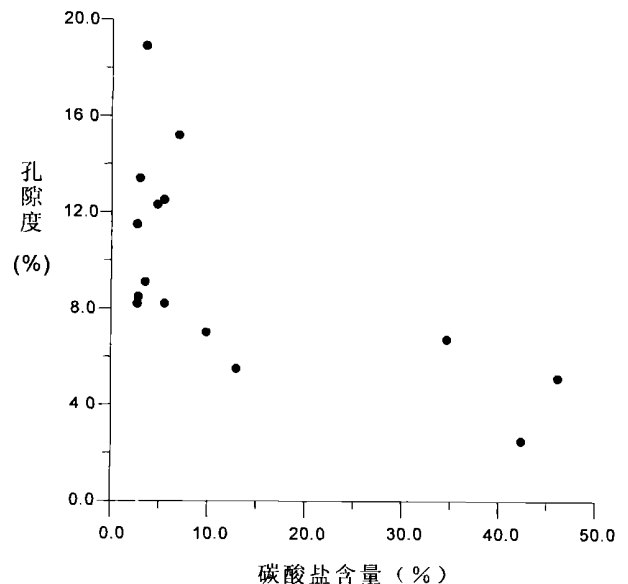


图 5 阿克库勒地区东河砂岩碳酸盐含量与孔隙度相关性图
Fig 5 Correlation between carbonate content and porosity
in Donghe sandstone of Akekule area

关于溶蚀孔隙的成因问题,人们普遍认为有机酸在地下岩石孔隙形成过程中具有决定性的作用^[11~14],但近期的研究认为,开放体系中大气水对砂岩骨架颗粒溶解产生次生孔隙的现象也是非常普遍的^[15],深埋地层中次生溶蚀孔隙增加现象的存在,并不能证明就是有机酸在深埋藏期溶蚀的结果,发生在大气水作用带的溶蚀作用形成的孔隙在以后的继续深埋藏过程中完全可以被保存下来^[16,17]。对本区东河砂岩碳酸盐胶结物中大量的包裹体分析表明,包裹体成分主要为气-液两相的无机包裹体,指示了成岩过程中有机酸的活动并不强烈。

5 结论

阿克库勒地区的东河砂岩明显的不同于塔里木盆地其它地区的东河砂岩,其岩性变化大,物性也较

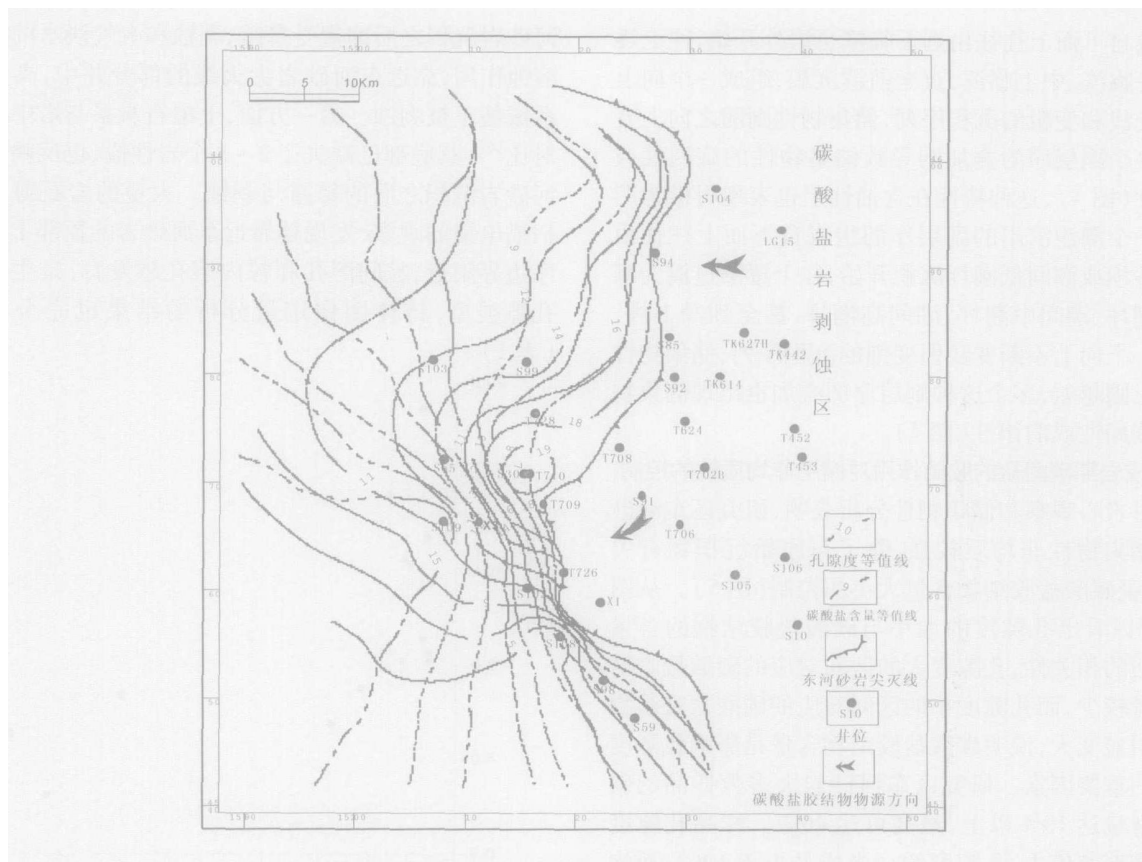


图 6 阿克库勒地区东河砂岩碳酸盐含量与孔隙度分布图

Fig 6 Carbonate content and porosity distribution in Donghe sandstone of Akekule area

表 1 阿克库勒地区 S99、S98井东河砂岩铸体图像孔隙定量分析表

Table 1 Image quantitative analysis of porosity in Donghe sandstone of Well S99 and S98

井号	样品深度 /m	岩性	孔隙总数 /%	面孔率 /%	原生孔		溶蚀孔		其它孔		备注
					个数 /%	面积 /%	个数 /%	面积 /%	个数 /%	面积 /%	
S99	5855.2	细砂岩	364	8.78	1.37	0.35	98.08	98.52	0.55	1.13	东河砂岩顶部层序边界深度: 5840 m
S99	5865.3	细砂岩	235	11.34	3.4	1.4	94.89	92.19	1.7	6.41	
S99	5874.2	细砂岩	304	7.83	14.8	7.12	84.87	90.74	0.66	2.14	
S99	5890.2	细砂岩	0	0							
S99	5905.1	粗粉砂岩	0	0							
S98	5313.5	细砂岩	255	2.55	8.24	8.54	91.77	91.45			东河砂岩顶部层序边界深度: 5306.5 m
S98	5321.4	细砂岩	277	2.02			100	100			
S98	5358.2	粗粉砂岩	0	0							
S98	5376.6	细砂岩	0	0							

差。造成这种差异的主要因素是研究区所处位置的特殊性,从其沉积环境分析,它位于紧邻碳酸盐剥蚀区的盆地边缘,海侵体系域主要为受潮汐控制的滨岸沉积,沉积微相主要包括潮下砂坝、潮间砂坪、砂泥混合坪,颗粒分选性差,杂基含量高,尤其是来源于碳酸盐剥蚀区的碳酸盐灰泥杂基含量高,并经过成岩期

碳酸盐灰泥的重结晶及多期次碳酸盐胶结作用,导致海侵体系域储层的物性极差,基本上为差储层或非储层。高位体系域本地区已演变为受波浪控制的滨岸,岩石颗粒分选性好,杂基含量低,储层物性好。尤其是沉积之后东河砂岩顶部的暴露与剥蚀作用,形成了典型的型层序边界,在这一层序边界之下,大气淡

水的淋滤对原始粒间孔进行改造,导致其储集空间均具溶蚀次生孔隙的特征。但成岩期紧邻碳酸岩剥蚀区的碳酸盐胶结物是使其物性变差的重要因素之一。

参考文献 (References)

- 郭建华,曾允孚,翟永红,等. 塔中地区石炭系东河砂岩层序地层研究. 沉积学报, 1996, 14(2): 56~65 [Guo Jianhua, Zeng Yunfu, Zhai Yonghong, *et al* Sequence stratigraphy of Carboniferous Donghe sandstone in Tazhong area, Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica* 1996, 14(2): 56~65]
- 顾家裕. 塔里木盆地石炭系东河砂岩沉积环境分析及储层研究. 地质学报, 1996, 70(2): 153~161 [Gu Jiayu. Sedimentary environment and reservoir characters of the Carboniferous Donghe sandstone in the Tarim basin. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 70(2): 153~161]
- 孙玉善,杨帆. 再论东河砂岩孔隙成因——以塔中地区为例. 沉积学报, 1999, 17(增刊): 609~705 [Sun Yushan, Yang Fan. Rediscussion pore genesis of Donghe sandstone: a case study of Tazhong area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(Suppl): 56~65]
- 翟永红,郭建华,刘生国. 塔中地区石炭系深埋藏优质碎屑岩储层成因分析. 矿物岩石, 1996, 16(2): 55~61 [Zhai Yunhong, Guo Jianhua, Liu Shengguo. Study on the origin of quality clastic rocks reservoir in Carboniferous from Tazhong area. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1996, 16(2): 55~61]
- 朱怀诚,罗辉,王启飞,等. 论塔里木盆地“东河砂岩”的地质时代. 地层学杂志, 2002, 26(3): 197~201 [Zhu Huaicheng, Luo Hui, Wang Qifei, *et al* The age of the Donghe sandstone in the Tarim basin. *Journal of Stratigraphy*, 2002, 26(3): 197~201]
- Guo Jianhua, Zeng Yunfu, Zhai Yonghong, *et al* On the Carboniferous-sequence stratigraphy in the Tazhong Area, Xinjiang: A model of the sequence stratigraphy framework of intracratonic depressional Basin. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 1997, 71(3): 328~343]
- 郭建华,王明艳,蒋小琼,等. 塔里木盆地塔中、满西地区石炭系层序地层. 中南工业大学学报, 2004, 35(1): 122~128 [Guo Jianhua, Wang Mingyan, Jiang Xiaoqiong, *et al* Sequence stratigraphy of the

- Carboniferous in Tazhong and Manxi areas of Tarim basin. *Journal of Central South University*, 2004, 35(1): 122~128]
- 黄思静,武文慧,刘洁,等. 大气水在碎屑岩次生孔隙形成中的作用——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例. 地球科学-中国地质大学学报, 2003, 28(4): 419~424 [Huang Sijing, Wu Wenhui, Liu Jie, *et al* Generation of secondary porosity by meteoric water during time of subaerial exposure: an example from Yanchang formation sandstone of Triassic of Ordos basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences* 2003, 28(4): 419~424]
 - Braithwaite C J R. Cement sequence stratigraphy in carbonates. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63(2): 395~303
 - 贾振远,蔡忠贤. 成岩地层学与层序地层学. 地球科学—中国地质大学学报, 1997, 22(5): 538~543 [Jia Zhenyuan, Cai Zhongxian. Diagenesis stratigraphy and sequence stratigraphy. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1997, 22(5): 538~543]
 - Surdan R C, Boese S W, Crossey L J. The chemistry of secondary porosity. *AAPG Memoir* 1984, 37: 127~149
 - Surdan R C, Crossey L J, Hagen E S, *et al* Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis. *AAPG Bulletin*, 1989, 73: 1~23
 - Hayes M J, Boles J R. Volumetric relations between dissolved plagioclase and kaolinite in sandstone: implications for aluminum mass transfer in the San Joaquin basin, California. *Special Publication Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, 1992, 47: 111~123
 - Surdan R C, Crossey L J. Integrated diagenetic modeling: a process oriented approach for clastic system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1987, 15: 141~170
 - Emery D, Myers K J, Young R. Ancient subaerial exposure and fresh water leaching in sandstone. *Geology (Boulder)*, 1990, 18: 1178~1181
 - Ramm M. Porosity - depth trends in reservoir sandstone theoretical models related to Jurassic sandstone offshore Norway. *Marine and Petroleum Geology*, 1992, 9: 553~567
 - Bloch S, Franks S G. Preservation of shallow plagioclase dissolution porosity during burial: implications for porosity prediction and aluminum mass balance. *AAPG Bulletin*, 1993, 77: 1488~1501

Heterogeneity of Donghe Sandstone on the Western Margin of Akekule Uplift

GUO Jian-hua¹ SHI Yuan-yuan² LU Chen-sheng¹ ZHU Rui¹

1(School of Geosciences and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083)

2(School of Geosciences, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023)

Abstract On the western margin of Akekule Uplift, the Donghe Sandstone develops very well, however, its lithology and reservoir features are different from that of other areas in Tarim basin. The main rocks are sandstone, mudstone and muddy siltstone or silty mudstone. And the sandstone is the main reservoir in this area. The analysis data of physical properties demonstrate that the reservoir properties of the rock in this region are middle to poor. And the properties have intensive heterogeneity vertically and laterally. Integrated analysis show that the reservoir non-homogeneity is controlled by not only the system tract in the sequence framework and also the diagenetic process, especially by the cementation of carbonate and the eluviation's process of the fresh water on the sequence boundary of type . On the other hand, high frequent sea-level changes induced to form the special rhythm intervals of reservoir physical properties vertically.

Key words reservoir, heterogeneity, Donghe sandstone, Akekule