

文章编号: 1000-0550(2007) 06-0885-06

早期碳酸盐胶结作用对砂岩孔隙演化的影响¹

——以塔里木盆地满加尔凹陷志留系砂岩为例

钟大康 朱筱敏 李树静 谢楠

(中国石油大学资源与信息学院 北京昌平 102249)

摘 要 塔里木盆地满加尔凹陷志留系砂岩为无障碍的潮坪、滨岸及辫状河三角洲沉积的岩屑砂岩和岩屑质石英砂岩,对满北和满东、满南地区志留系砂岩成岩作用序次尤其是碳酸盐胶结的时间、方式和特征、物性的对比研究认为:砂岩中碳酸盐胶结的时间早晚对砂岩孔隙演化具有重要影响,满北地区志留系砂岩发育有大量早期泥晶碳酸盐胶结,显微镜下研究表明这种胶结作用发生在岩石受到充分压实之前,呈基底式胶结,岩石颗粒呈点接触或漂浮状分布于早期碳酸盐胶结物之中,这种胶结作用抑制了岩石后期的压实作用。尽管目前其埋藏达 5 000~6 500 m,但其经历的压实作用并不强烈,粒间发育大量早期的碳酸盐胶结物,后来这些胶结物被溶蚀,形成了大量次生孔隙。而在满东和满南地区的志留系砂岩,碳酸盐胶结发生在岩石经过充分压实之后,晚期的碳酸盐胶结物仅分布于岩石经充分压实后的粒间孔隙中,含量较前者低,后期可供溶蚀的碳酸盐比前者少,因而溶蚀形成的次生孔隙有限。因此,尽管满东满南地区志留系埋藏比满北浅(3 700~5 000 m),碳酸盐胶结物含量也低,也发育晚期碳酸盐胶结物的溶蚀,但岩石的压实作用比满北强,物性比满北低差。这主要与碳酸盐胶结的早晚有关,早期碳酸盐胶结对孔隙演化具有明显控制作用,有利于岩石孔隙的保存,为后来的溶蚀形成次生孔隙提供了条件。

关键词 碳酸盐胶结 砂岩孔隙演化 影响 满加尔凹陷 志留系

第一作者简介 钟大康 男 1961 年出生 教授 博士 碎屑岩储层 E-mail zhongdakang@263.net

中图分类号 P618.130.2 TE122.2⁺1 **文献标识码** A

1 地质背景

塔里木盆地满加尔凹陷志留系砂岩主要有无障碍的潮坪、滨岸及辫状河三角洲沉积^[1-6]。不同的沉积类型分布于志留纪不同时期凹陷的不同地区。无障碍的潮坪沉积在垂向上主要发育于志留系柯坪塔格组上段—依木他干乌组,平面上分布于满加尔凹陷南部(简称满南)的满参 2 井,满加尔凹陷北部(简称满北)的跃南 2 井地区(图 1)。滨岸沉积在志留系从下至上都有分布,柯坪塔格组中段的滨岸沉积主要发育于满南地区,范围较大,柯坪塔格组上段主要发育于满南的满南 1 井和满北羊屋地区,但范围局限;塔塔埃尔塔格组和依木他干乌组的滨岸沉积主要分布于满北的羊屋地区—满参 2 井地区。辫状河三角洲沉积主要分布于柯坪塔格组和塔塔埃尔塔格组,平面上发育于满东地区和满北的草湖地区。

潮坪沉积以细粒岩屑砂岩和岩屑质石英砂岩为主^[7-9],以满北地区跃南 2 井为例,石英平均含量为 47%~61%,岩屑平均为 31%~35%,长石含量很低。滨岸沉积也为岩屑砂岩和岩屑质石英砂岩。前

者主要发育于满南地区,如满参 2 井,满南 1 井,后者主要发育于羊屋地区,如羊屋 1 井和羊屋 2 井。石英平均含量为 63%~80%,岩屑平均为 17%~31%。辫状河三角洲沉积为中—细粒岩屑砂岩,有时为粗粒岩屑砂岩,岩屑含量为 32%~64%,平均为 46%,石英含量较低,平均 39%。如英南 2 井、龙口 1 井、满东 1 井、华英参 1 井等。

2 问题的提出

将满加尔凹陷北部、东部和南部地区志留系各井的孔隙度和碳酸盐含量与埋藏深度进行交汇发现:在满北地区的羊屋 1 跃南 2 草 1 井,志留系砂岩现今埋藏深度较大,为 5 000~6 500 m,碳酸盐含量也较高,胶结作用较强,但其孔隙度和渗透率都较高,孔隙度平均为 10%~15%,渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 2)。而在满东和满南地区,如满东的英南 2 华英参 1 满东 1 龙口 1 井和满南的满参 2 井,志留系砂岩现今埋深为 3 700~5 000 m,个别达 5 500 m(满东 1 井),比前者埋藏深度浅 1 500 m;区域构造演化史和埋藏史的分析表明,满东地区志留系在

¹ 国家自然科学基金项目(批准号:40672094)、国家 973 项目(2006CB202300)资助。

收稿日期:2007-05-14 收修改稿日期:2007-06-14

埋藏过程中还经历过一定的抬升^[10-13]；另外，碳酸盐胶结也比前者弱，但是砂岩物性比满北地区差，孔隙度基本上都小于 10%，这是什么原因造成的呢？仔细分析不同地区志留系砂岩的成岩作用及序次、埋藏过程与物性特征认为：造成这种现象的原因是与满加尔坳陷不同地区志留系砂岩的成岩演化过程，即碳酸盐胶结早晚有关。满北地区志留系砂岩发育有大量

早期碳酸盐胶结物，抑制了岩石后期的压实作用。尽管目前满北地区的跃南 1、羊屋 2、草 1 井的志留系埋藏达 5 000~6 500 m，但其经历的压实作用并不强烈，早期的碳酸盐胶结物在后来的埋藏过程中发生溶蚀，形成了大量次生孔隙。而在满东和满南地区的志留系砂岩在埋藏过程中，首先是经历的压实作用，碳酸盐胶结发生在岩石经过充分压实后，晚期的碳酸盐胶

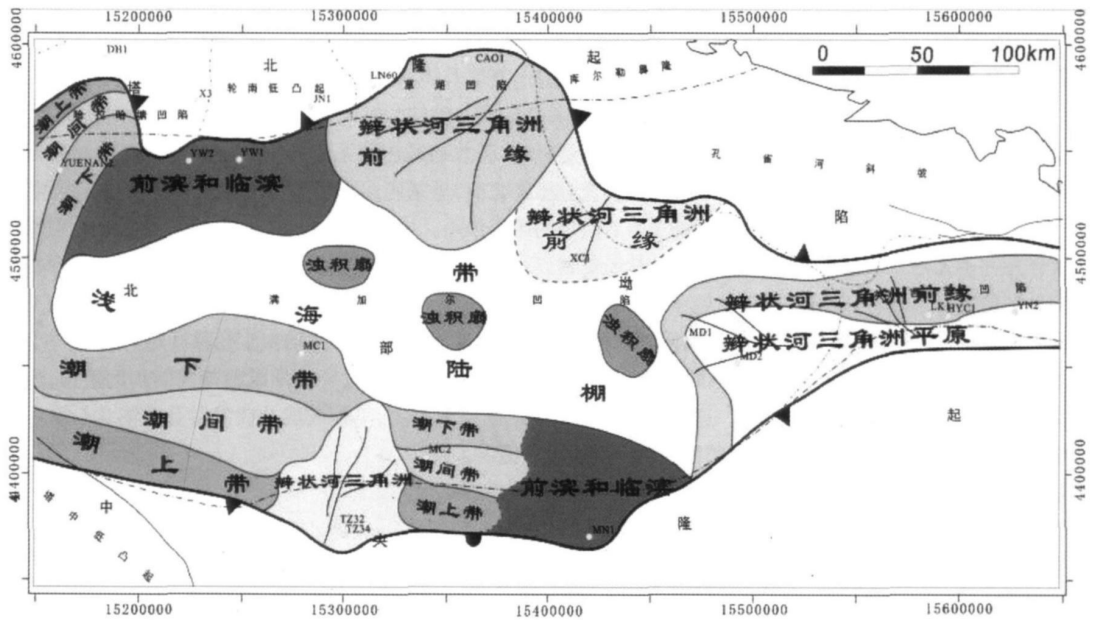


图 1 满加尔坳陷志留系柯坪塔格组中上段沉积相分布

Fig. 1 Distribution of sedimentary facies of middle-upper Kepingtag formation (Silurian), Manjiaer depression

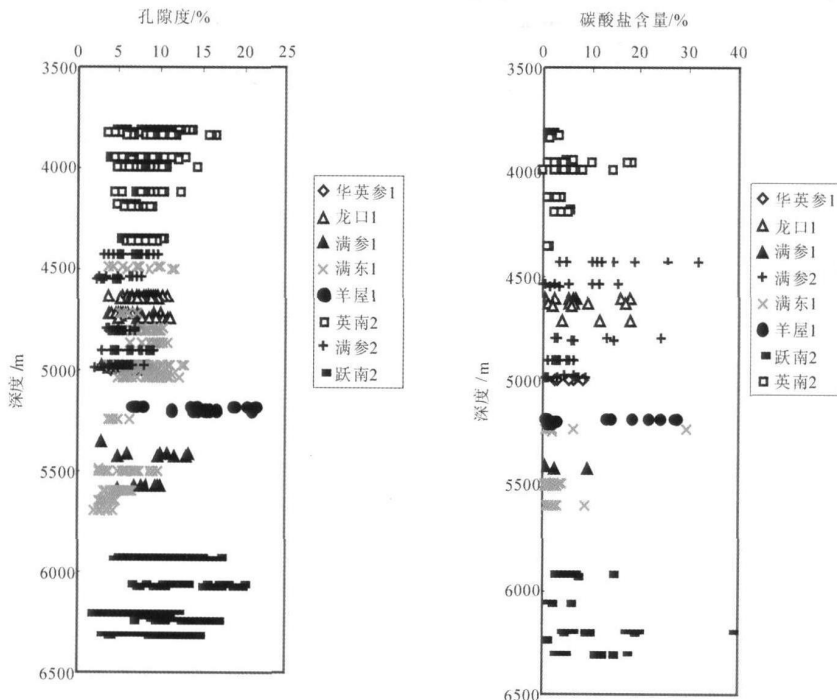


图 2 不同地区孔隙度和碳酸盐含量与埋藏深度之间的关系

Fig. 2 Relation between porosity and carbonate vs. depth

结物仅分布于岩石经充分压实后的粒间孔隙中, 后期的溶蚀作用仅发生于粒间少量的碳酸盐, 从而造成其埋藏较前者浅, 碳酸盐胶结物含量比前者低, 但岩石的压实作用比前者强, 物性比前者低, 物性较前者差。

3 满北地区志留系砂岩的碳酸盐胶结作用及成岩序次

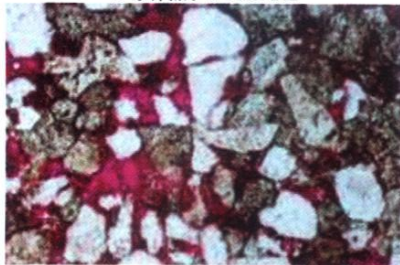
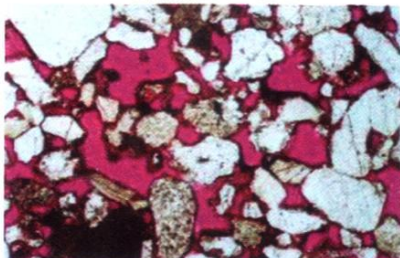
通过显微镜下观察发现: 满北地区跃南 2 羊屋 1 羊屋 2 草 1 等井志留系砂岩有个共同的特征, 就是碳酸盐胶结作用很强烈, 胶结物含量高, 泥晶结构, 这些碳酸盐胶结物呈基底式胶结, 分布于岩石颗粒周围, 使许多颗粒呈漂浮状, (图版 iv-1 2 3)。砂岩中石英颗粒次生加大边不发育, 偶尔可以见到不连续的绿泥石粘土膜, 在相同的深度范围的薄片, 同时还可以看到粒间泥晶碳酸盐胶结物被强烈溶蚀的现象, 在颗粒接触处还残留有少量泥晶方解石胶结物, 颗粒呈漂浮状分布于孔隙之中 (图版 iv-4 5)。这一系列现象说明岩石在经过充分压实之前受到了强烈的早期碳酸盐胶结, 这种胶结作用抑制了石英次生加大和粘土膜的胶结, 同时也抑制了岩石的压实作用, 造成镜下岩石颗粒呈漂浮状分布, 压实弱, 基底胶结, 在将来的埋藏过程中, 地层中有机酸的形成对这些早期碳酸盐进行溶蚀改造, 形成大量次生孔隙, 使得原来被大量早期碳酸盐胶结物占据的孔隙被还原回来, 在溶

蚀比较发育的地方, 早期的泥晶碳酸盐胶结物溶蚀强烈, 保留较少, 物性较好, 孔隙度较高, 而溶蚀不发育的地方, 碳酸盐含量仍较高, 物性较差。满北地区滨岸和潮下砂坪沉积的砂岩其分选好, 杂基含量低、原始孔隙较发育, 这也为后来有机酸的溶蚀作用提供了条件。详细解剖羊屋 1 井 5 180~5 200 m 深度段的碳酸盐胶结物含量与孔隙度之间的关系及其相应的显微镜下孔隙发育状况与碳酸盐胶结物特征可以证实这一点 (表 1)。

从表 1 中羊屋 1 井的取心资料可以看出, 碳酸盐胶结物含量在垂向上呈高低交替出现, 有的部位碳酸盐含量较高, 如样品 1~3、7~8、12 等, 其碳酸盐大多超过 10%, 高者达 27%, 这些样品的孔隙度都较低, 一般小于 10%。显微镜下对这些样品的观察发现高碳酸盐含量的样品都是属于早期碳酸盐胶结作用强烈的样品, 这些早期呈基底胶结碳酸盐胶结物保存完好, 溶蚀作用不发育, (见表 1 内右上照片)。而表 1 中碳酸盐含量较低、孔隙度较高的样品都是属于早期碳酸盐胶结物溶蚀强烈的样品, 这些早期呈基底胶结的碳酸盐胶结物被溶蚀后使得在镜下出现岩石颗粒呈漂浮状分布于溶蚀作用形成的大量次生孔隙之中 (见表 1 内右下照片)。因而造成碳酸盐含量与孔隙度呈现出良好的负相关关系 (图 3), 即早期碳酸盐胶结物溶蚀越强烈, 岩石孔隙度越高, 反之亦然。

表 1 早期碳酸盐胶结物的溶蚀程度与孔隙度的对应关系 (羊屋 1 井)

Table 1 Relationship between the dissolution of early carbonate cement and reservoir rock porosity (Well YW1)

序号	井深/m	孔隙度/%	碳酸盐/%	碳酸盐溶蚀作用	显微镜下特征
1	5 180.56	13.43	24.2	弱	2号样品: 5 180.70 m 
2	5 180.70	6.58	27.4		
3	5 180.94	6.98	13.0		6号样品: 5 181.62 m 
4	5 181.15	18.85	0.6	强烈	
5	5 181.33	21.28	1.4		
6	5 181.62	20.41	0.9		
7	5 182.18	18.76	18.5	弱	
8	5 182.3	7.82	21.8		
9	5 197.12	16.63	2.0	强烈	
10	5 197.41	13.92	3.0		
11	5 197.58	11.23	0.8		
12	5 179.72	14.19	14.0	弱	
13	5 198.54	16.74	2.1	强烈	
14	5 198.8	15.25	1.0		
15	5 199.03	15.8	1.1		
16	5 199.41	15.3	1.5		
17	5 199.68	14.18	1.9		
18	5 200.05	20.93	2.1		

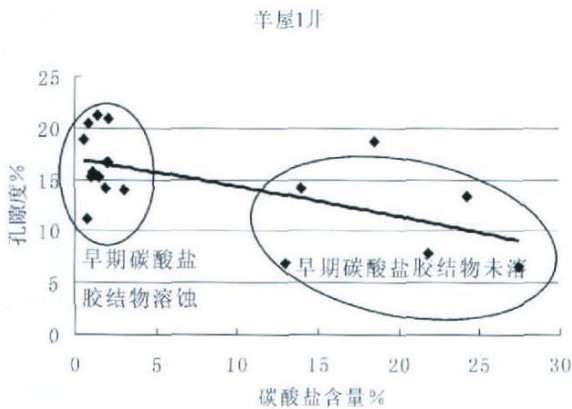


图 3 羊屋 1 井碳酸盐含量与孔隙度的关系

Fig. 3 Relationship between carbonate and porosity (Well YW 1)

从上述分析可以看到早期碳酸盐胶结,抑制了岩石的压实作用,造成镜下岩石颗粒呈漂浮状分布,颗粒堆积疏松,岩石所受的压实作用弱,基底胶结,这种胶结作用抑制了石英次生加大和粘土膜的胶结,后来的埋藏过程中,这些早期碳酸盐胶结物被溶蚀形成大量次生孔隙,使得原来的粒间孔隙被还原,从而造成了满北地区尽管现今埋藏大,碳酸盐胶结也强,但孔隙度仍较高的情况,仔细研究便会发现孔隙度高的原因是由于粒间高含量的早期碳酸盐胶结物溶蚀提供的,早期碳酸盐胶结物保存完好的样品其孔隙度仍然较低,但却是潜在的好储层,关键取决于后期是否发生溶蚀作用。早期的碳酸盐胶结控制了岩石的成岩演化和孔隙演化,为后来的能形成较多的溶蚀孔间提供了条件。因此,在碳酸盐含量较高、胶结较强的地区仍可找到溶蚀较发育的优质储层段。满北地区跃南 2 和羊屋 2 草 1 井有类似的现象。

4 满东、满南地区志留系砂岩的碳酸盐胶结作用及成岩序次

通过对满东地区的满东 1 井、龙口 1 井、华英参 1、英南 2 井和满南地区满参 2 井、满南 1 井志留系砂岩的成岩作用类型及序列、物性特征、碳酸盐含量等分析发现:其与满北地区具有明显不同的成岩演化序列,即满东、满南地区碳酸盐胶结作用发生得较晚,从碳酸盐含量、胶结方式和胶结特征等几点可以证实这一点:第一,其碳酸盐含量较满北地区低,一般为 5%~10%,如满东 1 井为 3%~10%,龙口 1 井为 5%~10%,华英参 1 井为 4%~7% 和英南 2 井(图 2);第二,碳酸盐胶结方式为孔隙式,碳酸盐胶结物分布于

岩石颗粒之间的孔隙之中,很少呈包围颗粒状分布;第三,这些碳酸盐胶结物多为亮晶方解石,晶体较干净透明,镜下能见到方解石的一组解理(图版 iv-5 6 7 8)。这几个特征表明:满东满南地区志留系砂岩具有与满北地区不同的成岩演化序列,该地区志留系砂岩首先经历的是压实作用,使粒间孔隙体积减少,然后才是碳酸盐胶结作用,碳酸盐胶结作用发生在岩石经过充分压实之后,碳酸盐胶结物分布于岩石经过压实剩余的粒间孔隙中,因此其含量低于满北地区。镜下岩石颗粒堆积较满北地区紧密、碳酸盐胶结物干净透明、解理发育、孔隙式胶结说明了这一点。

这说明尽管整个满加尔凹陷志留系砂岩的成岩作用类型相似,但成岩序次明显不同,即碳酸盐胶结作用出现的时间存在明显差异,满北地区碳酸盐胶结作用发生的时间较早,而满东、满南地区较晚,两者具有不同的成岩演化过程,从而造成满东、满南地区志留系砂岩尽管埋藏比满北地区浅、碳酸盐含量比满北低,也发生晚期的碳酸盐胶结物的溶蚀,但物性明显比满北差。早期碳酸盐胶结控制了满北地区志留系砂岩的成岩序次,从而控制了其孔隙演化。

5 结论

通过对满北和满东、满南地区志留系砂岩成岩作用序次尤其是碳酸盐胶结的时间、方式和特征、物性的对比研究认为:砂岩中碳酸盐胶结的时间早晚对砂岩孔隙演化具有重要影响,在岩石没有受到充分压实之前的早期碳酸盐胶结作用有利于岩石孔隙的保存,为后来碳酸盐的溶蚀形成次生孔隙提供了条件。早期碳酸盐胶结发生越早、越强烈、占据的粒间孔隙空间越多,后期可能形成的次生孔隙量越大。如果砂岩中的碳酸盐胶结发生在岩石经过充分压实之后,则尽管岩石中碳酸盐胶结较弱、碳酸盐含量较低,也存在晚期的碳酸盐胶结物的溶蚀作用,但可供后期溶蚀的碳酸盐的量较少,因而形成的次生孔隙有限。因此,在早期碳酸盐含量高、胶结强烈的地区,通过对砂岩成岩作用序次、碳酸盐胶结时间早晚的研究仍然可以寻找到孔隙发育的优质储层。

参考文献 (References)

- 顾家裕. 塔里木盆地沉积层序特征及其演化. 北京: 石油工业出版社, 1996 54-156 [Gu Jiayu. Sequence Stratigraphy and It's Evolution of Tarim Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. 54-156]
- 侯会军, 王伟华, 朱筱敏. 塔里木盆地塔中地区志留系沉积相模式探讨. 沉积学报, 1997, 15(3): 41-47 [Hou Huijun, Wang Weihua

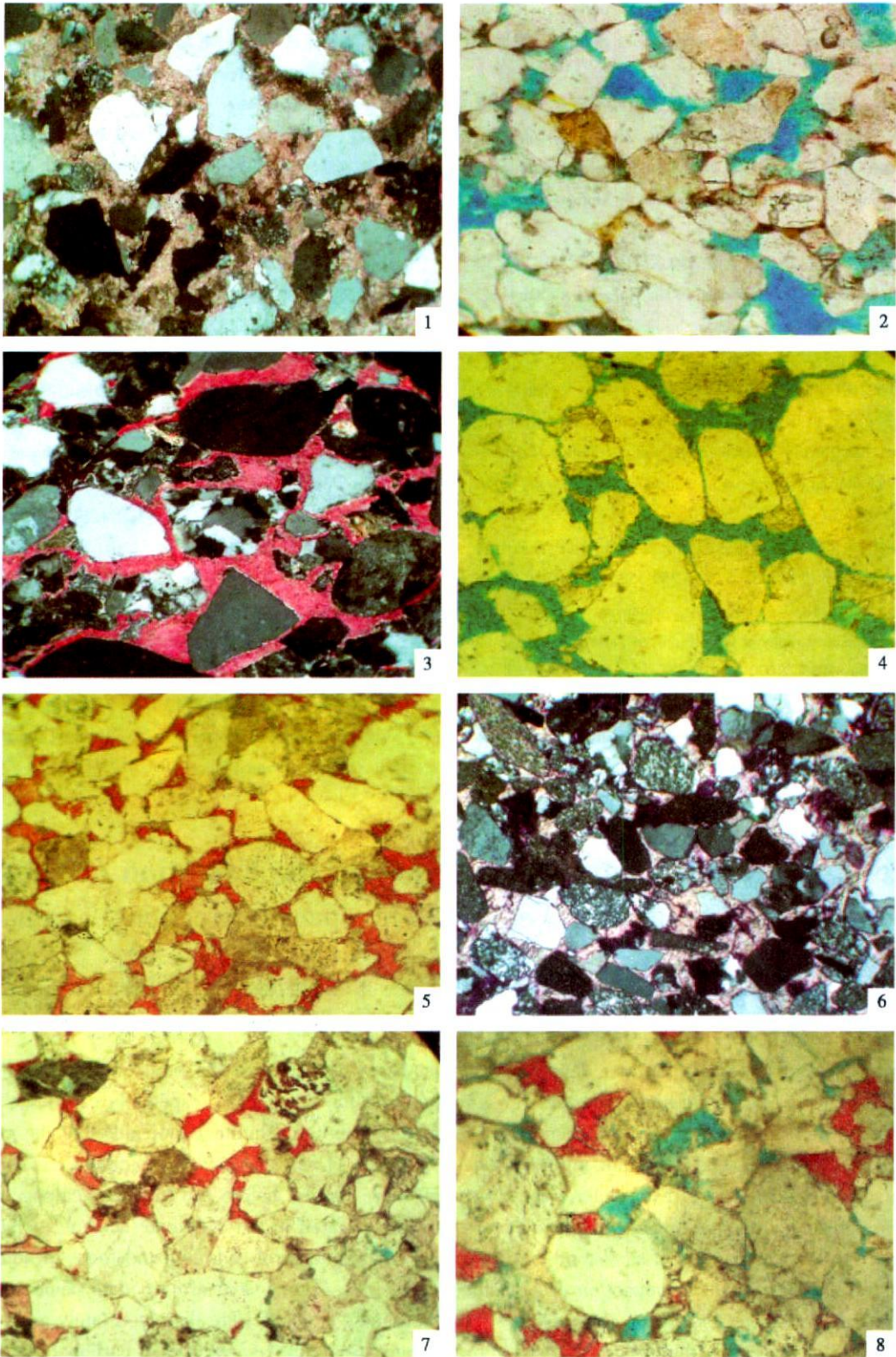
- Zhu Xiam in Study of depositional model of Silurian System in Tazhong Area, Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15 (3): 41-47]
- 3 赵文光, 蔡忠贤, 周波. 塔里木盆地台盆区志留系层序划分及其特征. *新疆石油学院学报*, 2002, 15 (4): 9-12 [Zhao Wenguang, Cai Zhongxian, Zhou Bo. Division and characteristics of Silurian sequence in platform area of Tarim basin. *Journal of Xinjiang Petroleum Institute*, 2002, 15 (4): 9-12]
 - 4 朱筱敏, 王贵文, 谢庆宾. 塔里木盆地志留系层序地层特征. *古地理学报*, 2001, 3 (2): 64-71 [Zhu Xiam in, Wang Guiw en, Xie Qingbin. Sequence stratigraphy of silurian in Tarim basin. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3 (2): 64-71]
 - 5 朱筱敏, 王贵文, 谢庆宾. 塔里木盆地志留系沉积体系及分布特征. *石油大学学报 (自然科学版)*, 2002, 26 (3): 5-12 [Zhu Xiam in, Wang Guiw en, Xie Qingbin. Characteristics and distribution of depositional systems of silurian in tarim basin. *Journal of the University of Petroleum*, 2002, 26 (3): 5-12]
 - 6 贾进华, 张宝民, 朱世海, 等. 塔里木盆地志留纪地层沉积特征与岩相古地理. *古地理学报*, 2006, 8 (3): 339-352 [Jia Jinhua, Zhang Baomin, Zhu Shihai, et al. Stratigraphy, sedimentary characteristics and lithofacies palaeogeography of the Silurian in Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography*, 2006, 8 (3): 339-352]
 - 7 王根长. 塔里木盆地碎屑岩储层基本特征. *石油实验地质*, 2001, 23 (1): 62-66 [Wang Genchang. Characteristics of elastic reservoirs in the tarim basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 2001, 23 (1): 62-66]
 - 8 顾家裕, 宁从前, 贾进华. 塔里木盆地碎屑岩优质储层特征及成因分析. *地质评论*, 1998, 44 (1): 83-89 [Gu Jiayu, Ning Congqian, Jia Jinhua. High-quality reservoir features and genetic analysis of elastic rocks in the Tarim basin. *Geological Review*, 1998, 44 (1): 83-89]
 - 9 张惠良, 王招明, 张荣虎, 等. 柯坪地区下志留统储层性质及控制因素. *海相油气地质*, 2005, 10 (2): 23-30 [Zhang Huiliang, Wang Zhaoming, Zhang Ronghu, et al. Properties and controlling factors of Lower Silurian reservoir in Kalpin Area, Tarim Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2005, 10 (2): 23-30]
 - 10 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 1997. 438-439 [Jia Chengzao. *Tectonics and Hydrocarbon of Tarim Basin, China*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. 438-439]
 - 11 黄太柱, 马慧明. 塔里木盆地满加尔坳陷的演化过程及石油地质特征. *新疆地质*, 1996, 14 (2): 97-110 [Huang Taizhu, Ma Huiming. Evolution and petroleum geology of Manjiaer depression in tarim basin. *Xinjiang Geology*, 1996, 14 (2): 97-110]
 - 12 孙龙德, 周新源, 王国林. 塔里木盆地石油地质研究新进展和油气勘探主攻方向. *地质科学*, 2005, 40 (2): 167-178 [Sun Longde, Zhou Xinyuan, Wang Guolin. Contributions of petroleum geology and main directions of oil-gas exploration in the Tarim basin. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40 (2): 167-178]
 - 13 童晓光, 梁狄刚, 贾承造. 塔里木盆地石油地质研究新进展. 北京: 科学出版社, 1996. 225-234 [Tong Xiaoguang, Liang Digang, Jia Chengzao. *Achievements of Petroleum Geology Research of Tarim Basin*. Beijing: Science Press, 1996. 225-234]

Influence of Early Carbonate Cementation on the Evolution of Sandstones a case study from Silurian sandstones of Manjiaer depression, Tarim basin

ZHONG Da-kang ZHU Xiao-min LI Shu-jing XIE Nan
(China University of Petroleum, Changping Beijing 102249)

Abstract Silurian sandstones of Manjiaer depression, Tarim basin deposited in the tidal beach and braided delta environment which are litharenite and quartzarenite. The study on the diagenesis, especially carbonate cementation history, sandstone porosity between northern Manjiaer and Eastern-Southern Manjiaer indicates that the carbonate cementation time in sandstones has important influence on the porosity of sandstones. An abundant carbonate cements developed in sandstones in northern Manjiaer. These cements were formed before the thorough compaction of sandstones by the microscopical study because the sandstone grains are isolated in the carbonate cements. These cementations restrained the late compaction of sandstones. Although the buried depth of Silurian sandstones in northern Manjiaer only is 5 000~6 500 m, the compaction of sandstones is feeble, a great deal of carbonate cements exist in the sandstones around or between the grains of sandstones. The carbonate cements were dissolved lately and generated an abundant porosity. However, in the eastern and southern Manjiaer area, the cementation of carbonate took place after the thorough compaction of sandstones and carbonate cements were distributed in the limited space between sandstone grains. Thus late dissolution only generated less porosity compared with northern Manjiaer area although they were with shallow buried depth (3 700~5 000 m). This is related mainly to the time of carbonate cementation. Early carbonate cementation saved the intergranular space and provide the late dissolution, thus controls on the evolution of porosity of sandstone.

Key words carbonate cementation, porosity evolution of sandstones, influence, Manjiaer depression, Silurian



图版 10 说明: 1 跃南 2 井, 6 207.3 m, 岩石未经充分压实前的早期泥晶碳酸盐胶结, $10 \times 10 (+)$; 2 跃南 2 井, 6 206.5 m, 岩石未经充分压实前的早期泥晶碳酸盐胶结物溶蚀, $10 \times 10 (-)$; 3 草 1 井, 4 949.85 m, 岩石未经充分压实前的早期泥晶碳酸盐胶结, $10 \times 10 (+)$; 4 羊屋 2 井, 5 219 m, 早期碳酸盐胶结物溶蚀, 孔隙还原, $10 \times 10 (-)$; 5 华英参 1, 4 995.15 m, 岩石经过一定程度压实后的晚期亮晶碳酸盐胶结, $10 \times 10 (-)$; 6 羊屋 2 井, 5 219 m, 早期碳酸盐胶结物溶蚀, 孔隙还原, $10 \times 10 (-)$; 7 满参 2, 4 902 m, 岩石经过一定程度压实后的晚期亮晶碳酸盐胶结, $10 \times 10 (-)$; 8 满南