

鄂尔多斯盆地东南缘上三叠统长 8 段砂岩储层 成岩作用与孔隙演化

刘春雷¹, 李文厚¹, 袁 珍², 范萌萌³, 郭懿萱¹

LIU Chun-lei¹, LI Wen-hou¹, YUAN Zhen², FAN Meng-meng³, GUO Yi-xuan¹

1. 西北大学地质系, 陕西 西安 710069;

2. 西安石油大学油气资源学院, 陕西 西安 710065;

3. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054

1. *The department of Geology Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;*

2. *School of Petroleum Resources Xi'an Shi You University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;*

3. *College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China*

摘要:鄂尔多斯盆地东南缘上三叠统延长组长 8 是该区油藏的主力储集层, 主要为一套湖泊-三角洲相砂岩, 储集岩主要为长石砂岩及长石岩屑砂岩。以岩心观察为基础, 结合薄片鉴定、扫描电镜、压汞测试、X-衍射、包裹体测温、*R_v* 测定等方法认为, 研究区延长组砂岩经历了压实、胶结、溶解、交代等成岩作用, 成岩阶段已达中成岩阶段 A 期。成岩作用成为控制该区物性的一个关键因素, 早期的机械压实和胶结作用使原生孔隙大量丧失, 有机质分解形成的酸性流体使储集层中长石等易溶组分的溶蚀对储层物性起到重要的改善作用, 成岩阶段后期以(含铁)碳酸盐胶结物为主的胶结又使砂岩致密化。成岩作用中的孔隙演化特征对鄂尔多斯盆地上三叠统延长组低渗透储集层的开发具有积极的意义。

关键词:鄂尔多斯盆地东南缘; 长 8; 成岩作用; 孔隙演化

中图分类号: P534.51; TE121.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2252(2013)05-0807-08

Liu C L, Li W H, Yuan Z, Fan M M. Diagenesis and porosity evolution of Chang 8 oil bearing in Southeast Ordos Basin. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(5):807-814

Abstract: The reservoir of Chang 8 formation in southeast Ordos Basin is a set of lake-delta sediments and the dominant reservoirs. The main rock type of the reservoir is arkose and feldspathic lithic sandstone. Based on core observation, combining with thin section observation, scanning transmission electron microscope, pressure mercury testing, X ray diffraction analyses, measurement of fluid inclusion, reflection of vitrinite measurement, it is believed that the diagenesis includes compaction, cementation, dissolution and alteration. And the diagenesis reaches A-period of middle diagenetic stage. The diagenesis is a key factor for controlling the physical property in this area. Most primary pores were destructed after the compaction and cementation in early diagenetic stage. The property of reservoir is improved by the dissolution of instable mineral like feldspar. The dissolution is due to the organic matter-decomposed acid fluid. But the reservoir become dense because of the ferroan calcite cementation in late diagenetic stage. The feature of the pores evolution in the diagenesis has positive influence on the development of low permeable reservoir in the southeast Ordos Basin.

Key words: southeast Ordos Basin; Chang 8; diagenesis; pore evolution

1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯盆地东南部, 北起甘泉, 南

至铜川, 西抵正宁, 东达宜川; 构造区划上横跨陕北斜坡和渭北隆起(图 1)。研究区主要受渭北隆起、陕北斜坡和晋西挠褶带 3 个构造单元形成和演化的控

收稿日期: 2011-12-20; 修订日期: 2013-04-26

资助项目: 西安石油大学青年基金资助项目《鄂尔多斯盆地重力流成因储层次生孔隙形成机制》(编号: YS28032503)

作者简介: 刘春雷(1981-), 男, 在读博士生, 从事储层沉积学研究。E-mail: lcl_nwu@163.com

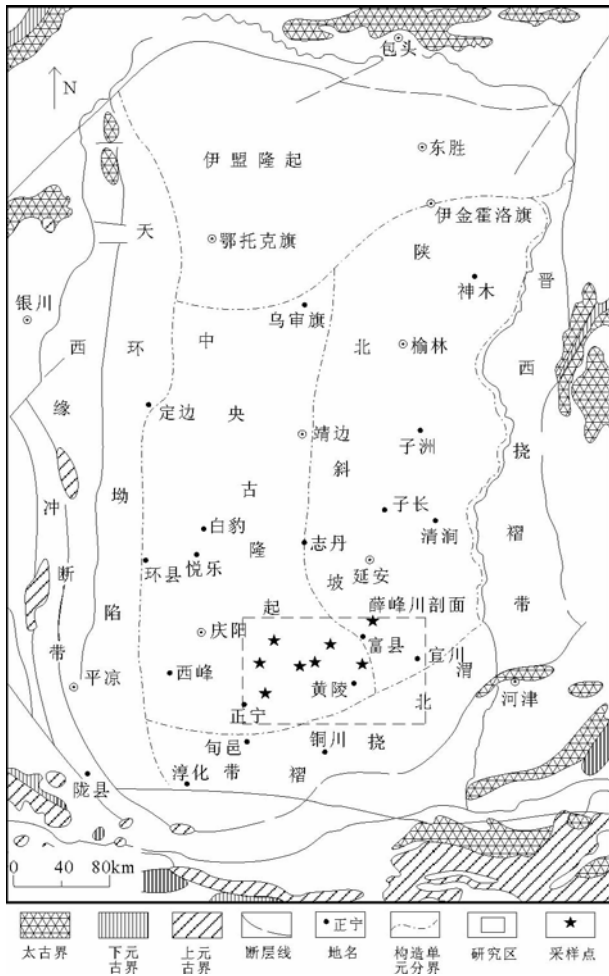


图1 研究区位置

Fig. 1 The location map of the studied area

制,后期抬升幅度较大,遭受剥蚀的程度相当严重,地层自东而西、由南向北剥蚀程度逐步变小。上三叠统延长组是本区主要生、储油层。根据沉积演化史及古生物组合特征,延长组由上至下分为5段10个油层组: T_{3y_1} 段(长10油层组)、 T_{3y_2} 段(长9、长8油层组)、 T_{3y_3} 段(长7、长6、长4+5油层组)、 T_{3y_4} 段(长3、长2油层组)、 T_{3y_5} 段(长1油层组)。本次研究的目的是层位为长8油层组。这套储层砂岩以三角洲前缘水下分流河道为主。

2 储层岩石学特征

根据研究区176块岩石的铸体薄片鉴定结果所作的砂岩类型三角图表明,鄂尔多斯盆地东南部延长组长8段储层砂岩以长石砂岩、岩屑长石砂岩为主(图2)。

研究区长8段砂岩的碎屑含量较高,碎屑中石英含量占碎屑总量的14%~42%,平均26.9%;长石含量较高,在12%~58%之间,平均值达33.5%,储层砂岩中的自生长石以钠长石为主,另外还见少量钾长石。作为对成岩作用最为敏感的骨架组分之一,长石的分布特征对研究区的成岩过程和次生孔隙的形成与分布具有极其重要的意义,受北东方向中下太古宇到元古宇的多套变质岩系组成的深变质岩物源的影响,长8油层组长石含量的分布具有自北东向南西逐渐减少的特征。岩屑以千枚岩、片岩板岩等变质岩岩屑为主,岩屑含量在5%~45%之间,平均值为23.5%;填隙物含量在10%~20%之间,平均值为16.1%,主要为胶结物,砂岩颗粒多呈次棱状、磨圆较差,分选中等。

3 储层物性特征

镜下观察与统计发现,研究区长8段储层面孔率非常低,平均为1.33%;孔径大小在20~50 μm 之间,孔隙类型复杂多样,包括原生粒间孔、溶蚀孔隙、微裂隙(表1),其中残余粒间孔及溶蚀孔隙是研究区最主要的孔隙类型,占总面孔率的百分比可高达83%。

实测砂岩物性表明,长8油层组孔隙度分布范围在2%~17.7%之间,平均值为8.07%,渗透率分布范

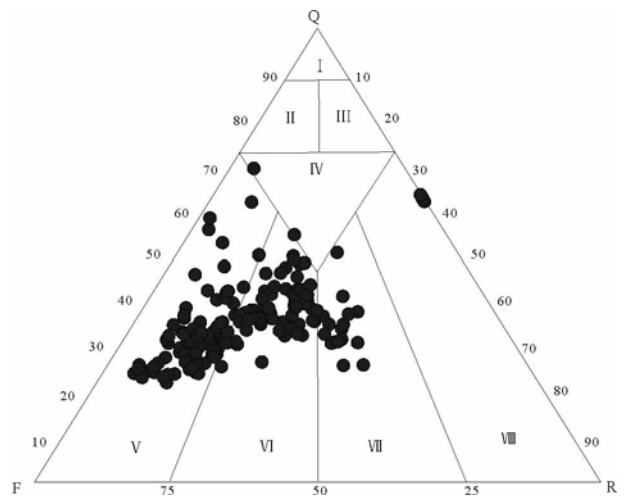


图2 储集砂岩类型特征

Fig. 2 The feature and types of sandstone reservoir

- Q—石英端元;F—长石端元;R—岩屑端元;
- I—石英砂岩;II—长石质石英砂岩;III—岩屑质石英砂岩;
- IV—长石岩屑质石英砂岩;V—长石砂岩;VI—岩屑质长石砂岩;
- VII—长石质岩屑砂岩;VIII—岩屑砂岩

表 1 研究区长 8 段砂岩孔隙类型及其特征

Table 1 Pore types of sandstones and their characteristics of Chang 8 in research area

孔隙类型	孔隙成因及几何特征	占面孔率百分比/%
残余粒间孔	即原生孔隙,研究区最主要的孔隙类型,分布很不均一,具有强烈的非均质性,多呈三角形或多边形,边缘整齐、平直。铁方解石、铁白云石星散状充填孔隙,并可见交代碎屑,部分残余粒间孔孔隙边缘被早期绿泥石栉壳包裹	50
溶蚀粒间孔	残余粒间孔中碎屑或填隙物发生溶解而形成的次生孔隙,孔隙边缘极不规则,呈港湾状,与残余粒间孔伴生	6
溶蚀粒内孔	长石、岩屑等发生溶蚀,产生的孔隙,与溶蚀粒间孔伴生,且互相连通,分布不均匀	37
晶间孔	碳酸盐、高岭石等填隙物内微孔隙极为细小,一般小于 0.2 μm ,常与溶蚀粒间孔伴生	5
微裂隙	在本区主要指砂岩在外力作用下发生破裂而形成的一类孔隙通道,其分布具有很强的不均一性	2

围主要在 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 6.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均值为 $0.487 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 3)。

4 储层的成岩作用

碎屑沉积物在沉积后经历的各种成岩作用之间相互联系,其综合效应影响并控制着碎屑沉积物的发育^[1],不仅使沉积物固结,还使其发生各种物理、化学及生物化学变化,对碎屑储集岩的孔隙形成、保存和破坏起着极为重要的作用^[2]。其中对碎屑储集层储集性能有重要影响的是压实作用、胶结作用和溶解作用等。

4.1 压实作用

通过岩心薄片观察,研究区延长组长 8 段砂岩中的压实作用表现为泥岩岩屑、云母等塑性颗粒被挤压变形,甚至形成假杂基化;刚性颗粒发生破碎、折断;碎屑颗粒点接触到线接触,局部出现凹凸接触

(图版 I)。压实作用通常发生在成岩作用早期,是使原生孔隙缩小及减少的重要因素。

4.2 胶结作用

区内研究层段砂岩胶结物主要为粘土矿物胶结、碳酸盐胶结及硅质胶结。受水-岩及水-油-岩成岩系统的影响,孔隙流体的化学成分发生变化^[3],使胶结作用多期次地对原生孔隙进行破坏^[4]。

4.2.1 碳酸盐胶结作用

本区碳酸盐胶结物作用主要以铁方解石、铁白云石及方解石充填孔隙为主。连晶(连生)结构是鄂尔多斯盆地东南缘延长组砂岩中碳酸盐胶结物最为常见的结构(图版 I),也是碎屑岩成岩过程中形成的方解石胶结物最为主要的结构类型之一。它们是导致鄂尔多斯盆地东南缘延长组储层致密的最主要原因^[4],多呈它形、半自形或镶嵌状充填于孔洞中,也可见到发育较好的晶形,阴极发光下这类方解石发

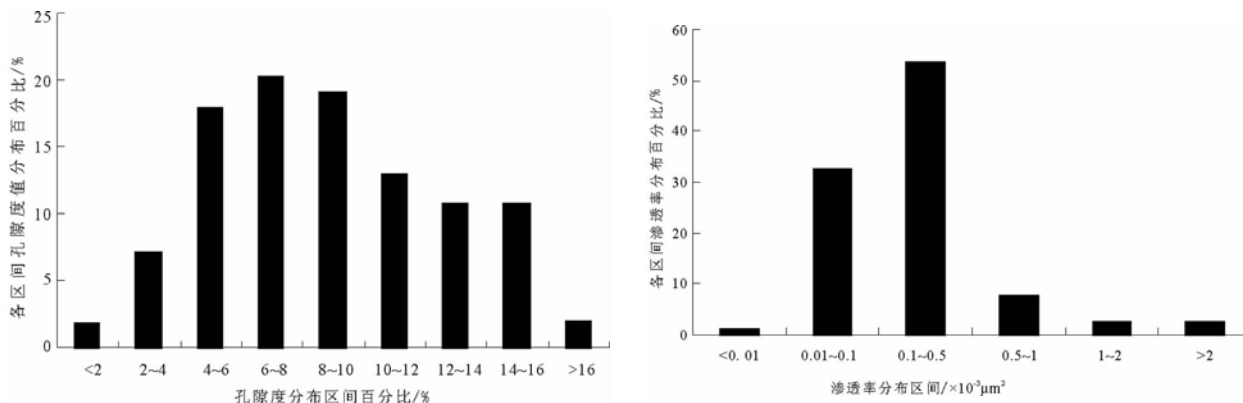


图 3 孔隙度和渗透率分布频率

Fig. 3 The frequency histogram of porosity and permeability

光较暗,多呈较暗的橙红色,铁氰化钾试剂染色表明含铁较高,反映它们形成于埋藏环境中。

区内延长组砂岩碳酸盐胶结物从早成岩阶段晚期开始出现,到中生代阶段 A 期大量出现含铁碳酸盐胶结物,碳酸盐胶结物的含量介于 0~26.9%之间,平均为 5.73%,大大降低了储层的储集性能(图 4)。

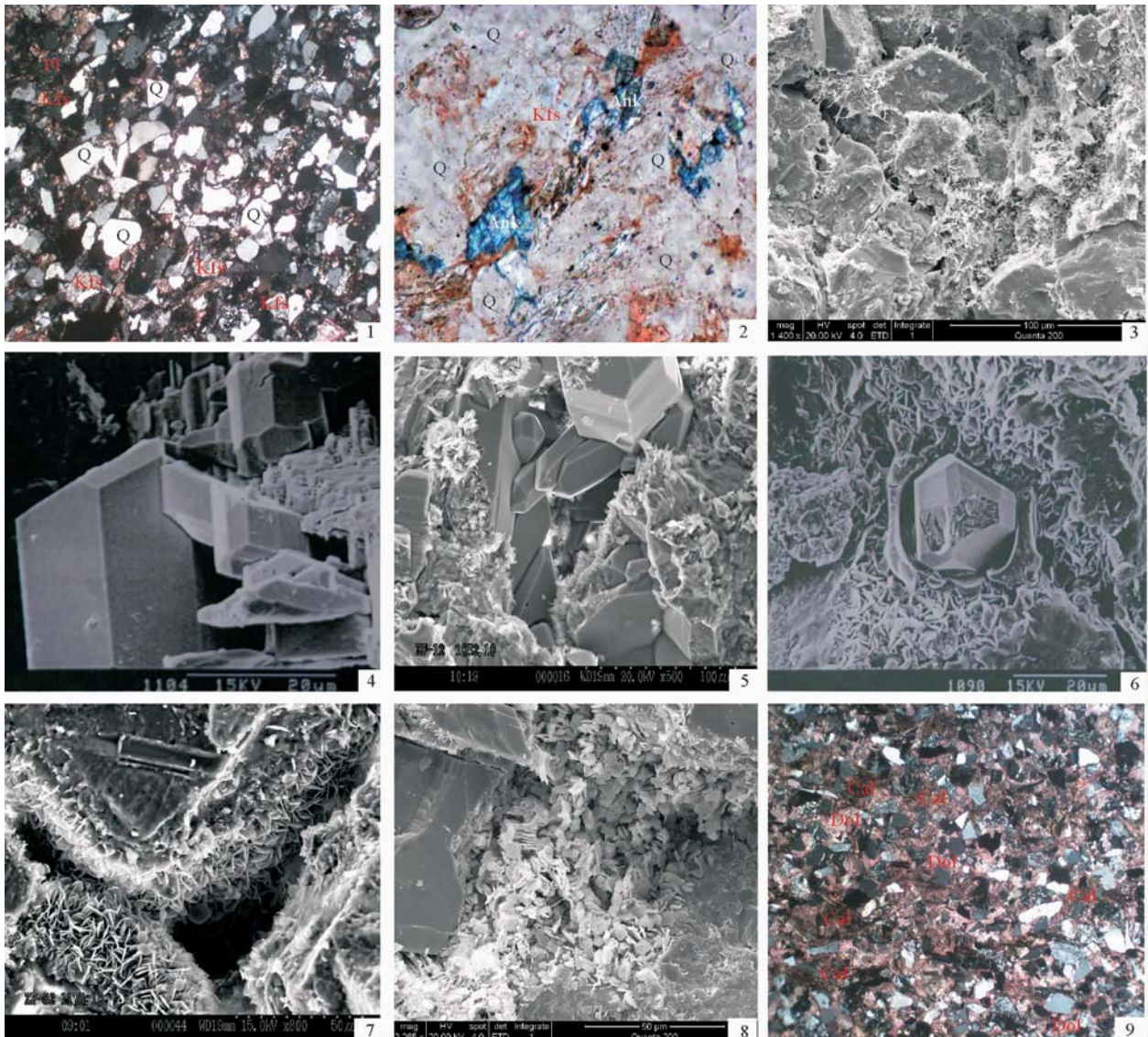
4.2.2 粘土矿物胶结作用

研究区储集层中的自生粘土矿物主要有绿泥

石、伊利石、高岭石及伊/蒙混层。X-衍射资料表明,伊/蒙混层含量最高,可达 39%,绿泥石含量 37.8%,伊利石含量 39.7%,高岭石含量最低,含量约为 9.69%(表 2)。

绿泥石是沉积物在进入埋藏沉积期之后形成的,并随着成岩作用继续进行。绿泥石呈栉壳状垂直生长在颗粒的表面,或者以针状或玫瑰花状、绒球状集合体充填于孔隙中(图版 I)。镜下观察统计发现,

图版 I Plate I



1—宁 36 井 1325.7m,长 8,拉长延伸状颗粒定向排列(正交偏光)100×;2—庄 69 井 1991.07m,长 8,铁白云石胶结的孔隙(正交偏光)200×;3—塔 17 井 1577m,长 8,伊利石在粒间搭桥;4—正 6 井,长 81,1660.43m,次生孔隙中,长石次生加大,可见平直的加大边;5— ZF18 井,1062.1m,长 8,孔隙中石英加大状充填生长(扫描电镜)×500;6—旺 1 井 639.72m,长 8,粒间孔中的自生石英(扫描电镜);7— ZF28,1178.1m,长 8,粒表绿泥石膜发育;8—旺 23 井 1253.25m,长 8,高岭石充填孔隙;9—店 4 井 1388.78m,长 8,方解石白云石胶结的致密结构(正交偏光)100×;Q—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Ank—铁白云石;Cal—方解石;Dol—白云石

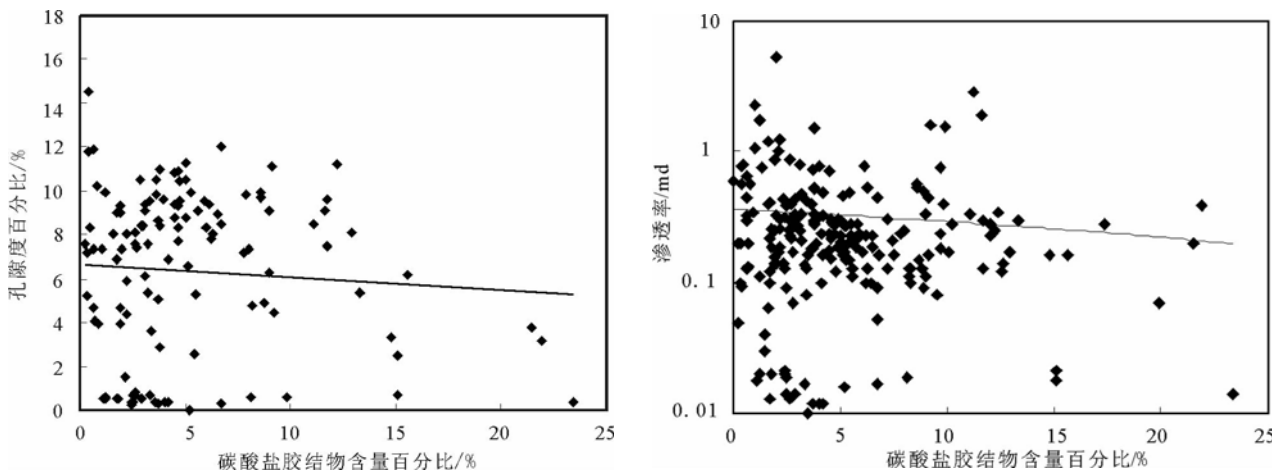


图 4 研究区长 8 油层组碳酸盐胶结物含量与孔渗关系

Fig. 4 The relationship between calcite content and porosity/permeability in the Chang 8 formation in study area

以栉壳状生长的绿泥石最常见。前人研究认为^[5-6], 绿泥石胶结的出现可以通过成岩过程中矿物之间的转化来实现(表 3)。

上述生成绿泥石的反应式, 无论是哪种成因都需要丰富的 Fe、Mg 离子^[7]。受物源影响, 岩石颗粒中含有一定量的岩浆岩岩屑。在成岩过程早期, 受黑云母、岩浆岩岩屑等物质的影响, 孔隙水中释放出大量的 Fe、Mg 离子。另外, 研究区延长组各油层组的沉积相均大面积发育三角洲前缘沉积, 因河流带来的丰富的溶解铁, 三角洲前缘沉积中含有丰富的铁、镁离子, 随着成岩环境(温度、压

力、孔隙水酸碱性等)的不断变化, 各种粘土矿物(高岭石、伊利石、蒙脱石等)析出^[8-11], 为粘土矿物向绿泥石转化提供了条件。研究区砂岩储层中绿泥石的出现一定程度上增强了砂岩的抗压实程度, 起到了保护粒间孔的作用^[7, 12-13], 考虑到粘土薄膜自身所占据的空间也会使原生粒间孔明显变小, 并占据孔隙吼道, 从而降低砂岩的渗透率, 增强储层的非均质性, 绿泥石的出现对储层的影响是具有两面性的。统计发现, 砂岩中环边绿泥石的含量与面孔率之间呈现明显的正相关关系(图 5), 说明绿泥石所占据的孔隙空间与其所保护的

表 2 研究区长 8 油层组粘土矿物含量

Table 2 The clay mineral content of Chang 8 oil-bearing in research area

井号	井深/m	层位	粘土矿物相对含量/%						伊/蒙混层中蒙脱石(S)相对含量/%
			S	I/S	I	K	C	C/S	
ZF5	753	长 8	/	24	20	/	56	/	20
ZF2	1078.5	长 8	/	17	42	/	41	/	15
ZF3-3	807.55	长 8	/	31.7	19.67	/	48.7	/	35
ZF4	1141.41	长 8	/	29	30.5	/	40.5	/	30
ZF10	860.14	长 8	/	36	38	7	19	/	30
ZF13	1015.94	长 8	/	10	61	/	29	/	10
ZF18	1038.46	长 8	/	34.55	34.5	7.75	23.2	/	30
ZF21	771.78	长 8	/	16	8	/	76	/	35
ZF25	1024.59	长 8	/	10.25	62	6.75	21	/	10
ZF29	985.67	长 8	/	11	20	10	59	/	10
FG4	980.27	长 8	/	28	43	11	18	/	30
ZF28	1168.79	长 8	/	12	31	10	47	/	10
旺 7	895	长 8	/	44	33	/	23	/	10

表3 绿泥石生成的可能反应式
Table 3 The possible chemical reaction equations of Chlorite generation

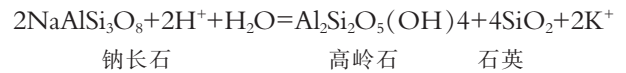
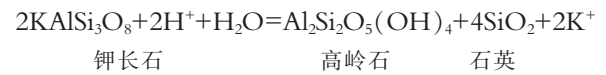
高岭石→绿泥石	$4\text{Fe}^{2+}+2\text{Mg}^{2+}+3\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4+9\text{H}_2\text{O}=\text{Fe}_4\text{Mg}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}+14\text{H}^+$ (高岭石) (绿泥石)
伊利石→绿泥石	伊利石+1.64Mg ²⁺ +1.89Fe ²⁺ +8.24H ₂ O=0.82 绿泥石+0.6K ⁺ +1.37H ₄ SiO ₄ +6.46 H ⁺
钾长石→绿泥石	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8+0.4\text{Fe}^{2+}+0.3\text{Mg}^{2+}+1.4\text{H}_2\text{O}=0.3(\text{Fe}_{1.4}\text{Mg}_{1.2}\text{Al}_{2.5})(\text{Al}_{0.7}\text{Si}_{3.3})\text{O}_{10}(\text{OH})_8+2\text{SiO}_2+0.4\text{H}^++\text{K}^+$
蒙脱石→绿泥石	$8\text{Ca-Mon}+1.85\text{Mg}^{2+}+1.85\text{Fe}^{2+}+14.8\text{H}_2\text{O}=\text{ChI}+0.29\text{Ca}^{2+}+4.6\text{H}_4\text{SiO}_4+6.8\text{H}^+$

孔隙体积相比,后者显得更为重要。

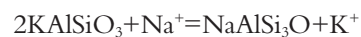
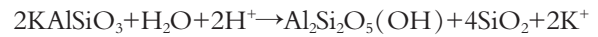
伊利石常呈丝状、弯曲状包裹或充填颗粒,以“搭桥”状胶结颗粒,使孔隙连通性变差,伊/蒙混层矿物呈蜂窝状,也对孔隙、吼道进行胶结;高岭石呈书页状、不规则片状充填于粒间,对孔隙进行胶结(图版 I)。

4.2.3 硅质胶结作用

硅质胶结通常是以石英次生加大及长石的形式出现的,自生石英在成岩阶段早期析出^[14-17]。薄片观察中偶见 I 级石英次生加大,石英具有窄的加大边,自生晶面开始发育。镜下自生石英呈六方双锥充填于粒间孔隙中(图版 I)。由于本区砂岩成分成熟度较低,推测自生石英来自长石的溶蚀高岭石化释放出的 SiO₂。



自生长石的析出有 2 种形态:以自生加大边的形式出现和以半自形粒状钠长石充填孔隙出现(图 4)。长石溶蚀后,大量的 K⁺、Na⁺、Ca⁺等离子迁移并进入孔隙水中,促使粘土矿物形成与转化,并进一步形成伊利石等粘土矿物,而 SiO₂ 和 Al₂O₃ 等就近形成高岭石和 SiO₂ 沉淀,同时可使钾长石发生钠长石化,形成钠长石次生加大边或自生钠长石^[9]。公式如下:



钾长石 钠长石

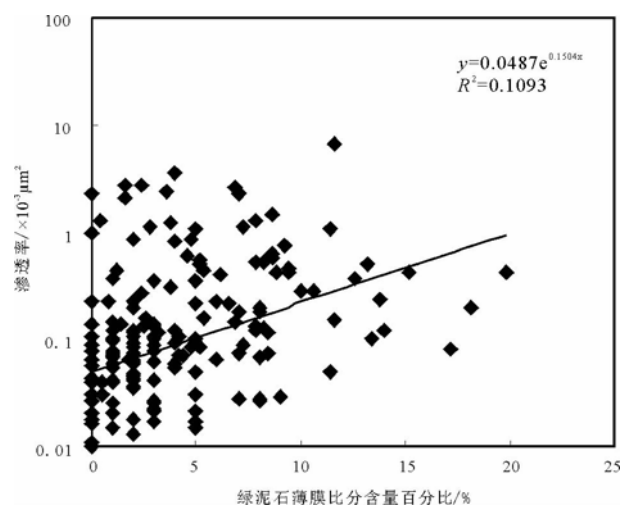
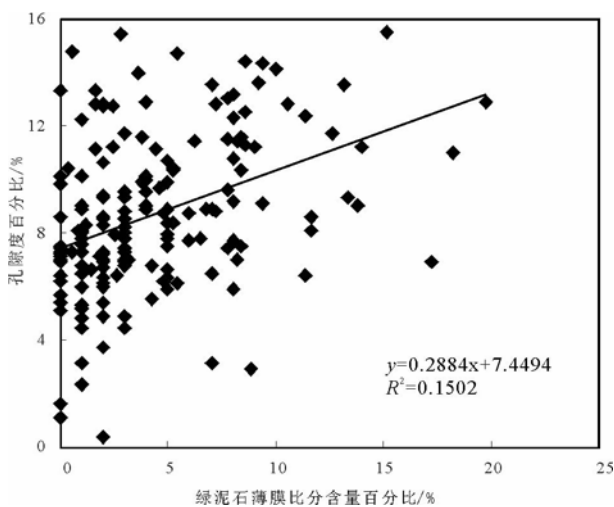


图5 研究区长 8 油层组绿泥石薄膜含量与孔渗关系
Fig. 5 The relationship between chlorite film and porosity/permeability in the Chang 8 formation in study area



高岭石

伊利石

4.3 溶解作用

由可溶性颗粒和可溶性基质的选择性溶解形成,可溶性物质的溶解可以产生大量的次生孔隙,成为具有建设性的成岩作用^[18-19]。本区延长组成岩温度达 110~119℃,这个阶段有机酸达到高峰。研究区长 8 油层组砂岩中有大量的长石、岩屑等易溶组分,在有机酸等的作用下,形成溶蚀孔隙。研究区长 8 油层组中发育的粒内溶蚀包括长石的溶蚀孔和岩屑的溶蚀孔,长石的溶蚀最为普遍,镜下多见长石沿解理缝进行(图版 I),当成岩温度超过 100℃后,有机酸开始脱羧酸形成 CO₂,并由此形成碳酸,此过程也使 PH 值降低,并参与对长石、岩屑的溶解。国内外许多学者^[20-21]都认为有机酸比碳酸具有更佳的热驱动性,亦即有机酸的溶解能力强于碳酸的。因此,尽管 CO₂ 分压的升高缓冲了有机酸,但有机酸仍然控制着长石的溶解。

4.4 交代作用

交代作用在研究区长 8 油层组中主要表现为方解石对长石的交代。由于研究区内方解石的溶蚀并不多见,晚期方解石对长石、石英等碎屑颗粒有交代作用(图版 I),但一般是局部的,并不普遍,这种交代作用常堵塞孔隙,并使渗透率降低。然而由于交代过程服从体积保持不变定律和质量作用定律,因此,事实上交代作用对储层的影响不大。

5 成岩阶段及与成岩-孔隙演化特征

5.1 成岩阶段

采用石油天然气行业标准《碎屑岩成岩阶段划分规范》(SY/T5477-2003),根据包裹体均一温度、镜质体反射率(R_o)、自生油层组矿物的成分、形态、产状、生成顺序和组合特征等确定研究区的成岩阶段。

研究区长 8 段碎屑岩镜质体反射率平均值为 0.78%,碎屑颗粒大多以点-线接触,砂岩经历了较强的压实改造,原生孔隙大量丧失,次生孔隙较发育;铁方解石、铁白云石等晚期碳酸盐胶结物大量出现;长石、岩屑发生溶蚀,伊利石、绿泥石等粘土矿物常见。包裹体均一温度测试表明,包裹体大量形成的温度在 110~119℃,根据石油天然气行业标准(2003),研究区长 8 段储集砂岩的成岩阶段主要处于中成岩阶段 A 期。

5.2 成岩-孔隙演化特征

根据岩心取样分析,长 8 油层组孔隙度的平均值仅为 8.59%,可见,研究区长 8 段储层从早成岩到中成岩 A 期经历了复杂的成岩演化过程,各种复杂的成岩作用极大地影响了岩石的孔渗性能。

早期成岩阶段的机械压实能使原生孔隙大量丧失,胶结作用虽然也堵塞孔隙,但不减少粒间体积,一旦孔隙流体与岩石之间的平衡被破坏,这些自生胶结物仍可被溶解而再次成为孔隙,但无论如何,胶结作用如果进行得快,压实作用就会受阻^[22]。为了评价这两者作用的相对重要性,可作出评价图。本文使用这一评价图定量评价了研究区胶结作用对孔隙度的影响(图 6)。图中:

被压实作用减少的原始孔隙百分比 = [(40 - 粒间体积) / 40] × 100%

被胶结作用消除的原始孔隙百分比 = (胶结物 / 40) × 100%

溶解作用给储层带来的影响就是次生孔隙的产生,通过定量化的计算,可以大致了解研究区内延长组砂岩储层的成岩过程中,溶解作用对储层孔隙的贡献率。

由溶解作用增加的孔隙度 = (溶蚀孔面孔率 / 总面孔率) × 现今孔隙度

早成岩阶段,机械压实作用是砂岩原始孔隙降

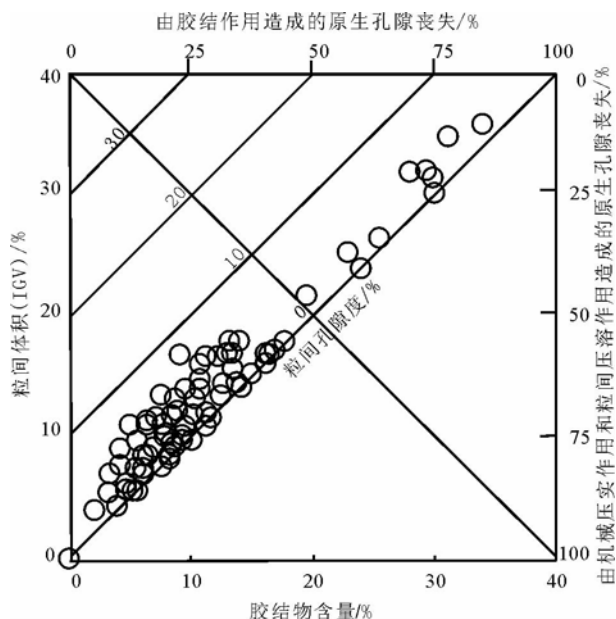
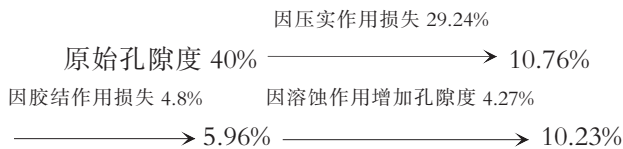


图 6 研究区长 8 砂岩粒间体积-胶结物含量关系
Fig. 6 Plot intergranular volume versus cement for the Chang 8 sandstones

低的主要因素,压实作用使沉积物迅速压实,原始粒间孔大量消失,由图5可以看出长8段砂岩储层由压实作用造成的平均孔隙度丧失为4%~35%,平均为29.24%。可见,早期成岩阶段的压实作用可造成砂岩孔隙的大量丧失。随着成岩作用的进行,绿泥石、石英、碳酸盐等自生矿物形成,主要在粒间孔壁和残余粒间孔中结晶、沉淀析出,并胶结充填孔隙,孔隙度减少量可达4.8%,进一步降低储层储集性能。易溶矿物颗粒的溶蚀作用在一定程度上改善了孔、渗条件,经计算,溶蚀作用所产生的新的孔隙可达4.27%,储层孔隙度达到10.23%(实测样品孔隙度值8.07%),使储层储集性能得到提高。具体演化过程为:



在各类成岩作用的共同影响控制下,研究区长8段储层砂岩孔隙演化整体上呈减小趋势,后期的溶蚀改造使得孔隙得到一定程度的增加。

6 结 论

鄂尔多斯盆地东南缘长8油层组储层是在湖泊—三角洲沉积背景下沉积的一套砂岩,岩石类型主要为细粒长石砂岩、岩屑长石砂岩,岩石组构表现为低成分成熟度中等。成岩作用是控制研究区储层物性的一个关键因素,在孔隙演化的过程中,压实、胶结作用对储层起破坏作用,溶蚀作用、环边绿泥石胶结主要起建设作用。

目前研究区长8段储集层已达到中成岩阶段A期,砂岩储层在经历了复杂的成岩演化后,原生孔隙大部分因压实及胶结作用而消失,有机酸的大量出现所形成的酸性成岩环境是次生孔隙发育的主要因素,次生孔隙的出现在一定程度上改善了储层的储集性能。

参 考 文 献

[1]刘媛,朱筱敏,张思梦,等.松辽盆地北部三肇凹陷下白垩统泉头组4段储集层成岩作用及孔隙演化[J].古地理学报,2010,12(4):480-489.

[2]王伟,王兴志,张帆,等.四川广安地区须家河组四段储层成岩作用

与孔隙演化[J].世界地质,2010,29(1):96-104.

[3]朱筱敏,钟大康,张琴,等.济阳拗陷古近系碎屑岩储层特征和评价[M].北京:科学出版社,2008.

[4]罗静兰,刘小洪,林渝,等.成岩作用与油气侵位对鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层物性的影响[J].地质学报,2006,27(2):200-208.

[5]韩宝平,冯启言.充州矿区红层砂岩中自生绿泥石的产状和成因[J].中国矿业大学学报,1999,28(1):53-56.

[6]田建锋,陈振林,凡元芳,等.砂岩中自生绿泥石的产状、形成机制及分布规律[J].矿物岩石地球化学通报,2008,27(2):200-206.

[7]黄思静,谢连文,张萌,等.中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系[J].成都理工大学学报(自然科学版),2004,31(3):273-281.

[8]Pinsak A P, Murray H H. Regional clay mineral patterns in the Gulf of Mexico[C]//Proc.7th Natl.Conf., Clay and Clay Minerals, 1969: 162-178.

[9]Griffi J J. The distribution of clay minerals in the word ocean [J]. Deep-Sea Res., 1968,15:433-459.

[10]Gibbs R J. Clay mineral segregation in the marine environment [J]. Sediment. Petrol., 1977,47:237-243.

[11]Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated [J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(2): 349-369.

[12]罗静兰,张晓莉,张云翔,等.成岩作用对河流—三角洲相砂岩储层物性演化的影响——以延长油区上三叠统延长组2砂岩为例[J].沉积学报,2001,19(4):541-547.

[13]柳益群,李文厚.陕甘宁盆地东部上三叠统含油长石砂岩的成岩特点及孔隙演化[J].沉积学报,1996,14(3):87-96.

[14]Ehrenberg S N. Kaolinized, potassium-leached zones at the contacts of the Garm Formation, Haltenbank -en, mid-Norwegian continental shelf [J]. Marine and Petroleum Geology, 1991, 8: 250-269.

[15]Curits C D. Link between aluminium mobility and destruction of secondary porosity [J]. AAPG Bulletin, 1993, 67:380-384.

[16]杨俊生,孟元林,张宏,等.石英胶结作用化学动力学模型及应用[J].石油实验地质,2002,24(4):372-376.

[17]Walderhaug O. Modeling quartz cementation and pporosity in Middle Jurassic Brent Group sandstones of the Kvitebjom Field North Sea [J]. AAPG Bull., 2000, 84(9):1325-1339.

[18]马青,敬国超.砂岩在酸溶过程中的岩石学变化[J].石油实验地质,1991,13(3):256-263.

[19]李群,郭建华,郭宇航.华池油田华152区长3油层组砂岩的成岩作用与孔隙演化[J].地质学报,2008,28(2):40-46.

[20]Surdam R C, Bose S W, Crossey L J. The chemistry of secondary porosity (in Clastic diagenesis) [J]. AAPG Memoir. 1984, 37:127-149.

[21]朱国华.碎屑岩储集层孔隙的形成、演化和预测[J].沉积学报,1992,10(3):114-124.

[22]Joachim E Amthor, Jos Okkerman. Influence of early diagenesis on reservoir quality of rotliegende sandstones, Northern Netherlands [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(12):2246-2265.