

文章编号: 1000-0550(2006)05-0690-08

鄂尔多斯盆地镇北地区长 3 砂岩的成岩作用及其对储层的影响^①

刘林玉 王震亮 张 龙

(西北大学大陆动力学重点实验室 西北大学地质系 西安 710069)

摘 要 根据砂岩薄片、铸体薄片、扫描电镜、X 衍射分析,研究了鄂尔多斯盆地西峰油田镇北地区长 3 储层的成岩作用特征,认为该区长 3 储层处于晚成岩 A 期阶段,压实作用和胶结作用强烈地破坏了砂岩的原生孔隙结构,溶蚀作用和破裂作用则有效地改善了砂岩的孔隙结构。该区长 3 储层发育溶蚀作用相、压实作用相、胶结作用相和自生绿泥石胶结残余孔隙相,储层成岩相发育状况决定了孔隙结构的发育特征。发育次生孔隙相和残余孔隙相的砂岩具有较好的孔隙结构,孔渗较高;压实作用相和胶结作用相发育的砂岩具有很差的孔隙结构,孔渗很低。

关键词 成岩作用 成岩相 孔隙结构 镇北地区 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 刘林玉 男 副教授 博士 油气储层地质、开发地质与沉积学

中图分类号 P588.21 **文献标识码** A

1 引言

鄂尔多斯盆地中生界大规模的石油勘探已进行了 30 多年。生产实践表明:上三叠统延长组三角洲砂岩沉积发育,为油气富集提供了有利条件。镇北地区位于鄂尔多斯盆地的西南部(图 1),从区域构造单位分布看,本区西接天环坳陷,东邻陕北斜坡,主体落入天环坳陷。上三叠统延长组是镇北地区重要的含油层系。该套地层不仅分布广,埋藏浅,而且油层多,勘探命中率高,在油气储层研究与油藏评价过程中,储集层成岩作用研究是重要的研究内容之一。更值得注意的是,上三叠统延长组长 3 段划分为长 3₁、长 3₂和长 3₃砂层组,其低孔低渗低产的特点异常突出。

2 岩石学特征

镇北地区的长 3 段的储集岩石类型主要为灰色、浅灰色、灰褐色的中细粒长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩。长 3 段砂岩中的石英含量约为 38%~60%,其中以单晶石英为主,燧石含量较少,部分可见波状消光。长石碎屑含量约 12%~22%,以斜长石为主,次为正长石,少量微斜长石。岩屑含量约为 12%~35%,部分可达到 35%,以干枚岩岩屑为主,次为硅质岩岩屑、粘土岩岩屑,少量云母碎片。砂岩粒度主要呈细粒,部分发育中—细粒及粉—细粒结构,见少

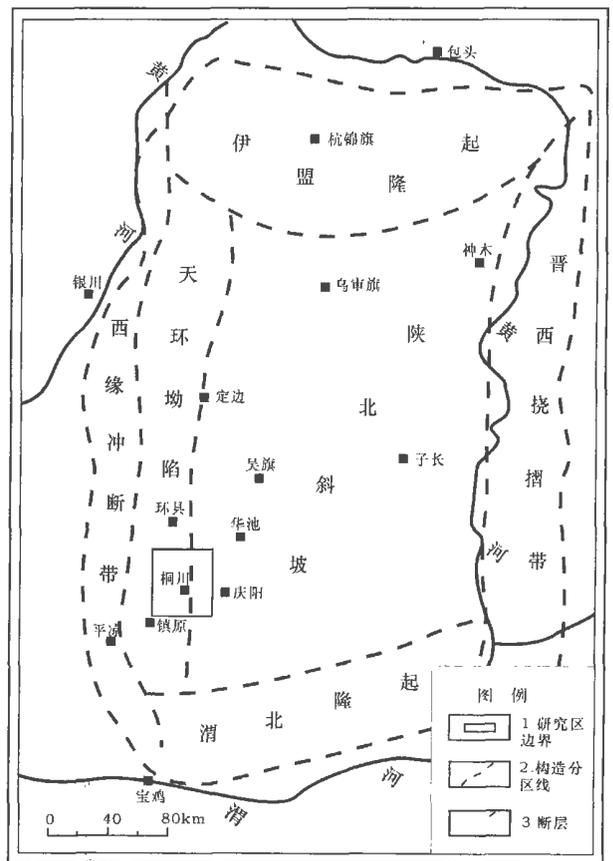


图 1 镇北地区在盆地中的位置

Fig 1 The location of Zhenbei area in Ordos basin

^①国家 973 项目(2003CB214605)和西北大学科研基金(O KYQDF 014)资助。

收稿日期: 2005-12-16 收修修改稿日期: 2006-03-09

量粗砂岩。碎屑颗粒以次棱角状为主,分选较好,常呈线性接触,部分可见点接触及凹凸接触,颗粒支撑,以接触式—孔隙式胶结为主,成分成熟度较低、结构成熟度中等。

通过岩石学、扫描电镜和 X 射线衍射分析,镇北地区长 3 段砂岩的填隙物含量一般为 4% ~ 15%。自生矿物以绿泥石、高岭石和伊利石等粘土矿物为主,含少量的硅质胶结物,含量变化较大。

3 成岩作用类型及特征

镇北地区延长组长 3 的砂岩储层主要发生了压实作用、胶结作用、破裂作用和溶蚀作用等一系列成岩作用类型,成岩作用复杂^[1,2,3],成岩现象丰富,并对储集层孔隙发育影响显著。

3.1 压实作用

镇北地区三叠系延长组长 3 油层组砂岩颗粒间的接触紧密,且局部出现凹凸、缝合接触。区内储层几乎未见十分明显的压溶现象,表明储集砂岩以机械压实作用为主。

研究区内延长组普遍发育粘土膜沉淀,其成分主要是陆源粘土或早期成岩粘土,以绿泥石为主,属于早期成岩作用的产物,通常形成于水动力较强的沉积环境。绿泥石粘土膜常呈原薄膜状覆盖在颗粒表面,增加了岩石的机械强度,可以抵抗压实作用,从而有利于保存粒间孔隙(图 2)。

3.2 胶结作用

① 硅质胶结物

硅质胶结物在研究区分布普遍,但含量较少。其中 SiO₂ 的来源主要有以下几个途径:来源于地表水和地下水、碎屑岩石英压溶作用、粘土矿物的成岩转

化作用如蒙脱石向高岭石转化等等。由于以上成岩现象在研究区都较少发育,不可能为硅质胶结物的形成提供大量物质来源,因此导致此类胶结物含量较少(<4%)。

② 绿泥石包膜

砂岩的绿泥石包膜在研究区内极为普遍(图 2)。绿泥石包膜形成于成岩作用早期,对镇北储层的影响具有双重性。一方面,它占据了一定的孔隙空间,使得孔隙体积减小,喉道变窄,从而降低孔隙度和渗透率,还可以发生敏感性反应,导致孔隙阻塞。另一方面,它将颗粒与孔隙隔离,可以阻止颗粒的次生加大,也在一定程度上阻止其它胶结物的沉淀,同时,它还可以支撑颗粒,抵抗一定的机械压实作用,从而有利于原生粒间孔隙的保存。

③ 碳酸盐胶结物

碳酸盐胶结物在研究区延长组碎屑岩中非常普遍,主要呈粒间胶结物、交代物或次生孔隙内填充物形式出现。常见微晶状、晶粒状或连晶状产出,成分上主要以方解石、铁方解石、白云石、含铁白云石及铁白云石为主。碳酸盐胶结物在不同成岩阶段均有产出,只是在晶体大小和成分上有较大差异。

此类胶结物对储集层的发育起着双重影响:一方面,碳酸盐胶结会堵塞孔隙,从而使储层质量变差;另一方面,胶结物在储层中的沉淀可以起到支撑作用,有效降低砂岩的压实程度,为酸性水溶蚀和次生孔隙形成创造有利条件。

3.3 溶解作用

本区砂岩的溶解作用发育非常普遍。主要表现为碎屑岩中易溶组分的溶解,形成大量次生孔隙。①长 3、长 8 段发育的滨浅湖相泥页岩在热演化过程中,

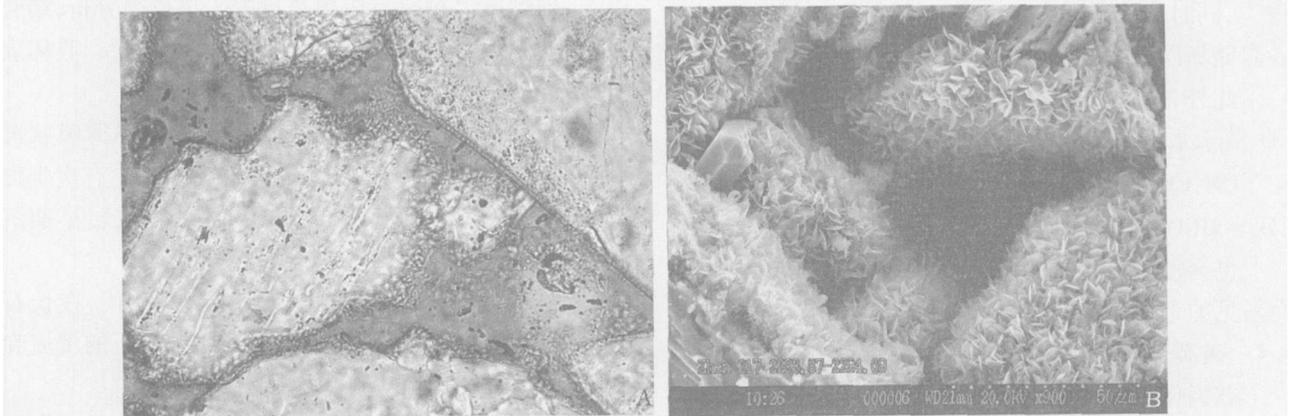


图 2 碎屑表面的绿泥石包膜

Fig 2 The chlorite membrane on the surface of fragments

有机质可通过脱羧基作用生成一元、二元有机酸,并释放出 CO_2 和氮等组分,并随压实作用的进行排替砂岩的孔隙系统内,故砂岩孔隙内可存在具有较为充足的有机酸和 CO_2 ;②砂岩的成分和结构成熟度均较低(以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主),富含长石和岩屑颗粒,尤以长石颗粒易发生溶解(图3),可溶组分为发育。

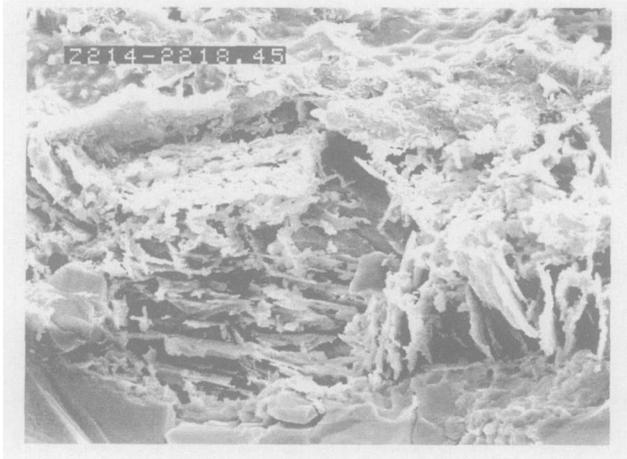
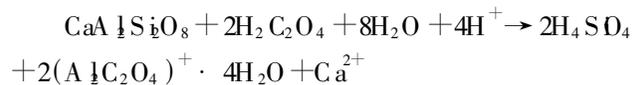


图3 长石碎屑的溶解现象

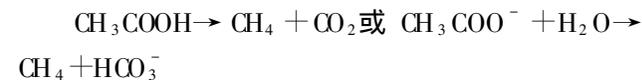
Fig 3 The dissolution of feldspar fragment

从其形成机制看,长3储层随着埋深增大,地温增高,热降解作用使干酪根外部的含氧官能团(如羧基)发生脱离,从而形成大量的有机酸。当这些有机酸随孔隙流体沿优势通道进入砂岩之后,有机酸就会溶蚀碎屑岩中的酸溶性组分。同时,有机酸使铝的溶解度大大增加,导致长石岩屑的大量溶解。如:



长石溶解后,形成了一定量的溶蚀型次生孔隙^[4],同时可形成高岭石(图4)在一定程度上改善了砂岩储集层的孔隙结构。

此外,有机酸还会发生脱羧基作用,其生成的 CO_2 溶于水形成碳酸:



也会使砂岩中易溶成分溶解,形成次生孔隙。显而易见的是,溶解作用是形成次生孔隙的主要原因。

3.4 破裂作用

破裂作用是指成岩过程中岩石在外力作用下发生破裂而产生裂缝孔隙的作用。在研究目的层的岩心和铸体薄片观察中,均发现砂岩裂缝发育(图5),这在一定程度上改善了储层的渗透性。

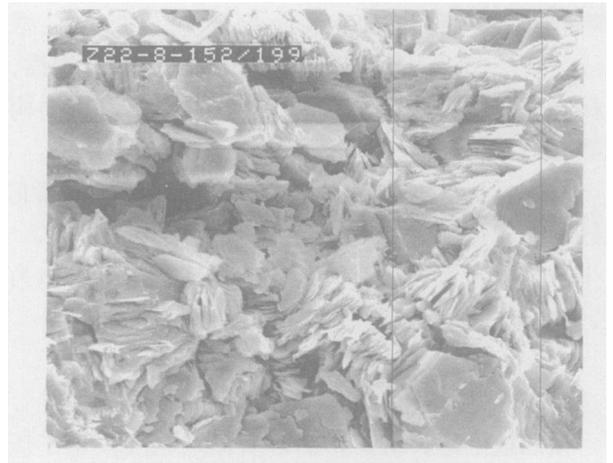


图4 长石溶解产生的高岭石

Fig 4 The kaolinite of feldspar dissolution



图5 破裂作用形成的裂缝

Fig 5 The fracturing formed fissure

4 储集层成岩作用序列及成岩阶段的确定

根据以上对成岩作用及自生矿物成因分析,结合镜下的各类成岩现象,进行了成岩序列分析。具体表现为:

(1)以绿泥石为主的粘土矿物,呈等薄膜状覆盖在颗粒表面,在粘土膜包围的石英颗粒少有次生加大,说明粘土膜的形成早于自生石英,为成岩早期沉积。

(2)部分石英次生加大边被方解石交代,在长石溶蚀孔隙中可见方解石胶结物,因此方解石的沉淀晚于石英次生加大和长石颗粒的溶蚀作用。

(3)长石溶蚀孔隙中常见有自生高岭石矿物的分布^[5],两者具有明显的共生关系,其形成时间基本一致。

(4)方解石胶结物呈微细晶状,部分已重结晶成连晶状,常可见到铁白云石菱面体交代方解石,说明铁白云石形成于方解石之后。

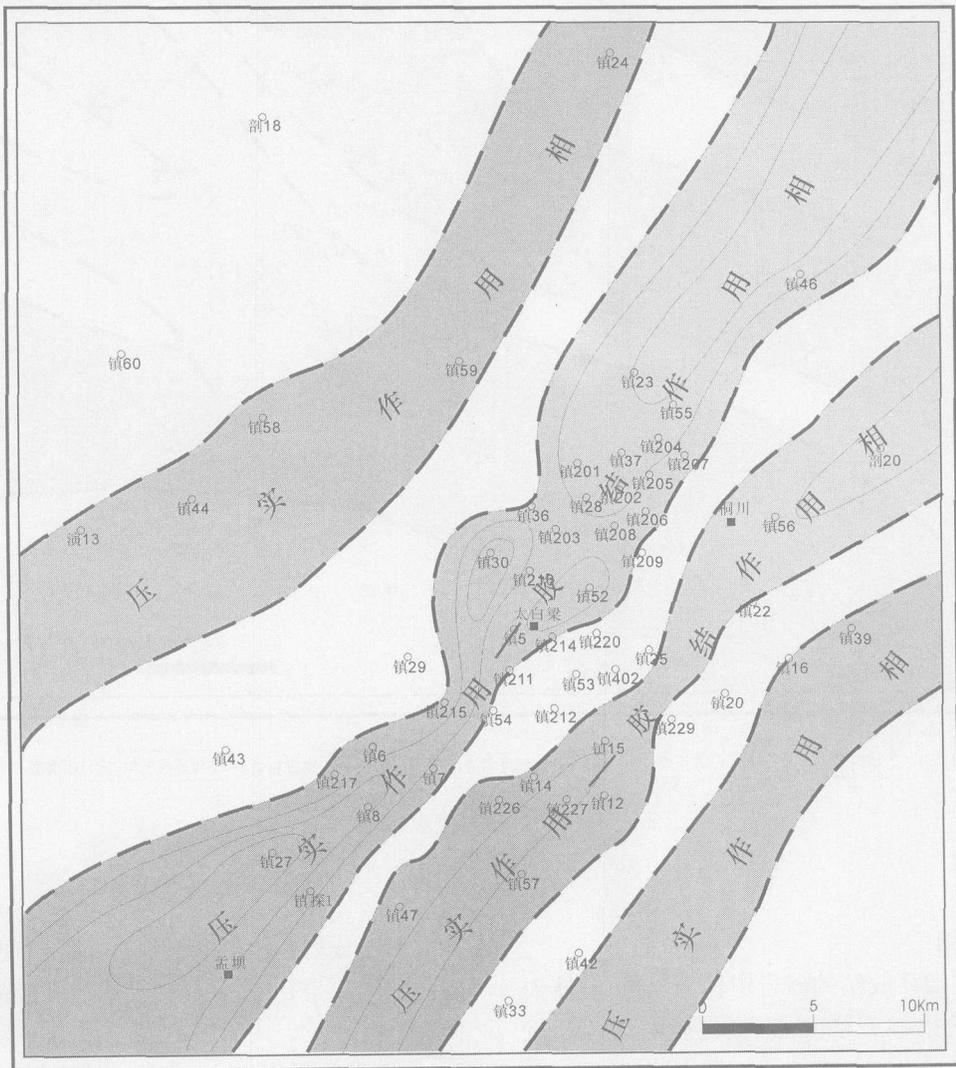
因此,根据上述分析可确定镇北地区长 3 储集层的成岩序列为:机械压实→早期粘土膜形成→石英次生加大→微晶方解石沉淀→亮晶方解石沉淀→长石颗粒、方解石胶结物溶解→自生高岭石形成→方解石沉淀→方解石溶解→晚期铁白云石充填。

参照我国石油行业目前最新(2003年)的碎屑岩成岩阶段划分方案,综合考虑各种成岩指标,据砂岩铸体薄片和扫描电镜的观察分析,镇北地区长 3 段砂岩普遍经历了较强的压实作用,多以机械压实为主,几乎不受压溶作用影响;砂岩中原生孔隙大量丧失,

次生孔隙普遍发育;早期方解石胶结物多为孔隙式胶结,晚期铁方解石出现,多充填次生溶蚀孔隙中;长石、岩屑等常发生明显的溶蚀作用;伊利石、高岭石和绿泥石等自生粘土矿物比较常见,伊蒙混层比小于 10。从上述成岩特征综合判断,长 3 段砂岩目前应处于中成岩阶段 A 期。

5 成岩作用相及成岩作用对储层的影响

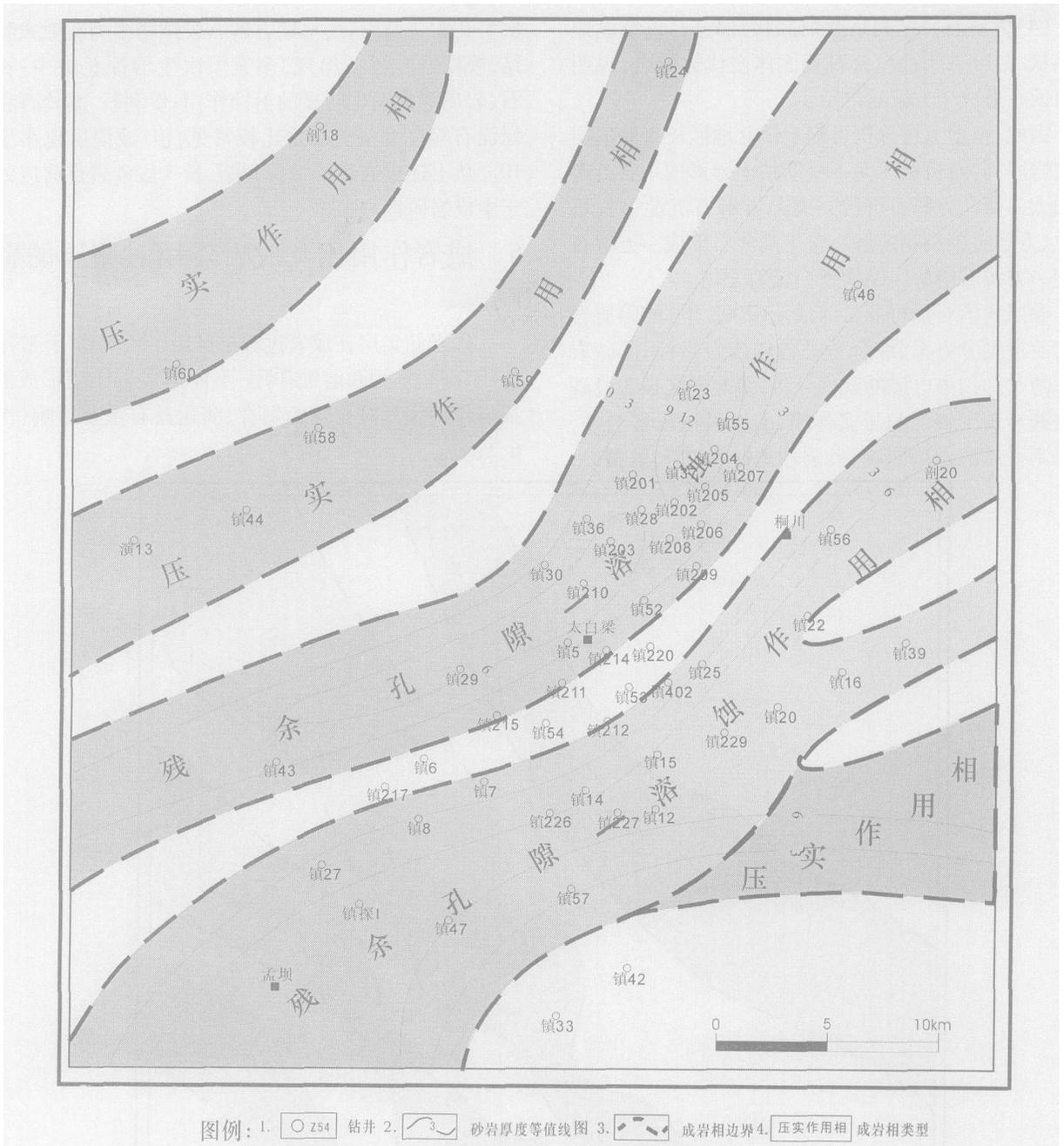
砂岩储集层在成岩过程中经历了压实作用、胶结作用、破裂作用和溶蚀作用,不同的成岩作用形成的成岩作用相其对孔隙的发育、演化具有重要影响(图 6、7、8)。



图例: 1. 井 2. 砂岩厚度等值线图 3. 成岩相边界 4. 压实作用相 成岩相类型

图 6 长 3 砂岩成岩相图

Fig. 6 The sandstone lithofacies of Chang3

图7 长₃砂岩成岩相图Fig 7 The sandstone lithofacies of Chang ₃₂

5.1 压实作用相

压实作用在泥质胶结的砂岩中较为强烈,具体表现为碎屑颗粒的接触关系由点到线,局部为凹凸接触;矿物的柔性组分变形;刚性矿物发生破裂;矿物颗粒发生定向排列。机械压实作用使储层中的原生孔隙大量减少,岩石体积缩小,不利于孔隙的保存。而在绿泥石膜发育的长石砂岩中,压实作用较弱,颗粒间呈点一线接触,残余粒间孔较发育。

由于成岩作用早期绿泥石膜的出现,有利于保护砂岩中的原生孔隙,并为后期次生孔隙的形成提供空间。

5.2 胶结作用相

本区砂岩中的胶结物主要为自生粘土矿物、碳酸盐矿物及自生石英等。胶结类型有孔隙式、再生式、薄膜式等。

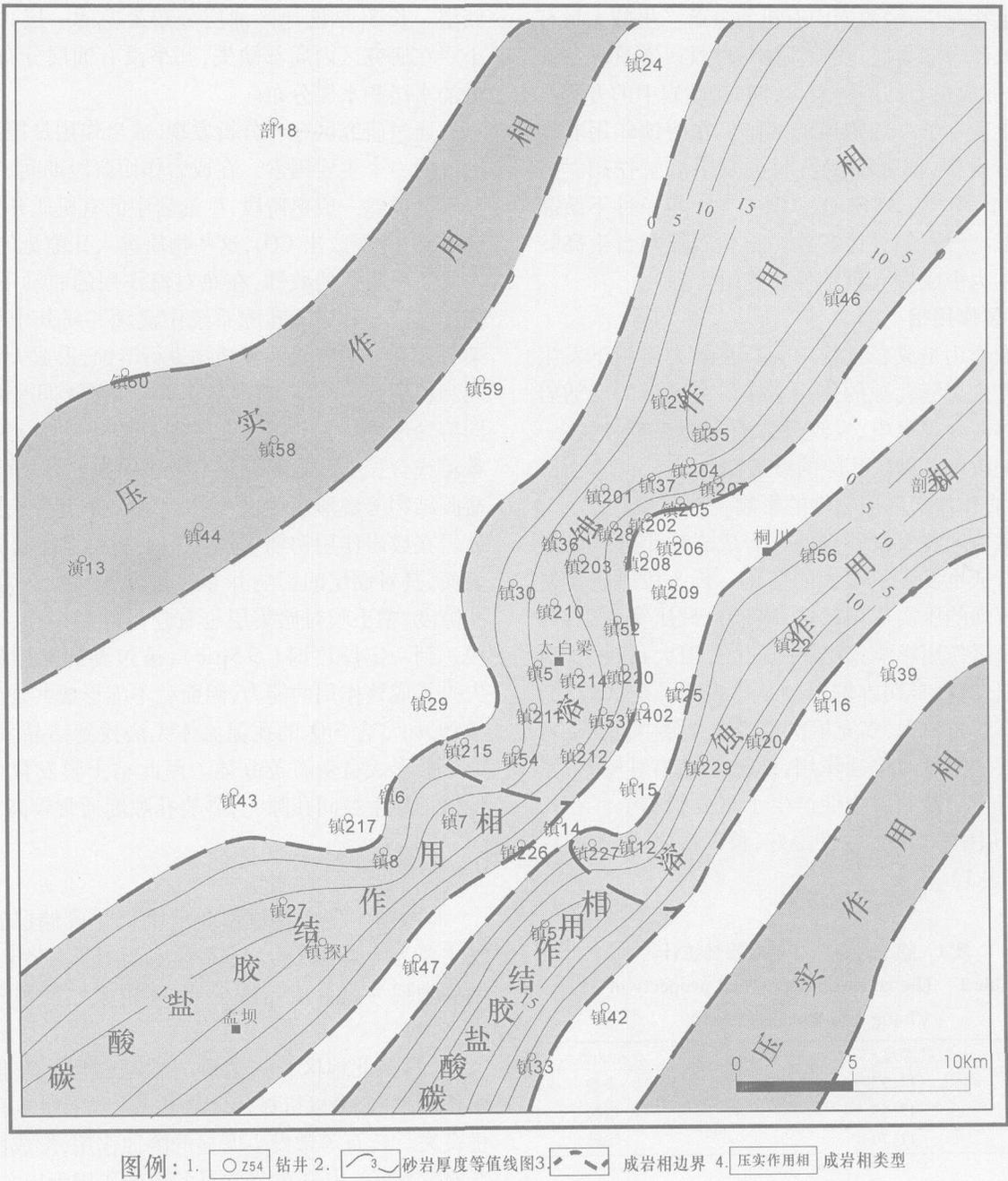


图 8 长 3 砂岩成岩相图

Fig 8 The sandstone lapidofacies of Chang3

早成岩 A 期, 砂岩中的黑云母发生水解作用, 为绿泥石膜的形成提供了 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 。绿泥石膜为绿泥石垂直于颗粒表面生长所致, 一般呈栉壳状结构, 使砂岩粒间孔隙变为残余粒间孔隙。此外, 在局部地段也形成了少量微晶方解石胶结物, 同时随成岩强度的加大, 石英碎屑发生次生加大, 形成再生式石英胶结物。

事实上, 碱性自生矿物胶结物的析出, 一方面在一定程度上降低了原生孔隙度; 另一方面为溶蚀型次生孔隙的发育提供物质基础。

中成岩 A 期, 部分方解石胶结物被含铁方解石交代, 同时在粒间普遍形成了自生石英及绿泥石、高岭石、伊利石等粘土矿物。

5.3 溶解作用相

在中成岩 A 期, 与油气生成和液态窗口埋藏深

早成岩 B 期, 亮晶方解石与伊蒙混层发生析

度及温度相对应, 烃源岩中有机质分解产生的大量有机酸进入砂岩储集层, 孔隙流体呈酸性。在这种条件下, 容易促成长石的溶解发生, 同时, 砂岩中的方解石胶结物也发生了一定规模的溶解。在溶蚀作用非常强烈的砂岩中, 部分绿泥石膜也发生溶解作用。另外, 长石溶解产生 $AlSi_3O_5(OH)_4$ 在一定条件下结晶产生自形高岭石集合体矿物。自生石英与自生高岭石集合体为中成岩 A 期酸性矿物组合。

5.4 破裂作用相

破裂作用是成岩过程中岩石在外力作用下发生破裂而产生裂缝孔隙的作用。在研究区目的层的岩心和铸体薄片观察中, 发现砂岩有裂缝出现, 这在一定程度上改善了储层孔隙的渗透性。

5.5 成岩作用对储层物性的影响

镇北地区长 3 段砂岩的成岩成岩作用导致储层的物性特征也发生了很大的变化。长 3 段砂岩普遍经历了较强的压实作用改造, 多以机械压实为主, 几乎不受压溶作用影响; 砂岩中原生孔隙大量丧失, 次生孔普遍发育; 早期方解石胶结物多为孔隙式胶结, 晚期铁方解石出现, 多充填次生溶蚀孔隙中; 长石、岩屑等常发生明显的溶蚀作用, 裂缝发育相对较差, 复杂的成岩作用对储层物性产生了重要影响^[6]。在长 3 段各小层中, 长 3₃ 的物性最好, 长 3₂ 次之, 长 3₁ 的物性最差 (表 1)。

表 1 镇北地区长 3 储层物性统计

Table 1 The reservoir's physical property of Chang 3 in Zhenbei area

层段	孔隙度 %	透率 $10^{-3} \mu m^2$	相关性
长 3 ₃	11.95	1.57	指数
长 3 ₂	12.39	4.47	指数
长 3 ₁	11.79	2.04	线性

长 3₃ 是该地区油层分布较差的一套地层, 油层分布很少, 主要是孤立的水层和干层, 孤立的油层主要局限在单井的周围, 其中镇 37 井日产油 4.35t, 镇 208 井日产油 2.8t, 长 3₂ 油层占含油层总厚度的 77.77%, 油层砂岩的孔隙度介于 11.93% ~ 13.36% 之间, 渗透率介于 $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \mu m^2$, 该层砂岩分布有残余粒间孔隙、溶蚀粒间孔隙、溶蚀粒内孔隙, 不发育宏观孔隙, 以溶蚀孔隙型孔隙组合为主。砂岩铸体薄片面孔率一般为 1% ~ 4%, 在研究区的西北部孔隙连通性相对较好, 其中镇 205 井日产油 15.47t, 镇 37 井日产油 7.3t 是长 3 各层中发育最好的

储层。长 3₃ 是该地区油层分布最差的一层, 由于该小层在研究区内局部缺失, 几乎没有油层分布, 有少量油水层和水层分布。

通过研究区综合分析发现, 成岩作用是控制油藏形成的一个主要因素。在成岩作用阶段期间, 有机质处于低成熟—成熟阶段, 生油岩中的有机质开始大量脱羧基, 并释放出 CO_2 , 这些物质进入孔隙流体中, 使水介质呈较强的酸性, 在热对流作用的驱动下, 酸性流体可以在砂岩的孔隙系统中流动并对其中易溶骨架颗粒和早期碳酸盐胶结物进行溶蚀, 形成大量的粒间和粒内溶蚀孔隙, 有时数个颗粒和颗粒间胶结物一同溶蚀形成特大孔隙。长 3 段砂岩中基本上以长石颗粒或含长石的岩屑颗粒溶解作用为主, 而早期碳酸盐胶结物溶解形成的次生孔隙含量并不高。长 3 段砂岩在成岩作用初期绿泥石粘土膜就已覆盖了颗粒表面, 其对储层的影响并非仅是占据储集空间, 降低孔隙度, 粘土膜对储集层也有建设性的一面, 当粘土膜达到一定厚度时 ($> 5 \mu m$), 被包裹的碎屑矿物就失去了成核作用的能力, 因而就不能形成共轴生长胶结物, 如富含 SO_4 的孔隙流体无法找到结晶基点, 从而不能形成自生石英晶体。因此粘土膜发育可有效地保护原生粒间孔隙^[7], 砂岩孔隙度通常较高。

6 结论

(1) 鄂尔多斯盆地镇北地区长 3 段储层岩石类型主要为中细粒长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩; 岩石结构表现为成分成熟度较低, 结构成熟度中等的特点。

(2) 镇北地区长 3 段砂岩普遍经历了较强的压实作用改造, 多以机械压实为主, 砂岩中原生孔隙大量丧失。长石等常发生明显的溶蚀作用, 形成次生孔普遍发育区。长 3 砂岩常见的成岩作用为压实作用、胶结作用、破裂作用和溶蚀作用, 砂岩储层处于中成岩 A 期。

(3) 镇北地区长 3 段砂岩储集层的成岩序列为: 早期粘土膜形成 → 机械压实 → 石英次生加大 → 微晶方解石沉淀 → 亮晶方解石沉淀 → 长石颗粒、方解石胶结物溶解 → 自生高岭石形成 → 方解石沉淀 → 方解石溶解 → 晚期铁白云石充填。

(4) 镇北地区长 3 段砂岩各层的成岩相带展布不同和受成岩作用的不均一性影响, 导致储层的孔隙结构和物性特征也发生了很大的变化。各小层中长 3₃ 的物性最好, 长 3₂ 次之, 长 3₁ 的物性最差。

参考文献 (References)

- 1 刘林玉, 柳益群, 李文厚, 等. 吐哈盆地台北凹陷三角洲沉积与成岩作用. 石油与天然气地质, 2002 23(4): 402~405 [Liu linyu, Liu Yiquan, Li wenhou, *et al*. Sedimentation and diagenesis of delta in Taibei sag of Turfan Han i basin. Oil and Gas Geology, 2002 23(4): 402~405]
- 2 Surdan R C. Organic inorganic interaction and sandstone diagenesis. AAG Bulletin, 1989 73(1): 1~23
- 3 刘林玉, 邱世祥, 薛祥熙. 民和盆地巴州坳陷储集层成岩作用. 石油与天然气地质, 1999 20(1): 58~61 [Liu Linyu, Di Shixiang, Xue Xiangxi. Diagenesis of reservoirs in Bazhou depression. Minhe basin. Oil and Gas Geology, 1999 20(1): 58~61]
- 4 刘林玉, 陈刚, 柳益群, 等. 碎屑岩储集层溶蚀型次生孔隙发育的影响因素分析. 沉积学报, 1998 16(2): 97~101 [Liu Linyu, Chen Gang, Liu Yiquan, *et al*. Analysis on influencing factors of solution type secondary pore evolution in clastic reservoirs. Acta Sedimentologica Sinica, 1998 16(2): 97~101]
- 5 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. 岩石学报, 1998 14(2): 258~268 [Liu Linyu, Liu Yiquan, Chen Gang. Property diagenetic significance of authigenic clay mineral in upper and middle Jurassic clastic rock of Tulufan depression. Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 1998 14(2): 258~268]
- 6 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. 沉积学报, 2001 19(4): 541~547 [Luo Jinglan, Zhang Xiaoli, Zhang Yunxiang, *et al*. The diagenesis influence on sandstone reservoirs physical property of river delta facies. Acta Sedimentologica Sinica, 2001 19(4): 541~547]
- 7 张金亮, 司学强, 梁杰, 等. 陕甘宁盆地庆阳地区长 8 油层砂岩成岩作用及其对储层性质的影响. 沉积学报, 2004 22(2): 225~232 [Zhang Jinliang, Si Xueqiang, Liang Jie, *et al*. Chang 8 oil sandstone diagenesis and the influence on Chang 8 reservoir of Qingyang area. Shangannong basin. Acta Sedimentologica Sinica, 2004 22(2): 225~232]

Sandstone Diagenesis and the Influence on Chang 3 Reservoir of Zhenbei Area Ordos Basin

LIU Lin yu WANG Zhen liang ZHANG Long

(Department of Geology, State Key Laboratory of Continental Dynamics Northwest University Xi'an 710069)

Abstract Based on the data analysis of casting lamella scan electron microscope and X-ray diffractions etc, the diagenesis include compaction, cementation, dissolution and fracturing, which belong to the "A" late diagenesis on Chang 3 reservoirs in Zhenbei area of oilfield in Ordos Basin. The compaction and cementation destroy the primary texture of pore intensively, dissolution and fracturing change the pore structure effectively. The Chang 3 reservoirs in Zhenbei area develop dissolution facies, compaction facies, cementation facies and authigenic chlorite cementation residual pores facies, which impact the pore character of reservoirs. The sandstone develops secondary-pore facies and residual pores facies that have the better pore texture. The sandstone porosity and permeability are better, the pelitic impurity compaction facies and carbonate cementation facies develop in sandstone that have the lesser pore, so that the sandstone porosity and permeability are very poor in this area.

Key words diagenesis, lapidofacies, pore texture, Zhenbei area, Ordos Basin