

文章编号: 1000-0550 (2005) 03-0397-09

鄂尔多斯盆地盐池—姬源地区三叠系长 4 + 5 砂岩成岩演化特征与优质储层分布

王 琪^{1,2} 祚喜准^{1,2} 陈国俊¹ 史基安¹ 王多云¹

1 (中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要 盐池—姬源地区延长组长 4 + 5 砂岩由台型和坡型三角洲前缘砂体组成,以岩屑长石砂岩和长石砂岩为主,其中石英、长石和岩屑平均含量分别为 24.7%、43.2%和 10.0%,岩屑也以变质岩屑和火成岩屑为主,占岩屑总量的 88.0%。砂岩目前处于早成岩阶段 B 期的晚期, R_o 为 0.8%, 温度在 70~90℃, 主要受酸性成岩环境控制,因此次生溶孔发育。在对砂岩各种组分含量统计的基础上,定量计算表明机械压实作用是造成研究区原生孔隙消亡的最主要原因,其次为胶结作用,而由溶蚀作用增加的孔隙占初始孔隙度比例较小 (<10%)。结合沉积相分析成果,在研究区可划分出 3 种沉积—成岩相带,即坡型三角洲前缘—绿泥石粘土膜胶结原生孔相、坡型三角洲前缘—晚期铁方解石胶结次生溶孔相和台型三角洲前缘—晚期铁方解石胶结相,其中有利的孔高渗储层区主要分布在前两种有利沉积—成岩相带结合部位。

关键词 成岩作用 沉积—成岩相带 优质储层 三叠系 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 王 琪 男 1967 年出生 研究员 在职博士生 储层沉积学与地球化学

中图分类号 P618.130.2⁺1 TE122.2

盐池—姬源地区位于鄂尔多斯盆地西南部,面积约 24 000 km²,该区构造位置横跨了天环坳陷和伊陕斜坡两大构造单元,其中盐池地区位于盆地天环坳陷东端,而姬源和定边等地区则位于伊陕斜坡上,与天环坳陷毗邻 (图 1)。从沉积环境来看,该区三叠系延长统属于中生代延长湖的一部分。鄂尔多斯盆地在晚三叠纪延长世为一大型内陆淡水湖盆,经历了完整的湖进—湖退过程,其中长 10 至长 7 为湖进期,长 6 至长 2 为湖退期,长 1 为准平原化期^[1,2]。长 7 为湖盆扩张最盛期,沉积了一套稳定、巨厚的深湖—半深湖相泥岩,为盆地中生界最重要的生油岩系。盐池—姬源地区位于吴旗和定边生油洼陷中心,具备充足的成藏油源条件。在湖盆稳定沉降期,发育了非常丰富的三角洲前缘水下分流河道和河口坝砂体,形成大面积的储集岩系,因此,研究区的长 6、长 4 + 5 和长 2 油组均具有良好的勘探前景。事实上,近两年的勘探实践在姬源地区长 2 和长 4 + 5 油组已取得重大发现,证实了伊陕斜坡和延长湖的北岸西段地区是盆地现阶段极富潜力的勘探目标区。

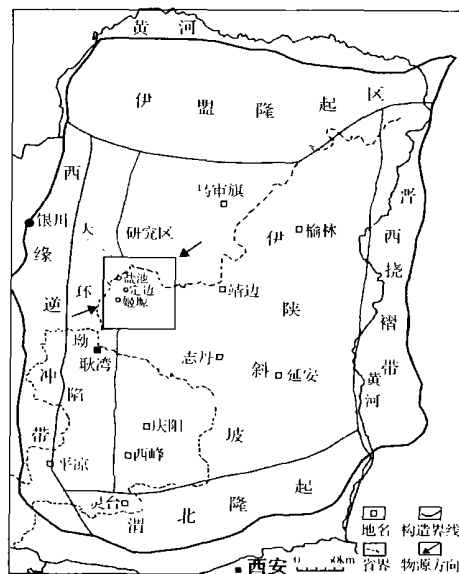


图 1 研究区构造位置图

Fig 1 Location of the study area

本文以三叠系延长组长 4 + 5 砂岩为研究对象,在对 20 余口井取芯样品宏观沉积学特征描述的基础

上,针对不同沉积微相砂岩样品进行了铸体薄片、扫描电镜、常规物性等分析测试,进而对砂岩的岩矿组成、成岩作用特征、孔隙类型和储集物性之间相互关系进行了系统分析和总结,旨在揭示砂岩储层在埋藏成岩演化过程中孔隙消长的内在规律及其受控因素,同时结合沉积相研究成果,分析了有利储层平面分布特征及其控制机理,为在研究区普遍低孔低渗背景下寻找高效优质储层提供理论依据。

1 储层岩石学与成岩作用特征

1.1 储层岩石学特征

碎屑岩石中骨架颗粒的成分、类型与物源区母岩性质密切相关,通过对盆地不同地区岩石轻矿物组分和岩屑类型、含量的分析,可以得到有关物源方向的

重要信息。盐池—姬塬地区延长组长 4+5 砂岩类型以岩屑长石砂岩和长石砂岩为主,通过全岩组分统计,可见其中石英、长石和岩屑平均含量分别为 24.7%、43.2%和 10.8%,填隙物主要指粘土杂基和不同期次的碳酸盐胶结物,平均含量可达 21.3%,上述特征说明研究区砂岩的成分成熟度较低。平面上,自东北向西南石英逐渐增加,长石、岩屑依次减少(表 1);岩屑平均含量新安边—铁边城与姬塬相当,分别是 10.8%和 10.3%;安边区块较低,为 8.7%。同时,姬塬区块具有西部物源特征的白云岩岩屑含量较高(平均 1.50%),其分别是新安边—铁边城和安边区块的 2.5 倍和 5.0 倍。碎屑含量平面变化趋势说明长 4+5 具有北东和西部两个物源方向。

表 1 盐池—姬塬地区延长组长 4+5 砂岩组分统计表

Table 1 Detrital composition of Chang 4+5 sandstones in Yanchi-Jiyuan area

井号	石英 /%	长石 /%	火成岩屑 /%	变质岩屑 /%	沉积岩屑 /%	白云岩屑 /%	岩屑 /%	填隙物 /%
安边	24.2	46.1	2.1	6.1	0.5	0.3	9.0	20.7
新安边—铁边城	23.4	48.5	2.6	7.3	0.9	0.6	11.4	16.7
姬塬	26.6	35.0	1.6	6.5	2.2	1.5	11.8	26.6
平均	24.7	43.2	2.1	6.7	1.2	0.8	10.8	21.3

1.2 成岩作用特征

1.2.1 成岩作用类型与典型成岩序列

通过偏光显微镜对岩石铸体薄片和各种成岩组构、孔隙类型和自生矿物组合等特征的详细观察,可见研究区长 4+5 砂岩主要经历了压实作用、绿泥石粘土膜形成、石英次生加大、长石及火成岩屑溶蚀和晚期含铁碳酸盐岩胶结、交代作用的叠加改造。其主要成岩特征如下:

(1) 砂岩中泥质岩屑和云母碎片等塑性碎屑普遍发生了比较强烈的塑性变形,部分泥质碎屑受压变形形成假杂基,还可见到个别刚性颗粒受压破碎,碎屑颗粒紧密排列的现象比较普遍,以线接触为主,表明研究区储集砂岩经受了比较强的压实作用改造。

(2) 储集砂岩中原生粒间孔隙所占的比例一般不超过 50%,大都在 30%~45%之间,粒间和粒内溶孔所占的比例通常大于前者,一般占 40%~55%。这两类孔隙在研究区占主导地位,而且成因机理截然不同,对它们的详细研究有助于分析和预测未知地区的储层孔隙特征和分布规律。

(3) 砂岩中自生矿物非常发育,最常见的自生矿物有蠕虫状自生高岭石、粘土膜状绿泥石,半自形—自形状铁方解石和少量自形铁白云石,此外,石英次生加大现象非常普遍。

研究区三叠系延长组的埋藏深度并不是非常深(一般为 1 600~1 800 m),结合上述储集砂岩的成岩特征,可以认为研究区三叠系延长组长 4+5 储集砂岩目前主要处于早成岩阶段 B 期的晚期, R_0 为 0.8%,温度在 70~90^[3]。

根据各种成岩自生矿物之间形成先后次序及叠加关系,可归纳出研究区的典型成岩序列特征为:压实作用—粘土膜形成—长石强烈溶蚀、溶解—次生孔隙形成—自生高岭石—自生石英—晚期铁白云石胶结交代作用。砂岩样品中主要呈现出酸性成岩环境的成岩组构特征,即以发育的长石粒内溶孔、岩屑粒内溶孔和颗粒间溶蚀扩大孔为主,并伴随着由粒间和粒内溶孔共同溶蚀形成的特大溶孔^[3],说明长 4+5 砂岩尚处于酸性成岩环境的控制下,有利于次生溶蚀孔隙的发育。

2 成岩作用与孔隙演化模式

2.1 定量分析不同成岩作用对孔隙演化的影响

沉积物在进入埋藏成岩环境后,其孔隙演化主要受各种成岩作用的控制,沉积物本身的内在特征(如颗粒大小、分选程度、成分、物理化学性质及填隙物类型和含量等)也在不同程度上制约着成岩作用的发生、发展,进而直接影响着孔隙的演化进程^[3,4]。前

人研究结果表明^[4,5],通过对研究区大量铸体薄片的详细统计,可以为定量研究孔隙演化趋势提供依据。

由于研究区内不同地点、不同层位砂岩的沉积和成岩特征均存在一定差异,在此,可以结合具有代表性井中长 4+5 砂岩的组分构成、典型成岩序列特征等来追溯不同地区孔隙演化史。盐池—姬塬地区主要代表井砂岩组成特征列于表 2。

具体工作可按以下几个方面展开:

表 2 盐池—姬塬地区代表井上三叠统延长组长 4+5 砂岩组分特征

Table 2 Detrital compositions of Chang 4+5 sandstones (upper Triassic) from the representative wells in Yanchi-Jiyuan area, southwest Ordos Basin

地 区	代 表 井	岩石类型	碎屑成分 / %					填隙物成分 / %					面 孔 率 / %
			石 英	长 石	岩 屑			绿泥 石	浊沸 石	硅 质	铁方 解石	高岭 石	
					喷发 岩屑	云 母	石 英 岩屑						
盐池	冯 105	含油沸石中细粒长石砂岩	19.4	53.0	2.2	2.0			2.6	10.5	0.5	1.6	3.5
铁边城	元 61	细粒长石砂岩	21.0	56.0	2.0	3.0 3.0			3.0			3.0 6.0	2.1
	元 73	细粒长石砂岩	24.0	53.0	3.0	2.0 2.5			6.0			1.0 0.5	4.6
	新 4	细粒长石砂岩	20.0	58.0	3.5	4.5	3.5	3.5	1.0	2	0.5	0.5	3.4
	元 69	极细—细粒岩屑长石砂岩	28.0	35.2	6.0	7.4	4.8	7.6		4.2	0.4	1.0 4.4	4.9
安 边	A40	细—中粒长石砂岩	20.0	52.0	3.0	4.0 4.0			0.5		2.5	6.0 4.0	2.7
	A50	含油沸石细粒长石砂岩	17.5	57.0	1.0	2.0 4.5 2.0			1.0	16.5		0.5	3.0
	A15	细粒长石砂岩	18.5	48.5	2.0	1.5 8.0			0.5		2.5	15 3.5	1.1
姬 塬	耿 19	中—细粒岩屑长石砂岩	48.0	31.0	3.0	2.0 6.0 2.0					2.0	4.0 1.0	9.2

(1) 砂岩初始孔隙度恢复

恢复砂岩初始孔隙度是定量评价不同类型成岩作用对原生孔隙消亡和次生孔隙产生的基本前提,通常采用 Beard and Weyl^[6]对不同分选状况下未固结砂实测的初始孔隙度关系式来计算。

$$\text{初始孔隙度} = 20.91 + 22.90 / \text{分选系数} \quad (1)$$

根据普通薄片和铸体薄片对研究区内不同层位砂岩的详细观察和统计,可以划分出三种较容易直观分辨的分选特征,即分选好,中等和差,它们对应的分选系数^[7]为:

- $S < 2.5$ 分选好
- $S = 2.5 \sim 4$ 分选中等
- $S > 4$ 分选差

利用式 (1) 计算可知;

分选好的砂岩初始孔隙度大于 30.07%;

分选中等的砂岩初始孔隙度变化在 26.64 ~ 30.07% 之间,在实际应用中可取二者之间的平均值,即 28.36%;

分选差的砂岩初始孔隙度小于 26.64%。

经薄片观察统计和计算,可见研究区延长组长 2 砂岩的初始孔隙度主要变化在 28.36% ~ 30.07% 之间,即研究区砂岩的分选特征为好—中等,而很少观察到分选较差的砂岩,这主要因为这些砂岩多为三角洲平原分流河道、河口砂坝和浅湖滨岸砂相的沉积产物,沉积水体能量相对较大,加之搬运距离相对较远,砂质载荷得以较充分筛选改造的结果。

(2) 压实后粒间剩余孔隙的恢复

恢复粒间剩余孔隙主要用于评价压实作用对原生粒间孔的破坏程度。在沉积物进入埋藏期后,压实作用往往是使原生粒间孔损失的最主要原因,这时上

覆沉积物静压力、孔隙水压力以及沉积物颗粒的物理性质(如刚性、塑性和半塑性)、填隙物成分和含量等因素将综合制约原生孔隙的消亡方式。因此恢复剩余粒间孔隙度也是评价后期化学胶结作用、交代作用对孔隙的破坏和次生孔隙形成对整体孔隙度增加程度的定量前提。其恢复可利用下列关系式:

$$\text{压实后粒间剩余孔隙度} = \text{粒间胶结物(或交代物)总量} + \text{实测的原生粒间孔} \quad (2)$$

在式(2)中,粒间胶结物总量可以通过薄片统计获得,原生粒间孔即为现在可观察到的规则状粒间孔,主要通过铸体薄片统计获得。在这里需用到薄片面孔率这一重要参数,通常薄片观察中获得的面孔率是粒间孔和各种类型的次生溶蚀孔隙,如粒内溶孔、粒间溶孔和高岭石晶间孔所占的比例的总和。

(3) 压实后损失的孔隙度恢复

在已知砂岩初始孔隙度和压实后粒间剩余孔隙度后,压实损失的孔隙度很容易由上述式(1)和(2)相减得出:

$$\text{压实损失的孔隙度} = \text{初始孔隙度} - \text{压实后粒间剩余孔隙度} \quad (3)$$

通过对压实后损失的孔隙度恢复可以定量分析压实作用对研究区砂岩原生孔隙的破坏程度。

(4) 利用铸体薄片的定量统计数据,结合成岩阶段划分结果,可以对砂岩在不同成岩阶段原生粒间孔的损失、保存以及次生孔隙的产生进行定量评价,进

而对砂岩总孔隙度的演化趋势做出合理的分析,并做出相应的孔隙演化模式图。具体计算结果见表 3。

2.2 不同地区长 4+5 砂岩成岩作用与孔隙演化特征

2.2.1 铁边城地区

该区长 4+5 砂岩(代表井主要为元字号井和新 4 井,见表 2 和表 3),以细粒长石砂岩为主,分选普遍较好,除元 69 井外,砂岩初始孔隙度均达到 30.07% 以上,压实损失的孔隙度变化在 64.4% ~ 82.0% 之间,说明早期压实作用是造成本区原生粒间孔大量消亡的主要原因。虽然元 69 井砂岩分选相对较差,且含有许多云母碎屑,但早期形成的绿泥石环边非常发育,含量达到 4.4%,从而显著地增加了岩石抗压能力,压实损失的粒间孔比例只有 47.8%。在本区砂岩的孔隙类型组合中,明显以粒间孔为主,在元 61 井区,以长石为主的易溶颗粒发生较强烈的溶蚀,形成了较多的粒内溶孔。胶结物主要由高岭石、绿泥石、硅质和少量晚期铁方解石组成,含量变化在 3.0% ~ 7.0% 之间,损失的孔隙比例为 9.9% ~ 23.3%,胶结作用是造成本区砂岩孔隙损失的第二个主要原因,经过压实和胶结作用后,砂岩剩余粒间孔仅有 1.0% ~ 3.7%,而后长期长石类易溶颗粒发生溶蚀产生的次生孔隙只有 0.2% ~ 1.3%,对砂岩总体孔隙度的贡献比例只占 0.7% ~ 4.6%,因此未对区域上孔隙度总体面貌产生决定性影响,这从砂岩的孔隙组合中粒间孔(除元 61 井外)所占比例普遍达到 70.0% 以上

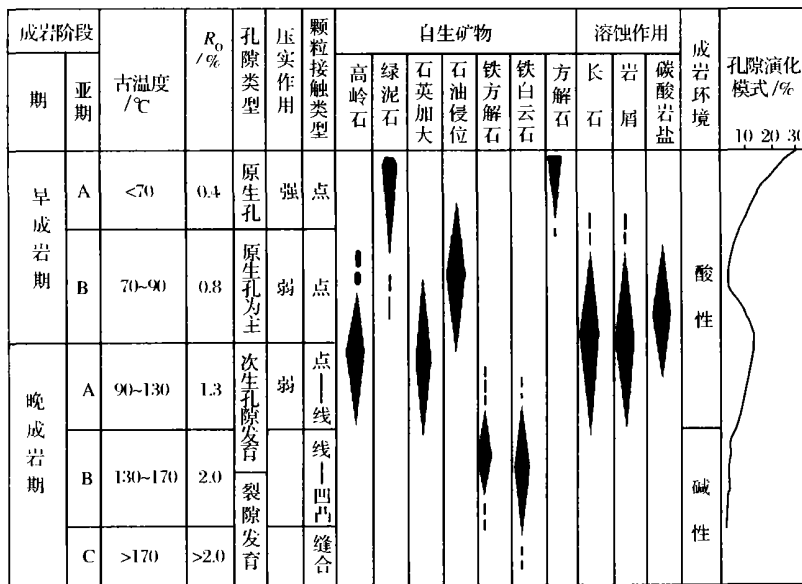


图 2 铁边城地区长 4+5 砂岩主要成岩作用类型与孔隙演化模式

Fig 2 Relationship between main diagenesis and porosity evolution of Chang 4+5 sandstones in Tiebiancheng area

中也可以反映出来。结合成岩序列和成岩阶段研究结果,可将铁边城地区长 4+5 砂岩主要成岩作用类型与孔隙演化模式可归纳入图 2 中。

2.2.2 安边地区

安边地区长 4+5 (代表井 A15、A40 和安 50,见表 2 和表 3)砂岩粒度明显变粗,以细—中粒长石砂岩为主,分选普遍较好,压实损失的孔隙比例变化在 26.8%~66.7%,特别是 A15 井似乎压实作用并未对砂岩孔隙造成很大影响,这主要与晚期铁方解石强烈充填粒间孔和交代碎屑颗粒,形成“悬浮砂”构造,形成颗粒间呈点接触状为主的假象,从而掩盖了压实改造后砂岩的真实结构特征。根据宏观沉积相分布特征、岩石组分和类型以及沉积构造等方面的综合分析,A15 井地区砂岩经压实损失的粒间孔比例也应该高于 60.0%。以晚期铁方解石和浊沸石为主的胶结、交代作用是造成本区砂岩孔隙消亡的另一个重要原因,在 A15 井和安 50 井地区,晚期铁方解石和浊沸石胶结交代物含量分别高达 17.0%~18.0%,在胶结物含量相对较低的 A40 井,也达到 9.0%,由此导致的孔隙损失比例分别为 59.9%、56.5%和 29.9%。经过胶结作用改造后,粒间剩余孔隙普遍小于 1.0%,后期溶蚀作用主要形成以粒内溶孔为主的次生孔隙,但对总孔隙度的贡献比例十分有限,最高才达

到 6.7% (安 50 井),因此对砂岩孔渗面貌的改善不大,在该区原生孔隙所占比例也较小,均不大于 37.0%。该区长 4+5 砂岩具有一个明显特点就是晚期胶结交代作用非常强烈,是造成孔隙度下降的一个重要原因,而且这种作用也是盐池—姬塬地区延长组砂岩中最显著的地区。这与该区长 4+5 砂岩普遍进入晚成岩 B 期,在碱性成岩环境下经历了进一步的成岩改造有关。

2.2.3 姬塬地区

姬塬地区长 4+5 砂岩 (代表井耿 8,见表 2 和表 3),属于坡型三角洲前缘末端河口坝沉积产物,水体能量相对较弱,以极细—细粒岩屑富云母长石砂岩为主,分选中等,初始孔隙度在 28.36%左右,加之易变形的云母、喷发岩和干枚岩屑含量较高 (占 26.0%),在早期压实作用过程中就损失了 73.9% 的孔隙,压实后粒间剩余孔隙只有 7.4%,以晚期铁方解石为主 (5.2%) 的胶结物,加上早期形成的绿泥石 (1.2%) 和硅质胶结物 (0.6%),又损失了 7.0% 的孔隙,占孔隙损失总量的 24.7%,这样在早期压实和后期胶结共同作用下,砂岩损失的总孔隙度达到 98.6%,而后期次生溶蚀作用仅贡献了 0.6% 的次生孔隙,未对砂岩孔隙形成决定性的影响。

表 3 盐池—姬塬地区延长组长 4+5 砂岩成岩作用与孔隙演化关系

Table 3 Relationship between diagenesis and porosity evolution of Chang 4+5 sandstones in Yanchi-Jiyuan area

地区	代表井	砂岩类型	初始孔隙度 / %	压实损失孔隙度 / %	压实后粒间剩余孔 / %	胶结损失的孔隙度 / %	胶结后粒间剩余孔 / %	次生孔隙 / %	面孔率 / %	原生粒间孔比例 / %
铁边城	元 69	极细—细粒岩屑富云母长石砂岩	28.36	13.56	14.8	5.6	3.6	1.3	4.9	73.5
	元 61	细粒长石砂岩	30.07	23.07	7.0	6.0	1.0	1.1	2.1	47.6
	元 91	细粒岩屑长石砂岩	30.07	21.77	8.3	6.5	1.8	0.2	2.0	90.0
	元 73	细粒长石砂岩	30.07	19.37	10.7	7.0	3.7	0.9	4.6	80.4
	新 4	细粒长石砂岩	30.07	24.67	5.4	3.0	2.4	1.0	3.4	70.6
安边	A15	细—中粒长石砂岩	30.07	8.07	22.0	18.0	0.4	0.7	1.1	36.4
	A40	细—中粒长石砂岩	30.07	20.07	10.0	9.0	1.0	1.7	2.7	37.0
	安 50	含浊沸石细粒长石砂岩	30.07	12.07	18.0	17.0	1.0	2.0	3.0	33.3
姬塬	耿 8	极细—细粒岩屑富云母长石砂岩	28.36	20.96	7.4	7.0	0.4	0.6	1.0	40.0

3 有利沉积—成岩相带划分依据及其特征

根据沉积相研究成果,可见盐池—姬塬地区延长组砂岩优质储层形成的有利沉积相为三角洲前缘

分流河道相和河口坝相,根据它们之间的组合方式,可划分出两种有利的三角洲前缘相,即台型和坡型三

角洲前缘相,其中台型三角洲前缘相主要由多期叠加分流河道构成,湖底地形平坦,水动力条件较强。坡型三角洲前缘相主要由完整的坝上河道沉积和上残坝上河道沉积组成,处于湖底斜坡上,故水动力条件更强,因此,储层物性往往优于台型三角洲前缘相砂岩。在坡型三角洲前缘相前端和三角洲前缘末端的过渡部位通常可形成完整的河口坝沉积。

对盐池—姬塬地区延长组不同层位砂岩的成岩特征研究,表明研究区各砂岩组所处的成岩阶段比较接近,主要为早成岩阶段 B 期的晚期和晚成岩阶段 A 期的早期,因此,砂岩在成岩矿物组合、成岩结构和孔隙组合类型上区别较小,优质储层除受台型和坡型三角洲前缘相控制以外,主要受绿泥石粘土膜胶结作用和次生溶蚀作用发育带的控制。对碎屑岩储层非均质性的研究,国内学者多采用成岩岩相分析方法^[8,9],其工作基础就是以储集岩的次生成岩特征(包括胶结物成分和胶结类型、压实和溶蚀组构、结合孔隙类型及分布等)方面的差异为依据,来划分并定义成岩岩相的。但国外学者多强调对沉积环境和成岩作用进行综合分析^[10,11]。

在本文中强调将有利沉积相带与有利成岩相带结合,划分出有利的沉积—成岩相带,这样可以将控制有利储集层形成的主要因素均考虑进去,以便更加客观地评价和预测优质储层,已有的研究成果表明。通过沉积—成岩相带的划分对比和分析可以取得较好的效果^[12-15]。对沉积—成岩相带的命名可相应地采用有利的沉积相名称,结合有利的成岩作用名称或孔隙类型的名称,如坡型三角洲前缘绿泥石粘土膜相,这样可以非常直观地看出控制优质储层形成的主要因素,而且很容易标明在平面图上,在相应的沉积—成岩相带中还可以将该带的主要特征如孔隙类型分布饼图、不同期次胶结物类型和含量的直方图等能反映该带典型特征的信息标在图上,从而充分和清晰地表达研究者的学术观点和研究成果。同时,可将相对不利的沉积—成岩相带(如三角洲平原压实相)也标明,可以全面地反映出特定砂岩组在平面上的宏观分布特征,为合理预测优质储层的展布规律提供依据。

3.1 长 4+5 砂岩沉积—成岩相带分布特征

通过对长 4+5 砂岩沉积微相、成岩阶段及成岩演化与孔隙演化间定量关系的研究成果,并结合对实际样品孔渗参数的测试结果进行综合分析,可以划分出 3 个典型的沉积—成岩相带,即坡型三角洲前缘—

绿泥石粘土膜胶结原生孔相、坡型三角洲前缘—晚期铁方解石胶结次生溶孔相和台型三角洲前缘—晚期铁方解石胶结相(图 3)。其中坡型三角洲砂体分布极其广泛,是长 4+5 最主要的储集岩类型,而台型三角洲砂体分布非常局限,仅在定边地区古湖岸线以南狭窄的湖底平台上形成多期叠加分流河道砂体。在此主要对上述前 2 种典型沉积—成岩相带的具体特征进行描述。

3.1.1 坡型三角洲前缘—绿泥石粘土膜胶结原生孔相

该相带分布在新安边和铁边城地区,代表井为 A 字号井、新 4、元 73 和元 91 井等,砂岩成岩阶段目前处于晚成岩 B 期的早期,仍以酸性成岩环境形成的成岩结构和自生矿物组合占主导地位,石英次生加大现象普遍,高岭石含量较高(如元 61 井达 6.0%,元 69 井达 4.4%),仅出现 1% 的晚期铁方解石胶结物。此外,该相带一个最显著的特征就是早期形成的绿泥石粘土膜非常发育,含量变化在 2.0%~6.0% 之间。早期颗粒粘土薄膜的存在可以有效增加沉积物的抗压实能力,并抑制自生石英晶体的生长,从而使大量原生粒间孔得以保存下来。根据薄片孔隙类型的统计结果,可以看出原生孔隙的比例很高,普遍大于 70% 以上,最高者如元 91 井达 90%。实测砂岩的孔渗数据在这一相带内也比较高,平均孔隙度大于 10%,渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,基本上属于中孔中渗储集砂岩,这也证实该相带是一个相对有利的勘探区。

3.1.2 坡型三角洲前缘—晚期铁方解石胶结次生溶孔相

该相带主要分布在安边地区,分布范围有限,砂岩受碱性成岩环境改造强度较大,具体表现在晚期铁方解石分布普遍、含量高,如 A15 井晚期含铁碳酸盐胶结和交代物含量高达 15%,碎屑颗粒表面呈港湾状,彼此不接触,形成典型的悬浮砂状构造,孔隙损失殆尽。再如 A40 井晚期铁方解石含量也高达 6%,对砂岩中的各类孔隙均产生了破坏作用。虽然砂岩颗粒表面均覆盖着较薄的绿泥石粘土膜,在成岩早期可以保护一部分粒间孔,但对进入晚成岩阶段 B 期后侵入的碳酸盐胶结物却无能为力,因此,只能在后期胶结作用弱的部位才能观察到由粘土膜保护下的原生粒间孔。虽然,目前砂岩中出现许多的晚期铁方解石胶结物,但多呈星点状分布,未完全破坏先前形成的成岩面貌,因此砂岩中仍以酸性成岩环境中成岩组构为主,石英次生加大和自生高岭石集合体在 A15 和 A40 井中分布还十分普遍,孔隙类型以粒内和粒



图 3 盐池—姬源地区延长组长 4 + 5 砂岩沉积—成岩相带分布图

Fig 3 Distribution of the sedimentary-diagenetic facies zones of the Chang 4 + 5 sandstone in Yanchi-Jiyuan area, Ordos basin

间溶孔为主,原生孔隙所占比例非常小,在 A15 和 A40 井中仅分别为 36.4% 和 37.0%。

在安 50 井区还可以观察到小范围的浊沸石胶结相,但分布比较局限。其典型特征就是成岩早期 - 中期形成的浊沸石胶结物非常发育,含量高达 16.5%,薄片观察发现这类胶结物以孔隙充填为主,通常不交代碎屑颗粒,常常保留有较高的负胶结物孔隙度,此外,溶蚀现象比较普遍,形成许多粒间和粒内溶孔,面孔率可达 3%,次生孔隙是该区砂岩的主要类型,原生孔隙所占比例仅为 33.3%。即使浊沸石成为主要

的胶结物,但薄片上仍可观察到 0.5% 的晚期铁方解石,说明安 50 井区砂岩与区域上长 4 + 5 所处的成岩阶段是一致的。即使在浊沸石非常发育的安 50 井区,实测砂岩的孔渗数据也达到了平均孔隙度大于 10%,渗透率大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于中孔中渗储集砂岩,说明坡型三角洲前缘—晚期铁方解石胶结次生溶孔相带在研究区内属于相对有利的勘探层位。

综上所述,可见长 4 + 5 有利的勘探区分布在以安 49—A40—池 15—耿 18—耿 8—元 91 和新 4 井包围的区域内,其中相对的高孔高渗带主要分布在元

69和元 73井区(图 3),即坡型三角洲前缘—绿泥石粘土膜胶结原生孔相和坡型三角洲前缘—晚期铁方解石胶结次生溶孔相带的结合部位。

参考文献 (References)

- 1 付金华,罗安湘,喻建,等. 西峰油田成藏地质特征及勘探方向. 石油学报, 2004, 25(2): 25~29 [Fu Jinhua, Luo Anxiang, Yu Jian, *et al*. Geological features of reservoir formation and exploration strategy of Xifeng Oilfield. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 25(2): 25~29]
- 2 喻建,韩永林,凌升阶. 鄂尔多斯盆地庆阳以南三叠系延长组油田成藏地质特征及油藏类型. 中国石油勘探, 2001, 6(4): 13~19 [Yu Jian, Han Yonglin, Ling Shengjie. Geological features and oil pool types of Triassic Yanchang Formation oilfield to the south of Qingyang, Ordos basin. *China Petroleum Exploration*, 2001, 6(4): 13~19]
- 3 王琪,史基安,薛莲花,等. 碎屑储集岩成岩演化过程中流体—岩石相互作用特征. 沉积学报, 1999, 17(4): 584~590 [Wang Qi, Shi Ji'an, Xue Lianhua, *et al*. characteristics of fluid-rock interaction during the diagenetic process of clastic reservoir rock. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(4): 584~590]
- 4 Luo J L, Morad S, Zhang X L. Reconstruction of the diagenesis of the fluvial-lacustrine-deltaic sandstones and its influence on the reservoir quality evolution. *Science in China (Series D)*, 2002, 45(7): 616~625
- 5 Houseknecht D W. Assessing the relative importance of compaction process and cementation to reduction of porosity in sandstones. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(6): 633~642
- 6 Beard D C, and Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. *AAPG Bulletin*, 1973, 57: 349~369
- 7 刘宝君主编. 沉积岩石学. 北京:地质出版社, 1980 [Liu Baojun. *Sedimentology*. Beijing: Geological Publishing House, 1980]
- 8 钟广法, 郭宁芬. 成岩岩相分析:一种全新的成岩非均质性研究方法. 石油勘探与开发, 1997, 5: 62~66 [Zhong Guangfa, Wu Ninfen. Diagenetic facies analysis: a novel approach to study diagenetic heterogeneity. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, 5: 62~66]
- 9 孙玉善, 申银民, 徐讯, 等. 应用成岩岩相分析法评价和预测非均质性储层及其含油性——以塔里木盆地哈得逊地区为例. 沉积学报, 2002, 20(1): 55~59 [Sun Yushan, Shen Yinming, Xu Xun, *et al*. Application of diagenetic facies analysis approach to assess and predict the heterogeneity of reservoir and its oil content: a case study from Hadexun area in Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 55~59]
- 10 Martin K R, Baker J C, Hamilton P J, *et al*. Diagenesis and reservoir quality of Paleocene sandstones in the Kupe South Field, Taranaki Basin, New Zealand. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(4): 624~643
- 11 Dutton S P, and Diggs T N. Evolution of porosity and permeability in the Lower Cretaceous Travis Peak Formation, East Texas. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(2): 252~269
- 12 史基安, 陈国俊, 王琪, 等. 塔里木盆地西部层序地层与沉积、成岩演化. 北京:科学出版社, 2001 [Shi Ji'an, Chen Guojun, Wang Qi, *et al*. Sequence stratigraphy and sedimentation and diagenesis evolution in the western Tarim basin. Beijing: Science Press, 2001]
- 13 史基安, 王金鹏, 毛明陆, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组长 6-8 段储层砂岩成岩作用研究. 沉积学报, 2003, 21(3): 373~379 [Shi Ji'an, Wang Jinpeng, Mao Minglu, *et al*. Reservoir sandstone diagenesis of Member 6-8 in Yanchang Formation (Triassic), Xifeng Oilfield, Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 373~379]
- 14 李凤杰, 王多云, 宋广寿, 等. 陕甘宁盆地拗陷型湖盆缓坡带三角洲前缘短期基准面旋回与储层成因分析. 沉积学报, 2004, 22(1): 73~78 [Li Fengjie, Wang Duoyun, Song Guangshou, *et al*. Short-term base-level cycle and genetic analysis of reservoirs of delta front at gentle slope in depressed-typed lacustrine basin, Shaanxi-Gansu-Ningxia basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 73~78]
- 15 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): 225~233 [Zhang Jinliang, Si Xueqiang, Liang Jie, *et al*. Diagenesis of lacustrine deltaic sandstones and its impact on reservoir quality. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 225~233]

Characteristics of Diagenetic Evolution of Chang 4 + 5 Sandstones (Upper Triassic) in Yanchi-Jiyuan Area, Ordos Basin and Distribution of High-Quality Reservoir

WANG Qi^{1,2} ZHUO Xi-zhun^{1,2} CHEN Guo-jun¹ SHI Ji'an¹ WANG Duo-yun¹

1(Lanzhou Research Center of Oil & Gas Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

2(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract Chang 4 + 5 sandstones of Yanchang Formation in Yanchi-Jiyuan area are mainly composed of platform-type and slope-type delta front sandbodies. Lithic feldspathic and feldspathic sandstones are chief rock types, of which

the average content of quartz, feldspar and rock fragments are 24.7%, 43.2% and 10.0%, respectively, and metamorphic and igneous fragments are dominant constituents, accounting for 88.0% of total fragment content. At present, these sandstones are in the late period of the Early diagenetic B stage ($R_o = 0.8\%$ and $T = 70-90^\circ\text{C}$), so they are under the control of acidic diagenetic environment, being of abundant secondary dissolution porosity. On the basis of the statistics of sandstone compositions, it is indicated by the quantitative calculation that compaction is the dominant reason for the loss of the primary porosity in the study area, and next cementation, whereas the increasing ratio of porosity caused by the dissolution is relatively small ($< 10\%$). In combination with the results of sedimentary facies, three types of sedimentary-diagenetic facies zone could be divided, i.e. slope-type delta front-chlorite film primary porosity facies, slope-type delta front-late ferrous calcite cemented secondary porosity facies and platform delta front late ferrous calcite cemented facies, and the favorable reservoir facies is mainly distributed in the joint area of the former two facies zones.

Key words diagenesis, sedimentary-diagenetic facies zone, high quality reservoir, Triassic series, Ordos basin

