

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

# 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

罗静兰, 刘小洪, 林潼, 张三, 李博

西北大学大陆动力学教育部重点实验室, 西北大学地质学系, 西安, 710069

**内容提要:**对鄂尔多斯盆地不同地区上三叠统延长组砂岩的岩石学、储层物性与成岩作用特征及其分布与变化规律的对比研究表明,盆地东部与盆地西部延长组来自不同物源区。压实作用是造成延长组砂岩孔隙丧失的主要原因,分别使长1—长3砂岩和长4+5—长10砂岩丧失的平均孔隙度占原始孔隙的59%和73.3%。胶结作用导致长1—长3和长4+5—长10砂岩丧失的平均孔隙度分别占原始孔隙的25.8%和27.5%,碳酸盐是造成砂岩物性降低的主要胶结物。晚成岩阶段盆地中发生的油气侵位和烃类物质在砂岩孔隙中的聚集抑制了自生石英和碳酸盐胶结物的沉淀。油气的富集对伊利石和绿泥石薄膜的形成没有明显的影响,后者可能对油气的聚集起了促进作用。晚成岩阶段水-岩反应产生的无机酸性流体和烃源岩中有机质向烃类转化过程中产生的有机酸性流体,以及表生成岩阶段的大气降水是导致砂岩储层物性改善的重要途径。

**关键词:**岩石学;成岩作用与油气侵位;储层物性;延长组;鄂尔多斯盆地

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组是重要的含油气储集层,但砂体具有单层薄、横向变化大、低孔低渗之特点。加之沉积环境、砂岩的物质成分、复杂的成岩作用、盆地埋藏热演化史及烃类注入史等因素的影响(史基安等,2003;黄思静等,2004;王琪等,2005;刘池洋等,2005),其储集物性在各地区、各油层组之间存在一定差异,增加了储层预测难度,直接影响了油气勘探开发的效果。本文是在笔者多年来对该盆地周缘上三叠统延长组野外露头剖面 and 盆地内钻井岩心的数千个砂岩薄片的镜下定量统计、上万个砂岩孔隙度与渗透率等测试数据以及有关研究基础上,通过盆地不同地区、不同油层组之间砂岩的岩石学特征、孔隙类型与物性特征、胶结物种类及成岩作用特点及其分布与变化规律的对比研究,分析了主要的成岩作用事件、油气的侵位对延长组砂岩储层物性的影响,探讨了盆地各地区以及不同油层组之间砂岩储层物性不同的主要原因。该研究对鄂尔多斯盆地延长组油气成藏与油气勘探开发具有重要的理论意义和一定的经济价值。

## 1 砂岩的岩石学与成岩作用特征

### 1.1 砂岩骨架矿物成分与结构特征

据2468个延长组砂岩薄片的显微镜下定量统计结果,鄂尔多斯盆地上三叠统延长组砂岩的骨架颗粒成分与砂岩的结构特征在不同地区、不同油层组之间存在一定差异。

盆地东缘(指盆地东缘与东南缘延长组野外露头剖面,包括子洲大理河剖面、绥德准宁河剖面、延长县延河剖面、宜川仕望河剖面、铜川金锁关—漆水河剖面、韩城薛峰川—白马滩和旬邑三水河剖面,下同)与延长油区延长组砂岩的特征具有较强的一致性,砂岩主要为长石砂岩,其次为岩屑质长石砂岩,少量长石质岩屑砂岩(图1a,b,c)。其中,盆地东缘砂岩中石英含量较低(平均34%),长石含量较高(平均44.8%),岩屑含量略高(平均11.8%);延长油区砂岩中石英含量略高(平均36%),长石和岩屑含量略低(平均分别为43.5%和11.3%)。砂岩中的岩屑成分主要为碎屑沉积岩(平均3.2%)和浅变质岩(平均1.4%),少量火成岩(平均0.8%)。砂岩一般具有分选好、颗粒磨圆度较高的特点,颗粒多为次棱角一次圆状。

与盆地东缘和延长油区相比,盆地西南缘(平凉崆峒山与策底坡延长组砾岩剖面、华亭纳水河与朱

注:本文为国家重点基础研究发展计划“973”项目(编号2003CB214603),长江学者和创新团队发展计划(编号IRT0559)资助的成果。

收稿日期:2006-01-25;改回日期:2006-03-05;责任编辑:郝梓国。

作者简介:罗静兰,女,1957年生。教授,博士生导师。主要从事碎屑岩储层沉积学与火山岩油气藏地质学与地球化学研究。Email: Jlluo@nwu.edu.cn。

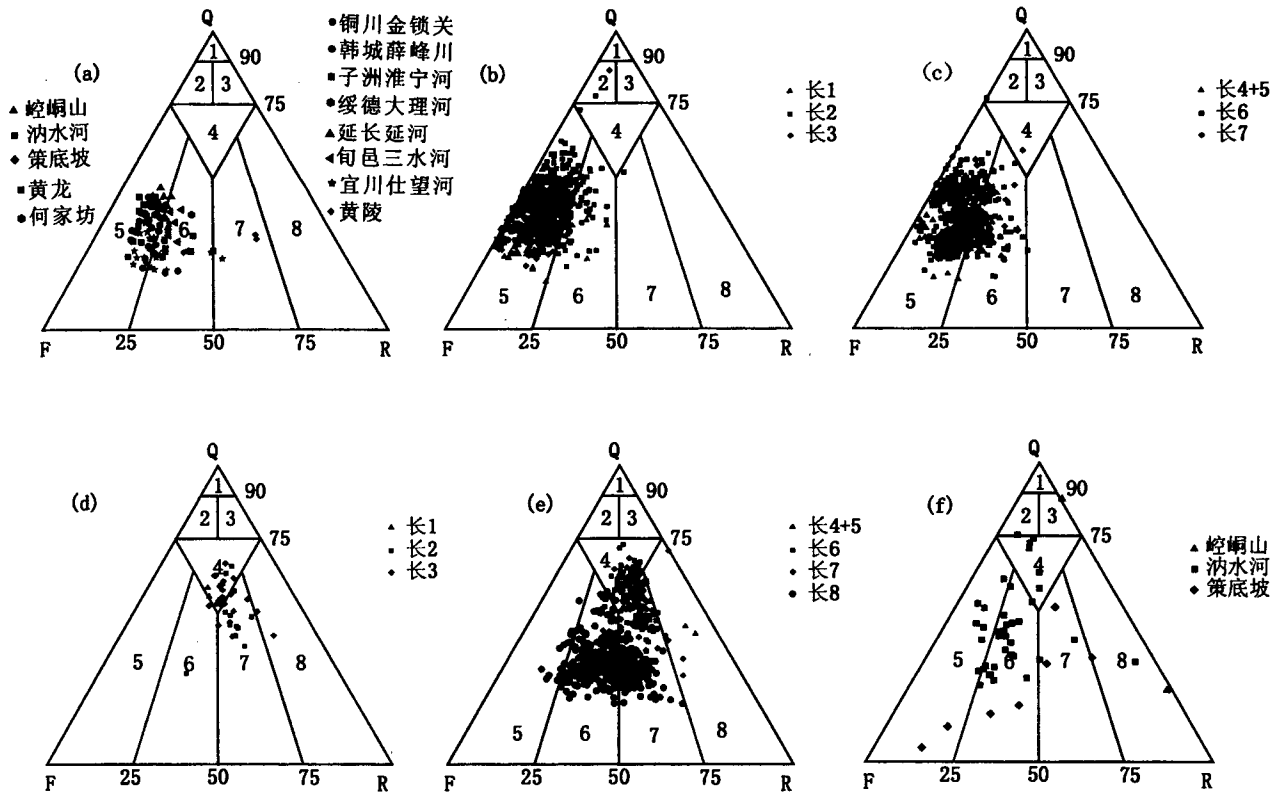


图 1 鄂尔多斯盆地延长组砂岩分类图(据 Folk, 1974)

Fig. 1 Classification plot for sandstones of Yanchang Formation in the Ordos basin (after Folk, 1974)

(a) —盆地东缘延长组(43个); (b) —延长油区长1至长3(749个); (c) —延长油区长4+5至长7(851个);

(d) —陇东地区长1至长3(63个); (e) —陇东地区长4+5至长8(714个); (f) —盆地西南缘延长组(48个)

(a) —Yanchang Formation in east margin of the basin (43 samples); (b) —Chang No. 1—No. 3 in the Yanchang oilfield (749 samples); (c) —Chang No. 4+5—No. 7 in the Yanchang oilfield (851 samples); (d) —Chang No. 1—No. 3 in eastern Gansu (63 samples); (e) —Chang No. 4+5—No. 8 in eastern Gansu (714 samples); (f) —Yanchang Formation in southwest margin of the basin (48 samples)

家庄延长组剖面,下同)和西部陇东地区延长组砂岩中长石含量明显降低(平均18.3%),石英含量和岩屑含量明显增高(平均分别为44.2%和23.6%),砂岩的岩石类型则以岩屑质长石砂岩和长石质岩屑砂岩为主,少量长石岩屑质石英砂岩和岩屑砂岩(图1d,e,f)。岩屑成分与盆地东部和延长油区也有较大差别,以中—高变质岩为主(平均11.2%),其次为碳酸盐与碎屑沉积岩(平均4.6%),少量火成岩(平均2.6%)。碎屑颗粒以棱角—次棱角状为主,粒间主要为点—线接触和线接触。

相比而言,长4+5—长8三角洲相—湖泊相砂岩的粒度较长1—长3河流相砂岩的粒度为细,从长1—长3→长4+5→长6→长7→长8油层组,砂岩中长石和/或岩屑的含量有逐渐增高、石英含量逐渐降低的趋势。

以上事实表明,延长组沉积期间,盆地西部(盆地西南缘与陇东地区)与盆地东部(延长油区和盆地

东缘,下同)分别来自不同的物源区。盆地西部延长组为多物源,物源较复杂,源区岩石包括变质岩和高级变质岩、变碎屑岩、变火山岩和岩浆岩及碳酸盐岩和碎屑岩等沉积岩。盆地东部物源相对单一,主要来自变质岩和沉积碎屑岩区。盆地东缘砂岩中石英含量稍低和岩屑含量略高表明盆地东缘离源区较近。盆地西部与盆地东部延长组砂岩中骨架颗粒成分、特别是岩屑成分及其含量的差异也暗示了在延长组沉积期间,盆地西部的构造活动较强,盆地东部则相对稳定。

### 1.2 砂岩的成岩演化序列与成岩阶段

鄂尔多斯盆地延长组砂岩经历了统一的埋藏—成岩作用过程,各地区延长组砂岩具有一致或相近的成岩作用及成岩演化序列。

根据2327个砂岩薄片显微镜下定量统计结果(表1),碳酸盐是鄂尔多斯盆地各地区延长组砂岩中的主要胶结物,其次是粘土矿物绿泥石和伊利石。

表 1 鄂尔多斯盆地各地区延长组砂岩中平均胶结物含量(%)统计表

Table 1 Quantitative statistics of the cements in sandstones of the Yanchang Formation in Ordos basin (%)

地区	油层组	碳酸盐		粘土矿物			硅质/石英加大	长石加大	浊沸石	石膏	重晶石	黄铁矿	胶结物总量	薄片数量(个)	
		方解石	白云石/菱铁矿	绿泥石	伊利石	高岭石									
盆地东部	延长油区	长1—长3	3.1	0.06	3.1	0.04	0.02	0.4	0.1	0.2	0.1		0.01	7.2	733
		长4+5—长7	3.3	0.04	3.2	0.02	0.1	0.35	0.1	0.4	0.1		0.06	7.5	842
	盆地东缘	长4+5—长10	7.3	1.6	1.4		2	1.3		0.8				7.2	36
盆地西部	陇东地区	长1—长3		3.6	0.6	2.7	1.5	5.1	0.2			0.00		13.8	37
		长4+5—长7		4.5	1.0	7.3	0.2	1.5	0.1			0.00		14.7	183
	盆地西南缘	长8		4.3	3.5	2.1	0.7	1.5	0.00	0.00		0.00	0.00	12.4	471
		长1—长10		3.4	1.8			0.9		1.7		0.2	11.6	25	

石英次生加大、高岭石与浊沸石也是延长组砂岩中分布较普遍的胶结物。部分砂岩中可见长石加大、石

膏、重晶石和黄铁矿等。

碳酸盐胶结物以方解石为主,少量白云石和菱

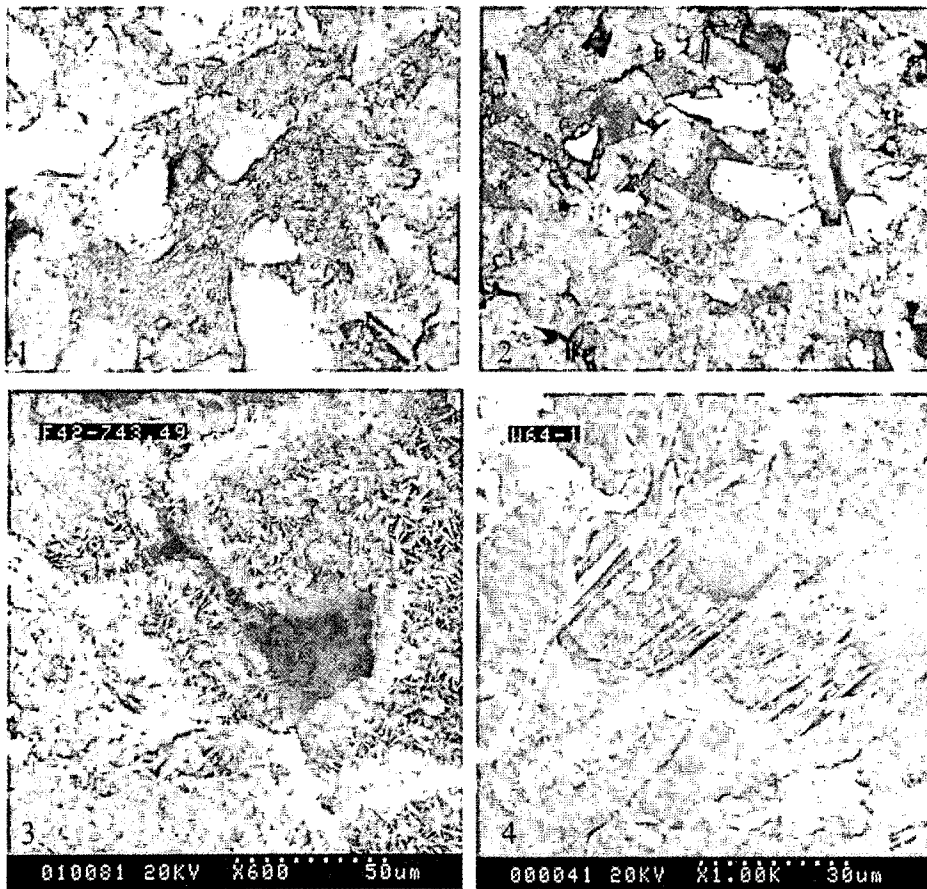


图 2 延长组砂岩中的主要胶结物及其特征

Fig. 2 Microphotos showing characteristics of the major cements in sandstones of the Yanchang Formation

1—微晶方解石充填于黑云母膨胀解理缝中,万34井,928.2m,长6,单偏光,20×; 2—石英次生加大边被亮晶方解石交代,表明亮晶方解石形成于石英加大之后,万19井,815.82m,长6,单偏光,10×; 3—碎屑边缘和粒表绿泥石薄膜的形成阻碍了后期胶结物在粒间孔中的沉淀,使粒间孔隙得以保存,冯42井,606.7m,长6,扫描电镜,600×; 4—书页状或手风琴状高岭石集合体充填于长石粒内溶孔中,表明高岭石是长石发生溶解过程中再沉淀的产物,万64井,881.43m,长6,扫描电镜,1000×。

1—Micrite calcite, filling in expansion fissure of biotite, well No. Wan-34, 928.2 m, oil bed :chang 6, single polarized light, 20×; 2— secondary enlargement rim of quartz is metasomated by sparry calcite, and showing sparry calcite formed after the rim of quartz. well No. 11, 815.82 m, oil bed:chang 6, single polarized light, 10×; 3—chlorite membrane formed on the margin and surface of clast hindered later precipitation of cement in pore, so that, inter-grain fissure preserved. well No. Feng 42, 606.7 m, SEM, 600×; 4—page or accordion-shaped aggregate of kaolinite filling in intra-grain melting fissure of feldspar, suggesting that the kaolinite re-precipitated in the melting of feldspar. well No. Wan64, 881.43 m, SEM, 1000×.

铁矿。方解石有两种类型:微晶方解石(粒径10~20 μm)呈集合体充填粒间孔隙并交代碎屑颗粒、泥质内碎屑和杂基,以及充填在水化膨胀后的黑云母解理缝内(图2-1);亮晶方解石(粒径100~350 μm)呈块状到嵌晶状充填于粒间孔隙中(图2-2),部分或完全交代碎屑、次生加大石英和微晶石英、绿泥石和微晶方解石胶结物。菱铁矿主要呈微小的自形晶(3~10 μm)沿膨胀黑云母的解理分布,少数充填于粒间孔隙中。白云石呈亮晶交代碎屑颗粒和亮晶方解石。砂岩中的硅质胶结物以两种形式产出:其一作为石英颗粒的次生加大边(图2-2)产出,宽度在10~50 μm 之间,个别颗粒可达100 μm,广泛或不均匀地分布于各地区延长组砂岩中;其二为微晶(1~2 μm)石英集合体充填于粒间孔隙中。粘土矿物胶结物中以绿泥石发育较普遍,主要以碎屑颗粒粘土薄膜(宽度多在10~25 μm 之间)形式产出(图2-3),部分向粒间生长充填于粒间孔隙中,可见绿泥石交代碎屑与杂基,或被方解石、次生石英和伊利石覆盖或交代之现象。伊利石呈鳞片状主要以颗粒衬边形式产出,少数情况下充填粒间孔隙,部分交代绿泥石衬边。高岭石呈手风琴状集合体充填在粒间孔隙中或交代长

石颗粒并充填于长石晶内溶孔中(图2-4)。浊沸石呈粒状或连晶状充填粒间孔隙或长石粒内溶孔中。

胶结物的种类及其含量在不同地区与不同油层组中的分布存在一定差异。盆地西部延长组砂岩中胶结物的总量(平均13.1%)明显比盆地东部延长组砂岩高(平均7.3%)(见表1)。由长1—长3→长4+5→长6→长7→长8油层组,砂岩中胶结物和杂基的含量有增加的趋势,碳酸盐的交代现象更加普遍,绿泥石与伊利石薄膜和石英的次生加大更为发育;颗粒间的接触更紧密,由点—线接触逐渐变为线接触—凹凸式接触;胶结类型由孔隙式胶结逐渐过渡为孔隙—薄膜式、再生式等胶结类型,基底式胶结变得普遍,胶结更加致密。表明随地层埋深的增加,压实作用的强度也逐渐增强。部分长1—长3砂岩中石英次生加大较发育可能与其石英含量较高、压溶作用较强以及颗粒间的较松散堆积和原生粒间孔隙较发育有关。

本研究成岩作用阶段的划分标准主要按照裘怿楠等(1997)成岩阶段划分方案及其标准进行。成岩阶段以自生矿物的种类、分布与生成顺序,粘土矿物

表 2 鄂尔多斯盆地延长组成岩演化序列

Table 2 Diagenetic paragenesis of the Yanchang Formation in Ordos basin

成岩阶段		粘土矿物				碳酸盐			其他矿物				长石的溶解	氧化硅矿物	最高热解峰温度(°C)	伊/蒙混层比	古温度(°C)	孔隙带
		蒙皂石	伊利石	高岭石	绿泥石	微晶方解石	铁白云石	亮晶方解石	浊沸石	石膏	重晶石	黄铁矿						
早成岩	A	■	■	■	■								非晶质氧化硅	<430	S层 > 70%		储层孔隙减少	
	B	■	■	■	■								开始出现石英加大	<435	S层 70%~50%	60~70	有少量溶孔	
晚成岩	A	A1	■	■	■								大部分石英和部分长石加大	~440	S层 50%~35%	80~90	次生孔隙发育,有裂缝	
		A2	■	■	■								加大	~460	S层 20%左右	95~110		
	B	■	■	■								石英和长石加大普遍	~480	S层 < 15%	140~150	缝发育		
	C	■	■	■								缝合状接触	500	混层消失带	> 175	少有裂缝		

注: 表中有下划线者为本研究实测数据和实际资料。

组合及 I/S 混层中 S 层的混层比,岩石的结构、构造特征,有机质成熟度指标(镜质体反射率、孢粉颜色、热变指数及最大热解峰温等),结合包裹体测温与盆地埋藏热史模拟结果得出的地层温度为依据进行划分。结果表明,鄂尔多斯盆地延长组地层经历了早期成岩作用、晚期成岩作用和表生成岩作用三个阶段。主要的成岩作用包括机械压实作用、化学压溶作用、胶结作用、交代蚀变作用和溶解作用。

根据鄂尔多斯盆地各区延长组砂岩中成岩作用的表现形式、自生矿物的形成顺序及其相互关系、成岩作用阶段,将延长组地层的埋藏—成岩演化序列归纳如表2,延长组主要处于晚成岩阶段 B 期,部分层段属于晚成岩阶段 A 期。

## 2 储层砂岩的孔隙类型与物性特征及其分布规律

根据1277个砂岩铸体薄片的显微镜下定量统计结果,粒间孔隙和次生溶蚀孔是延长组砂岩的主要孔隙类型,盆地东部与盆地西部长1—长3砂岩的平均粒间孔分别为6.3%和4.1%,长4+5—长10平均粒间孔分别为1.7%;盆地东部与盆地西部长1—长3砂岩的平均溶蚀孔分别为2.3%和4.1%,长4+5—长10平均溶蚀孔分别为3.0%和1.4%。相比而言,长1—长3砂岩的粒间孔、长石溶孔、岩屑溶孔和高岭石晶间孔出现的机率都较高;长4+5—长10各类孔隙的绝对含量明显减少,微裂隙出现的机率有所增加。全区长1—长3河流相砂岩的平均面孔率(7.8%)、平均实测孔隙度(12.7%,6966个数据)和平均实测渗透率( $20.39 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,3738个数据)明显高于长4+5—长10三角洲相与湖泊相砂岩的平均面孔率(4.6%)、平均实测孔隙度(10.0%,10967个数据)和平均实测渗透率( $1.98 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,8322个数据)。

## 3 埋藏—成岩作用与油气侵位对储层物性的影响

### 3.1 压实作用对储层物性演化的影响

压实作用是造成延长组砂岩原生孔隙丧失的主要原因。假定砂岩的原生粒间孔隙为40%(Houseknecht, 1987),盆地东部长1—长3、长4+5—长7和长8—长10砂岩由压实作用造成的平均孔隙度丧失分别为23.6%、29.7%和28.7%;盆地西部长1—长3、长4+5—长7和长8—长10砂岩由压实作用造成的平均孔隙度丧失分别为21.8%、23.8%和25.4%(图3)。

长4+5—长10三角洲相和湖泊相砂岩由压实作用造成的孔隙度丧失普遍大于长1—长3河流相砂岩。原因可能是,较之长1—长3砂岩,长4+5—长10砂岩中抗压作用较强的石英含量较低而抗压较弱的塑性碎屑如长石、泥岩岩屑、特别是云母类的含量较高,这些塑性碎屑在埋藏压实作用过程中发生塑性变形、水化膨胀和蚀变并形成假杂基挤入粒间孔隙中,造成邻近孔隙喉道的堵塞,从而使较多原生粒间孔隙丧失。

部分石英碎屑的压溶作用和由此产生的石英次生加大也导致了一部分孔隙的丧失和渗透率的降低。据研究,压溶作用在富含云母和伊利石薄膜的砂岩中较发育,伊利石和云母在此过程中起催化作用(Oelkers et al., 1996)。因此碎屑黑云母通过其膨胀蚀变和促进石英颗粒的粒间压溶作用从而使储层的物性进一步变差。相比而言,长4+5—长10三角洲相和湖泊相砂岩中的次生石英加大较长1—长3河流相砂岩更发育,由此导致的孔隙度丧失也较大。

### 3.2 胶结作用对储层物性演化的影响

延长组长1—长3河流相砂岩和长4+5—长7与长8—长10三角洲相和湖泊相砂岩由胶结作用造成的平均孔隙度丧失分别为10.3%、11.2%和10.4%(图3)。盆地西部延长组砂岩由胶结作用造成的孔隙度丧失(长1—长3、长4+5—长7和长8—长10砂岩由胶结作用造成的平均孔隙度丧失分别为13.8%、15%和12.4%)明显高于盆地东部(长1—长3、长4+5—长7和长8—长10砂岩平均分别为6.8%、7.3%和8.3%)。在所有胶结物中,碳酸盐是造成孔-渗降低的主要胶结物(图4)。其次是次生石英加大。碳酸盐胶结物在延长组三角洲相砂岩中的含量比在河流相砂岩中高,因此,其对三角洲相砂岩的孔隙度、尤其对渗透率影响更大。早期成岩碳酸盐胶结往往沿延长组高水位体系域准层序边界分布(罗静兰等, 2001a),形成横向上的碳酸盐胶结致密层。但是,砂岩中均匀分布的早期成岩碳酸盐和少量自生石英胶结物的形成使机械压实作用减弱,使一部分原始孔隙得以保存。晚期成岩碳酸盐频繁沉淀和不均匀地分布于含油带与含饱和水带砂岩中,如在石英次生加大不发育的含饱和水带砂岩中,绝大部分粒间孔隙为晚期成岩碳酸盐胶结物充填,造成储层物性较强的非均质性。

粘土矿物对储层物性的影响各不相同。绿泥石薄膜及一部分伊利石薄膜通过堵塞孔隙喉道及造成

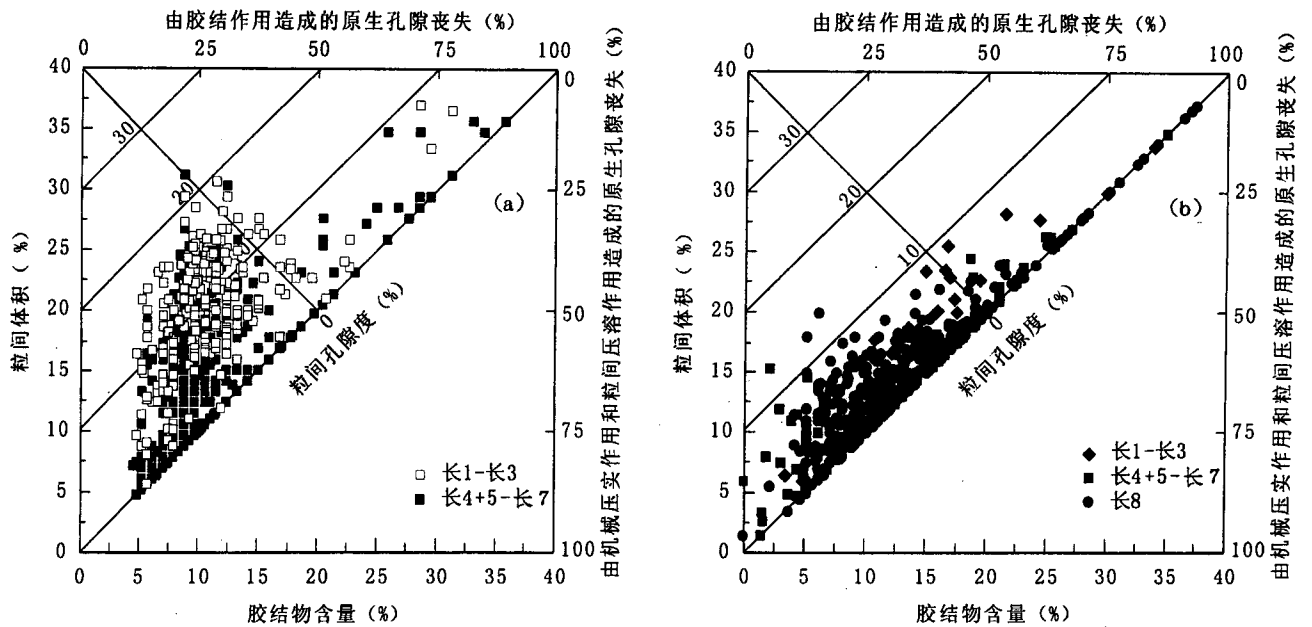


图 3 鄂尔多斯盆地延长组砂岩胶结物含量—粒间体积(IGV)关系图

(假定原始粒间体积为40%,据 Houseknecht, 1987)

Fig. 3 Plot of intergranular volume vs. cement for the Yanchang Formation sandstones with a depositional intergranular volume of 40% (after Houseknecht, 1987)

(a)—盆地东缘与延长油区(791个);(b)—盆地西南缘与陇东地区(452个)

(a)—East margin of the basin and Yanchang oilfield (791 samples);(b)—southwest margin of the basin and Longdong area (452 samples)

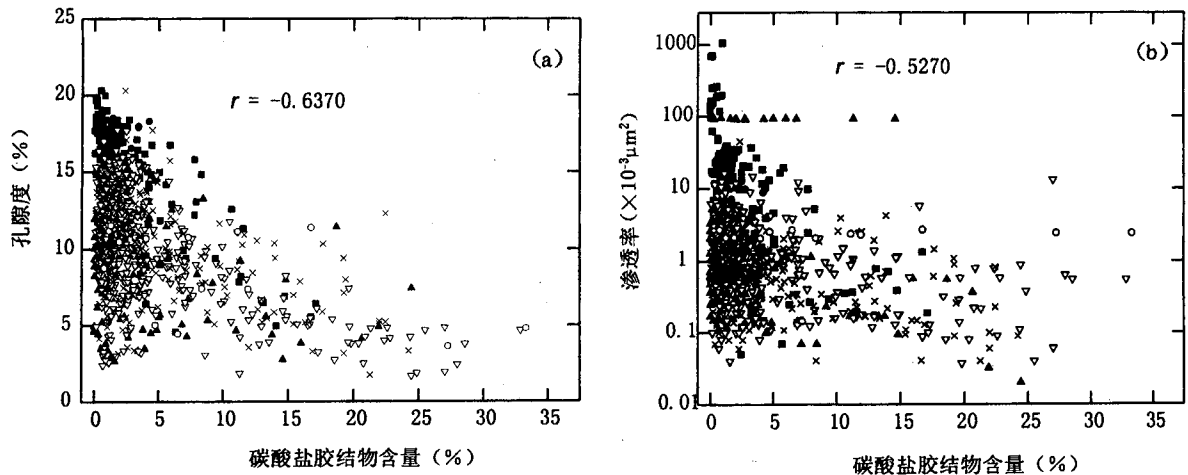


图 4 延长组砂岩中的碳酸盐胶结物与孔隙度(a)和渗透率(b)关系图

Fig. 4 Plots of carbonate cement vs. porosity (a) and permeability (b) of sandstones in the Yanchang Formation

■—曲流河道;●—交织河道;▲—三角洲平原;▽—三角洲前缘;×—前三角洲;○—湖泊相

■—Meandering stream channel; ●—anastomosing stream channel; ▲—delta plain; ▽—delta front; ×—prodelta; ○—lake phase

粒间微孔隙增加而使砂岩的渗透率降低。然而,石英颗粒周围的绿泥石薄膜阻止了石英次生加大的形成,从而使一部分原生粒间孔得以保存。粒间高岭石向伊利石的转变并由此使渗透率进一步降低的作用

由于早期成岩高岭石转变为地开石而受到抑制。同时钾长石碎屑的轻微钠长石化也使高岭石的伊利石化作用受到限制。

### 3.3 盆地东、西部砂岩物性不同的主要原因

由前述可知,盆地西部与盆地东部延长组同层位砂岩的实测孔隙度相近,但盆地东部延长组相同层位砂岩的面孔率和实测渗透率要高于盆地西部(见表3)。主要原因分析如下:

(1)据研究,鄂尔多斯盆地在其第二次沉降阶段(早—中侏罗世,203~157 Ma)及第三次沉降阶段(早—白垩世,138 Ma~97 Ma)主要以上覆地层载荷所造成的沉积载荷沉降差异为主,该沉降阶段盆地西部地区的沉降速率明显高于东部地区(罗静兰

等,2001b),因而西部地区由上覆地层载荷所引起的机械压实作用大于东部地区,应该导致西部地区砂岩的孔隙度丧失要高于东部地区。但前述计算结果显示出相反的结果,原因可能是盆地西部延长组砂岩中碳酸盐胶结物和石英次生加大的含量普遍高于盆地东部(见表1),特别是盆地西部延长组砂岩中出现较多的早期成岩碳酸盐和自生石英胶结物,它们均匀分布于砂岩中而使机械压实作用受到一定抵抗而减弱,从而使由压实作用造成的孔隙度丧失相应降低。

表3 砂岩薄片孔隙类型定量统计与实测孔隙度和渗透率统计表

Table 3 Quantitative statistics of porosity types and measured porosity and permeability of Yanchang sandstones

地区	油层组	薄片统计孔隙类型(%)							
		粒间孔	溶蚀孔	填隙物晶内(间)孔	微裂缝	面孔率	薄片数量		
延长油区	长1—长3	6.3	2.3	0	0.2	9.0	471		
	长4+5—长7	3.1	3.0	0	0.5	7.3	361		
盆地东缘	长4+5—长10	4.6	3.0	0.6		4.8	36		
陇东地区	长1—长3	4.1	2.5	2.2		6.7	26		
	长4+5—长7	1.1	1.6	0.2	0.1	2.8	53		
	长8	2.3	1.2	0.1	0.1	3.5	330		
地区	油层组	实测孔隙度(%)				实测渗透率( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )			
		最小	最大	平均	样品数	最小	最大	平均	样品数
延长油区	长1—长3	0.2	22.9	12.6	6717	<0.001	1366.05	21.6	3490
	长4+5—长7	0.3	24.9	9.6	6436	<0.001	700.26	2.04	4003
陇东地区	长1—长3	2.8	18.6	12.6	249	<0.001	77.40	3.32	248
	长4+5—长7	0.5	22.5	9.8	1298	<0.001	76.00	1.79	1233
	长8	0.5	21.4	8.2	3233	<0.001	250	0.61	3086

(2)盆地西部延长组砂岩的物性普遍劣于盆地东部延长组砂岩,主要原因是盆地西部砂岩中碳酸盐胶结物的含量较高、次生石英加大较发育,由此造成的胶结作用导致的孔隙丧失量普遍高于盆地东部砂岩,从而使砂岩的物性变差。

(3)盆地东部长1—长7砂岩中绿泥石胶结物的含量明显高于盆地西部地区(见表1)。绿泥石薄膜的形成阻止了后期石英次生加大的形成和碳酸盐胶结物在粒间孔隙中的沉淀,从而使一部分原生粒间孔得以保存,这也是造成盆地东部延长组砂岩的孔隙度高于盆地西部延长组砂岩的原因之一。

### 3.4 油气的侵位及溶解作用对储层物性的影响

#### 3.4.1 油气的侵位对成岩作用的影响

同位素证据显示,延长组砂岩中形成于早成岩阶段的泥晶—微晶方解石其碳同位素值分布均匀且范围窄(其  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  为  $-1.7\text{‰}$ ~ $+2.9\text{‰}$ ,平均  $0.66\text{‰}$ ),反映出地表水与来自大气  $\text{CO}_2$  层的碳的平衡关系。泥晶—微晶方解石的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值( $0.71301$

~ $0.71321$ ,平均 $0.7127$ )比晚三叠世海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值 $0.7078$ (Veizer,1989)高,为典型的大气降水成岩碳酸盐。砂岩中的亮晶方解石和铁白云石具有很低的氧同位素值,且分布范围较大(平均  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  分别为  $-15.0\text{‰}$ 和  $-19.8\text{‰}$ ),其  $\delta^{18}\text{O}$  值,特别是  $\delta^{13}\text{C}$  值与深度的变化呈明显的正相关性,其相关系数分别为 $0.42$ 和 $0.84$ ,表明亮晶碳酸盐受埋藏作用的影响较大(王宝清等,2000)。研究表明,当埋深大于 $2500\text{ m}$ 深度时,混层比 $<20\%$ 的混层粘土矿物向伊利石转化,在此过程中,粘土矿物将释放出  $\text{Na}^{1+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Si}^{-4}$  离子(钟大康等,2004)。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  与烃源岩中有机质成熟时产生的  $\text{CO}_2$  反应形成含铁的方解石和含铁的白云石; $\text{Si}^{-4}$  形成次生石英加大和微晶—细晶自生石英,部分  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  形成绿泥石胶结物。

鄂尔多斯盆地埋藏热演化史、生烃排烃与油气运移聚集模拟研究表明,在盆地第三次沉降至最大幅度时的早白垩世末期( $97\sim 100\text{ Ma}$ ),延长组地层

的温度达到最高值(100~140℃),中下侏罗统延安组及上三叠统延长组烃源岩在此阶段已演化至中成熟阶段,延长组烃源岩中的生烃速率、生烃转化率、生烃量及石油的聚集均在100 Ma时达到高峰期,并获得了全区85%的排烃量(张成立,1999)。这一时期延长组地层正处于晚成岩阶段(Luo et al., 2002)。假定地质历史时期3 km深处盆地卤水与大气降水混合形成的地层水的氧同位素组成 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为-6‰~-4‰(Lundegard et al., 1986),利用Friedman等(1977)的氧同位素分馏公式,亮晶方解石和铁白云石的沉淀温度分别为80~140℃和80~145℃,此温度范围与砂岩在晚期成岩阶段达到的最高温度范围十分吻合,表明亮晶方解石和铁白云石主要形成于晚期深埋成岩阶段。亮晶方解石和铁白云石具有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 含量( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 分别为-3.1‰~+3.7‰,平均1.06‰和-2.1~+2.6‰,平均0.78‰),可能缘于来自油气侵位过程中含甲烷热液碳与下渗大气降水碳的混合。油气的富集阻碍了晚期成岩阶段石英和碳酸盐胶结物的沉淀,从而导致含油饱和带砂岩中的自生石英和晚期碳酸盐胶结物的含量(长1—长3和长4+5—长6平均分别为0.8%和2.2%与0.6%和2.4%)低于含水饱和带砂岩(长1—长3和长4+5—长6平均分别为2.3%和3.4%,与2.1%和4.6%)。因为烃类是多种碳氢化合物的混合物,它对各种组成自生矿物的无机盐类没有溶解和沉淀能力,因此,含油带砂岩孔隙中烃类物质的聚集有效地抑制了成岩作用的继续进行。泥岩中有机质的蚀变作用及砂岩中黑云母和火山岩岩屑的蒙脱石化和绿泥石化作用使孔隙流体的碱度提高,从而促进了含水饱和带砂岩中自生石英和碳酸盐胶结作用的进行。油气的富集对伊利石和绿泥石薄膜的形成没有产生明显的影响,相反它们可能对油气的聚集起了促进作用。研究表明,在埋深1000~2800 m处,粘土矿物的转化对有机质生气起重要的催化作用(雷怀彦等,1997),其中蒙脱石的催化作用最强,能使有机产烃率提高2~3倍,并使热解温度降低50℃。

### 3.4.2 油气侵位和溶解作用对储层物性的影响

晚期成岩阶段油气运移和聚集过程中产生的有机酸,地层中水-岩反应产生的无机酸等酸性流体,以及表生成岩阶段大气降水的下渗淋溶是导致研究区延长组砂岩碎屑组分发生溶解的主要动力和介质,也是部分反应产物溶解迁移的载体。

埋藏热史及成岩演化序列表明,研究区油气的运移和聚集与晚期成岩阶段的主要成岩作用事件同

时或近于同时发生(Luo et al., 2002)。这一时期是烃源岩-储集岩系统中有机-无机反应最活跃时期。在埋深1650~2500m深度,古地温大约在75~120℃之间,地层中的蒙脱石迅速向混层矿物转化,混层比很快由50%降至20%,期间粘土矿物的转化释放出大量层间水和 $\text{Fe}^{+3}$ 。烃源岩由于温度的热催化和 $\text{Fe}^{+3}$ 的无机氧化开始脱羧形成大量有机酸和 $\text{CO}_2$ (Surdam et al., 1989, 1993)。当埋藏温度在100~140℃范围内,硫酸盐与烃类发生氧化还原反应产生 $\text{H}_2\text{S}$ 溶于水中,形成酸性地层水介质。这些有机酸、无机酸和 $\text{CO}_2$ 通过溶蚀作用在砂岩中造成骨架颗粒(以斜长石的溶解最显著,少量钾长石)和早期成岩胶结物(方解石和菱铁矿)发生溶解形成大量次生溶孔,同时伴随少量高岭石的形成。表生成岩作用阶段,大气降水导致砂岩中碳酸盐胶结物及碎屑长石(以斜长石为主)的溶解和高岭石的沉淀。晚期—表生成岩高岭石充填斜长石晶内溶孔和方解石胶结物的溶蚀孔,可见伴随方解石的溶解作用发生了高岭石的沉淀。

经统计,盆地东部长1—长3油层组和长4+5—长10油层组由溶解作用造成的平均次生溶孔分别占总面孔率的25.6%和51.8%;盆地西部长1—长3油层组和长4+5—长10油层组由溶解作用造成的次生溶孔平均分别占总面孔率的37.3%和45.7%。因此,溶解作用是导致鄂尔多斯盆地延长组特别是三角洲相和湖泊相(长4+5—长10)砂岩储层物性改善的主要途径。

## 4 结论

压实作用是延长组砂岩孔隙丧失的主要原因,分别使长1—长3河流相砂岩和长4+5—长10三角洲相和湖泊相砂岩丧失的平均孔隙度占原始孔隙的59%和73.3%。前者孔隙度丧失高于后者的原因与其石英含量较低、长石和塑性岩屑含量较高、以及埋藏深度较深、压实作用较强等因素有关。含量较高且均匀分布于盆地西部砂岩中的早期成岩碳酸盐和自生石英胶结物使机械压实作用受到一定抵抗而减弱,从而使由压实作用造成的孔隙度丧失相应降低。

胶结作用也是砂岩孔隙丧失的主要原因之一。在所有胶结物中,碳酸盐是造成砂岩孔-渗降低的主要胶结物,其次是次生石英加大。盆地西部砂岩由胶结作用造成的孔隙度丧失(平均占原始孔隙的34%)高于盆地东部(平均占原始孔隙的18.6%)砂岩的主要原因是前者含较多碳酸盐胶结物和次生石英加大



更发育。盆地东部延长组砂岩比盆地西部砂岩含较多绿泥石薄膜,其在一定程度上阻碍了后续石英次生加大和碳酸盐胶结物在粒间孔隙中的形成,从而使较多的原生粒间孔得以保存。晚期成岩阶段水-岩反应产生的无机酸性流体和烃源岩中有机质向烃类转化过程中产生的有机酸性流体、以及表生成岩阶段的大气降水是导致延长组砂岩碎屑组分和易溶胶结物发生溶解的主要动力和介质,也是砂岩储层物性改善的主要途径,造成长1—长3和长4+5—长10砂岩的平均次生溶孔分别占总面孔率的25.6%和51.8%。

同位素证据与盆地埋藏—热演化史表明,亮晶方解石和铁白云石形成于晚期成岩阶段地层达到最大埋深与最高温度(80~145℃)期间,其较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 含量可能是晚成岩阶段盆地中油气的侵位和富集过程中产生的含甲烷热液碳与下渗大气降水碳的混合。烃类物质在砂岩孔隙中的聚集抑制了自生石英和碳酸盐胶结物的沉淀,导致含油饱和带砂岩中自生石英和晚期碳酸盐胶结物的含量低于含水饱和带的砂岩。泥岩中有机质的蚀变作用、砂岩中黑云母等碎屑的蒙脱石化和绿泥石化以及粘土矿物的转化作用使孔隙流体的碱度提高,促进了含水饱和带砂岩中自生石英和碳酸盐胶结作用的进行。油气的富集对伊利石和绿泥石薄膜的形成没有明显的影响,可能对油气的聚集起了促进作用。

### 参 考 文 献

- 黄思静,张萌,朱世全,武文慧,黄成刚. 2004. 砂岩孔隙成因对孔隙度/渗透率关系的控制作用——以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组为例. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(6): 648~653.
- 雷怀彦,师育新,关平,房玄. 1997. 铝硅酸盐粘土矿物对形成过渡带气的催化作用研究. 中国科学, 27(1): 39~44.
- 刘池洋,赵红格,王锋,陈洪. 2005. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性. 地质学报, 79(6): 737~747.
- 罗静兰, Marcelo Ketzer J, 李文厚, 阎世可, 武富礼, 李玉宏. 2001a. 延长油区侏罗系—上三叠统层序地层与生储盖组合. 石油与天然气地质, 22(4): 337~341.
- 罗静兰,张成立,阎世可,武富礼,李玉宏. 2001b. 盆地埋藏史及其对砂岩储层物性演化的影响——以陕北延长油区砂岩储层为例. 石油与天然气地质, 22(2): 123~127.
- 裘怿楠,薛叔浩,应凤祥. 1997. 中国陆相油气储集层. 北京:石油工业出版社, 149~217.
- 史基安,王金鹏,毛明陆,王琪,郭正权,郭雪莲,卢龙飞. 2003. 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, 21(3): 373~380.
- 王宝清,张获南,刘淑芹,周永炳,金曙光. 2000. 龙虎泡地区高台子油层成岩作用及其对储集岩孔隙演化的影响. 沉积学报, 18(3): 414~418.
- 王琪,史基安,王云多,卢龙飞,王雷. 2005. 鄂尔多斯盆地西部三叠系长2延长组砂岩成因演化特征. 天然气地球科学, 16(3): 261~268.
- 钟大康,朱筱敏,张琴. 2004. 不同深埋条件下砂泥岩互层中砂岩储层物性变化规律. 地质学报, 78(6): 863~871.
- Folk R L. 1974. The natural history of crystalline calcium carbonates: effect of magnesium content and salinity. Journal of Sedimentary Petrology, 44: 40~53.
- Friedman I, O'Neil J R. 1977. Compilation of stable isotopic fractionation factors of geochemical interest. US Geol. Surv. Prof. Pap, 12, 440.
- Houseknecht D W. 1987. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones: AAPG Bulletin, 71: 633~642.
- Huang Sijing, Zhang Meng, Zhu Shiquan, Wu Wenhui, Huang Chenggang. 2004. Control of origin of pores over relationship of porosity to permeability in sandstone reservoir: A case study from Yanchang sandstone of Triassic of eastern Gansu, Ordos Basin. Journal of Chengdu University Technology (Science & Technology Edition), 31(6): 648~653 (in Chinese with English abstract).
- Lei Huaiyan, Shi Yuxin, Guan Ping, Fang Xuan. 1997. Catalysis of aluminosilicate clay minerals to the formation of the transitionall zone gas. Sciences in China (Series D), 27(1): 39~44 (in Chinese).
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Wang Feng, Chen Hong. 2005. Attributes of the Mesozoic structure on the west margin of the Prdos Basin. Acta Geologica Sinica, 79(6): 737~747 (in Chinese with English abstract).
- Lundegard P D, Land L S. 1986. Carbon dioxide and organic acids: their role in porosity enhancement and cementation, paleocene of the Texas Gulf Coast. In: Gautier D L ed. Roles of organic matter in sediment diagenesis: SEPM Special Publication, (38): 123~146.
- Luo Jinglan, Marcelo Ketzer J, Li Wenhui, Yan Shike, Wu Fuli, Li Yuhong. 2001a. Sequence stratigraphy and source-reservoir-cap assemblages of fluvial and lacustrine-deltaic depositional systems——a case study from Jurassic—Triassic terrigenous clastic rocks in the Yanchang Oil Field, Ordos basin. Oil and Gas Geology, 22(4): 337~341 (in Chinese with English abstract).
- Luo Jinglan, Zhang Chengli, Yan Shike, Wu Fuli, Li Yuhong. 2001b. The burial history and its impact on reservoir quality evolution of sandstones: A case study from the Jurassic—Triassic fluvial and lacustrine-deltaic sandstones, Yanchang Oil Field, Ordos Basin. Oil and Gas Geology, 22(2): 123~127 (in Chinese with English abstract).
- Luo Jinglan, Morad S, Zhang Xiaoli, Yan Shike, Wu Fuli, Li Yuhong, Xue Junming. 2002. Reconstruction of the diagenesis of the fluvial-lacustrine-deltaic sandstones and its influence on the reservoir quality evolution——Evidence from Jurassic and Triassic sandstones, Yanchang Oil Field, Ordos Basin. Sciences in China

- (Series D), 45(7): 616~634.
- Oelkers E H, Bjorkum P A, Murphy W M. 1996. A petrographic and computational investigation of quartz cementation and porosity reduction in North Sea sandstones. *American Journal of Science*, 296: 420~452.
- Qiu Yanan, Xue Shuhao, Ying Fengxiang. 1997. Terrestrial hydrocarbon reservoirs in China. Beijing: Petroleum Industry Press, 149~217(in Chinese).
- Shi Jian, Wang Jinpeng, Mao Minglu, Wang Qi, Guo Zhengquan, Guo Xuelian, Lu Longfei. 2003. Reservoir sandstone diagenesis of Member 6 to 8 in Yanchang Formation (Triassic), Xifeng Oilfield, Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 373~380. (in Chinese with English abstract).
- Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, Heasler H P. 1989. Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis. *AAPG Bulletin*, 78(1): 1~23.
- Surdam R C, Jiao Z S, MacGowen D B. 1993. Redox reaction involving hydrocarbons and mineral oxidants: A mechanism for significant porosity enhancement in sandstones. *AAPG Bulletin*, 77(9): 1509~1518.
- Veizer J. 1989. Strontium isotopes in seawater through time. *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, 17: 141~167.
- Wang Baoqing, Zhang Dinan, Liu Shuqing, Zhou Yongbing, Jin Shuguang. 2000. Diagenesis reservoir rocks of Gaotaizi oil bed (Cretaceous) and its influence on porosity modification in Longhupao Field Area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 414~418(in Chinese with English abstract).
- Wang Qi, Shi Jian, Wang Yunduo, Lu Longfei, Wang Lei. 2005. Characteristics of diagenetic evolution of Chang 2 sandstones (Upper Triassic) in the western Ordos basin. *Natural Gas Geoscience*, 16(3): 261~268(in Chinese).
- Zhong Dakang, Zhu Xiaoming, Zhang Qin. 2004. Variation characteristics of sandstone reservoirs when sandstone and mudstone are interbedded at different buried depths. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 863~871(in Chinese with English abstract).

## Impact of Diagenesis and Hydrocarbon Emplacement on Sandstone Reservoir Quality of the Yanchang Formation (Upper Triassic) in the Ordos Basin

LUO Jinglan, LIU Xiaohong, LIN Tong, ZHANG San, LI Bo

*Key Laboratory for Continental Dynamics of Education Ministry; Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi, 710069*

### Abstract

Research on sandstone rock types, detrital minerals and cements, textures, porosity types and measured porosity and permeability of the Yanchang Formation in the Ordos Basin implies that provenances of the Yanchang Formation in the eastern part and the western part of the basin came from different source rocks. Study also shows that mechanical compaction is the main factor caused the loss of porosity, which resulted in 59% and 73.3% porosity loss of the total porosity for the Chang 1—Chang 3 fluvial sandstones and the Chang 4+5—Chang 10 deltaic-lacustrine sandstones, respectively. The porosity loss caused by cementation is 25.8% and 27.5% of the total porosity for the Chang 1—Chang 3 sandstones and the Chang 4+5—Chang 10 sandstones, respectively. In the cements, carbonate is the major cement that reduced the reservoir quality of the sandstones. Hydrocarbon emplacement occurred during the late diagenetic phase prevented part of authigenic quartz and carbonate cement precipitation, however, it had unobvious effect on the formation of chlorite coatings and illite cement, and the later in turn promoted hydrocarbon accumulation. Inorganic acidic fluids resulted from reactions between rock-water and organic acidic liquids produced by transformation processes from organic matters into hydrocarbons in the source rocks, and penetrated meteoric water in the Yanchang Formation during the epidigenetic phase caused dissolution of the detrital minerals and the readily soluble cements such as carbonate, which resulted in lots of dissolution pores and thus contributed retention of reservoir quality for the sandstones.

**Key words:** petrology; diagenesis and hydrocarbon emplacement; reservoir quality; Yanchang Formation; the Ordos Basin