

文章编号: 1000-0550(2010) 02-0264-10

# 富县探区上三叠统延长组成岩作用及孔隙结构特征<sup>1</sup>

郭德运<sup>1</sup> 郭艳琴<sup>2</sup> 李文厚<sup>1</sup> 李克永<sup>3</sup> 龙利平<sup>4</sup>

(1 西北大学地质学系 西安 710069; 2 西安石油大学油气资源学院 西安 710065;

3. 延安大学能源与环境工程学院 陕西延安 716000 4. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司 西安 710021)

**摘要** 根据薄片观察、扫描电镜及 X-衍射资料的详细分析,富县探区延长组成岩作用已经普遍进入晚成岩 A 期,主要成岩作用有压实—压溶、胶结充填和溶解作用。压实—压溶及胶结充填作用是导致砂岩孔隙丧失的主要原因。其中碳酸盐、粘土矿物胶结物和石英、长石加大是造成砂岩物性降低的主要原因,碎屑颗粒周围形成的绿泥石衬边阻止了部分石英、长石次生加大及碳酸盐胶结物的沉淀,使部分原生粒间孔隙得以保存。晚期成岩阶段有机质分解形成的酸性流体及表生成岩作用阶段的大气降水使得碎屑部分碎屑长石和早期的浊沸石胶结物溶解是形成次生孔隙的主要原因。

浊沸石胶结物主要发育在长 3 油层组,其原因是该层位长石碎屑含量高,并在成岩过程中蚀变形成浊沸石。高岭石在上部长 2、长 3 油层组含量高,可能是印支期大气淡水淋滤对长石溶蚀并发生了高岭石化。

孔隙类型以残余粒间孔和长石溶孔为主,划分出小孔细喉、小孔微细喉、小孔微喉、微细孔微细喉和微细孔微喉型五类孔喉结构,其中最后一种为无效储层。

**关键词** 成岩作用 孔隙结构 上三叠统延长组 富县探区 鄂尔多斯盆地

**第一作者简介** 郭德运 男 1959 年出生 高级工程师 博士生 沉积学及石油地质学 E-mail: guoyanqin@xsyu.edu.cn  
**中图分类号** TE122.2 **文献标识码** A

## 0 引言

富县探区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中南部,该斜坡为一西倾单斜,倾角不足 1°,斜坡上构造活动十分微弱,由于差异压实作用,局部发育一些小型鼻状隆起。该区中生界上三叠统延长组钻遇程度高,含油层位多,十个油层组中长 1 至长 9 均有油气显示,其中长 2 长 3 长 6 长 7 和长 8 是主要产油层位,埋藏深度一般为 100~1100 m。鄂尔多斯盆地从长 10 到长 7 油层组湖盆从抬升转为沉降,发生大规模湖进,并进入湖盆发展的全盛时期;从长 7 油层组沉积之后到长 1 油层组沉积期,盆地逐渐转为抬升,湖水退缩,到长 1 油层组沉积末期以平原沼泽化结束其沉积过程<sup>[1]</sup>。富县探区物源来自北部大青山地区的乌拉山群和二道凹群的变质岩<sup>[2,3]</sup>,沉积相主要为三角洲和湖泊相,砂体主要为三角洲平原分流河道和三角洲前缘水下分流河道,此外还有规模较小的浊积岩砂体<sup>[3]</sup>,以灰色、灰绿色、灰褐色中—细粒砂岩为主,单层厚度较大,一般为 10~18 m,油藏类型为岩性地层油气藏。该区储集层砂岩在纵向、横向上具明显

的非均质性,成岩作用和孔隙结构复杂,主要受沉积相变快、砂岩物质组份含量变化大、盆地埋藏史及液态烃注入史的影响。对于富县探区延长组的储层特征有过不同程度的研究,但大多局限于延长组某一层位的成岩作用研究<sup>[4-6]</sup>,本文研究了富县探区延长组主要产油层位砂岩的岩石学特征、主要成岩作用及孔隙类型和结构,目的在于揭示储层的微观特征,为进一步勘探和开发提供依据。

## 1 岩石学特征

富县探区延长组碎屑岩主要为灰色、灰绿色、灰褐色岩屑长石砂岩和长石砂岩,碎屑组成主要为石英、长石、岩屑、云母,杂基含量极低,一般小于 1%,胶结物含量较高,一般大于 10%。随着沉积环境和成岩作用条件的改变,各油层组矿物组分的含量也不同。长 2 段石英含量相对较高,平均为 33.75%,长石含量以长 3 段较高,平均为 53.36%。岩屑中以云母含量最高,其次是变质岩岩屑和岩浆岩岩屑,沉积岩岩屑含量最低,此外,还有极少的绿泥石和燧石(表 1)。

<sup>1</sup> 国家科技重大专项专题(编号: 2008ZX05005-004008H Z)和国家自然科学基金(批准号: 40902042)联合资助。

收稿日期: 2009-03-20 收修改稿日期: 2009-06-01

表 1 延长组砂岩碎屑组分及含量

Table 1 The detrital component of Yan chang Formation sandstone

层位	样品数	石英		长石		岩屑 %					填隙物 %	
		%	%	总计	岩浆岩岩屑	变质岩屑	沉积岩屑	云母	绿泥石	燧石	杂基	胶结物
长 8	35	26.8	43.36	29.84	2.08	8.99	1.22	16.86	0.48	0.21	0.31	18.94
长 7	13	29.11	47.67	23.22	1.29	8.53	1.58	11.19	0.48	0.15	0.05	18.28
长 6	24	26.51	47.58	25.91	2.23	10.80	1.07	11.13	0.56	0.13	0.05	14.38
长 3	20	26.73	53.36	19.9	1.37	8.18	0.23	9.47	0.50	0.16	0.47	11.27
长 2	6	33.75	46.31	19.94	1.06	8.31	0.50	9.58	0.31	0.19	0	14.37

表 2 延长组砂岩填隙物组分及含量 (%)

Table 2 The matrix of Yan chang Formation sandstone (%)

层位 (样品数)	泥质杂基	方解石	绿泥石膜	硅质	长石质	水云母	网状粘土	铁白云石	浊沸石	高岭石	填隙物总量
长 8(35)	0.31	9.97	4.62	0.87	0.01	3.24	0.14	0.02			19.25
长 7(13)	0.05	10.11	6.35	0.55		1.09	0.08				18.33
长 6(24)	0.05	4.69	5.1	2.6	0.24	0.87	0.48	0.26			14.43
长 3(20)	0.47	2.98	5.15	0.84	0.09	0.18			2.03		11.74
长 2(6)		4.97	6.9	0.23	0.03	0.23				2.00	14.37

富县探区延长组填隙物组分总体含量高,变化较大,最高 43.4%,最低 4.6%,平均 16.12%,主要是胶结物,杂基含量很少。胶结物含量为 4.6%~40.8%,平均为 15.87%,富县探区整个延长组胶结物以方解石和绿泥石膜为主,其次为水云母和硅质胶结,长石质胶结物含量较低。此外,在长 3 油层组中发育浊沸石胶结物,在长 2 油层组中发育高岭石胶结物,含量均占 2%左右(表 2)。

富县探区延长组碎屑颗粒粒径最大为 0.50 mm,主要在 0.05~0.25 mm 之间,为细砂岩。颗粒之间以线、点—线接触为主,局部可见点接触和凹凸接触,多为颗粒支撑。胶结类型主要有薄膜—孔隙式、薄膜式、孔隙式、加大—孔隙式和薄膜—压嵌式。砂岩的成分成熟度较低,结构成熟度中等,分选中等—好,磨圆以次棱角状为主。根据区域对比和前人研究,认为陆源组分可能来自内蒙古地轴构造活动区<sup>[7]</sup>。

## 2 砂岩埋藏史与成岩阶段划分

埋藏热史模拟结果表明<sup>[8]</sup>,研究区自晚三叠世以来经历了三次沉降过程、一次沉积间断和两次抬升剥蚀事件。三次沉降过程分别是:晚三叠世(225~208 Ma)的快速沉降阶段,早侏罗世—中侏罗世(203~157 Ma)总体缓慢稳定沉降阶段,早白垩世—晚白垩世(138~97 Ma)的快速沉降阶段。第一次抬升事件发生于晚三叠世(208~203 Ma),为一次短暂的抬升剥蚀,中侏罗世后,全区出现一次沉积间断(57~138 Ma),第二次抬升剥蚀事件自晚白垩世至第三纪

(97~1.64 Ma),历时长达 95 Ma。晚三叠世古地温梯度为 30.5°C/km,地表温度为 15°C,现今地温梯度为 27°C/km,地表温度为 10°C,根据裘怿楠、Alaa、薛叔浩等人成岩阶段划分方案及其标志<sup>[9,10]</sup>,认为富县探区延长组储层砂岩的成岩作用已进入晚期成岩作用的 A 亚期,成岩作用阶段包括早期成岩作用、晚期成岩作用 A 亚期和表生成岩作用三个阶段(见图 1)。

## 3 成岩作用特征

富县探区延长组砂岩成分成熟度低、各组分含量变化大是影响成岩作用演化的主要因素之一,其次还受盆地埋藏热史和液态烃注入史等的影响。较显著的成岩作用有压实及压溶作用、胶结充填作用和溶解作用三种类型,它们对砂岩的孔隙性和渗透性有很大的影响,对于油气藏的形成和开发有密切的关系。

### 3.1 压实及压溶作用对孔隙的影响

压实作用是沉积物在上覆重力和静水压力作用下,使原来存在粒间的孔隙水排出,碎屑颗粒重新排列,使沉积物密度变大,孔隙度减小,同时云母及其他软组分挤入孔隙,使孔隙体积进一步减小,渗透率变差。大量砂岩粒间孔隙度的埋藏改造作用研究<sup>[11,12]</sup>表明,在埋深 1500 m 时,由碎屑的再分配使砂岩的粒间体积迅速降低至 28%;之后随着埋藏深度的加大,粒间体积减小幅度缓慢,至 2400 m 时,粒间体积降为 26%。因此,早期成岩阶段及晚期成岩阶段早期(深度 < 2500 m)的压实作用是造成砂岩原生孔隙度丧失的主要原因。富县探区延长组砂岩在埋藏成

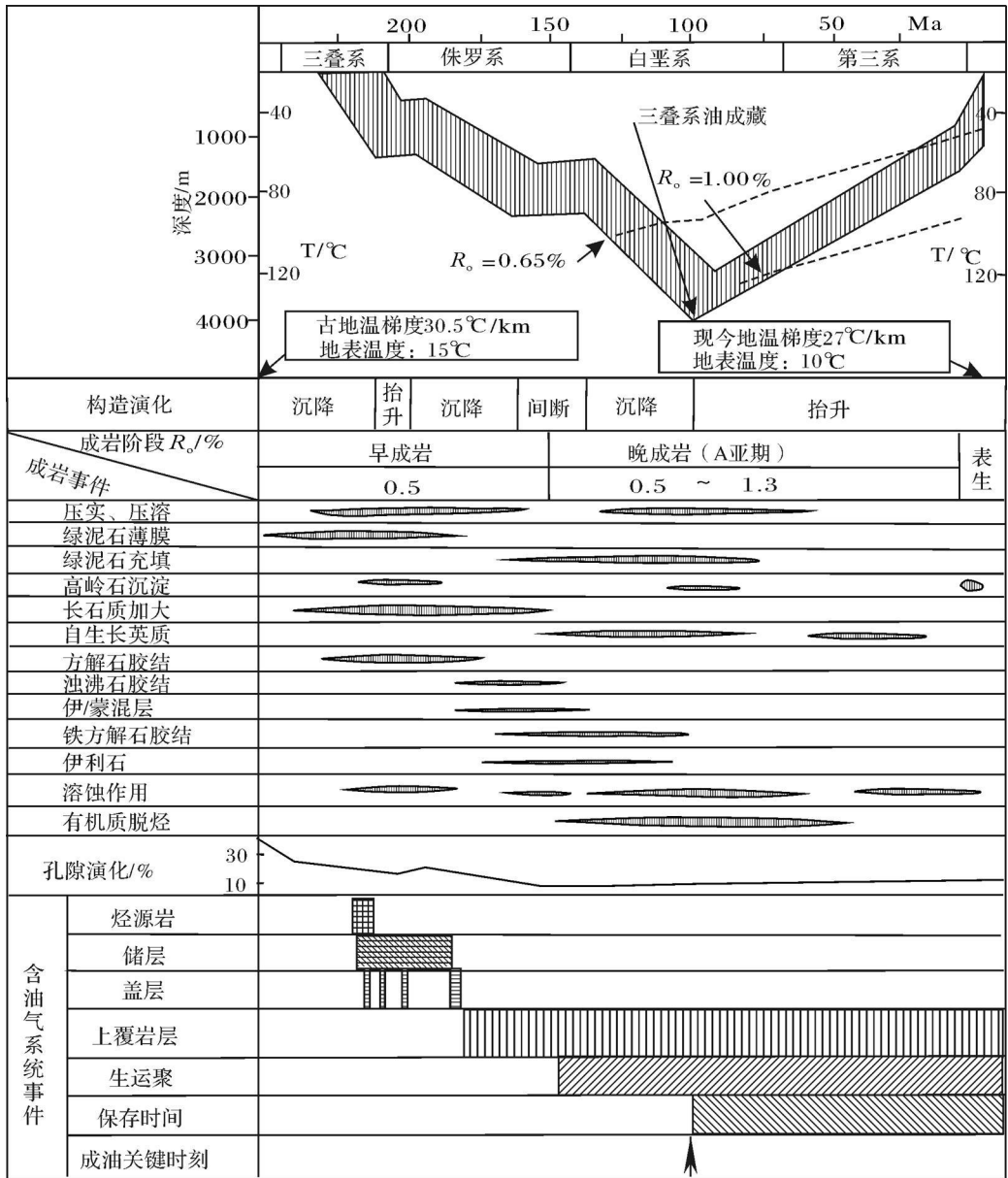


图 1 研究区成岩—孔隙演化与盆地埋藏—热演化史的关系

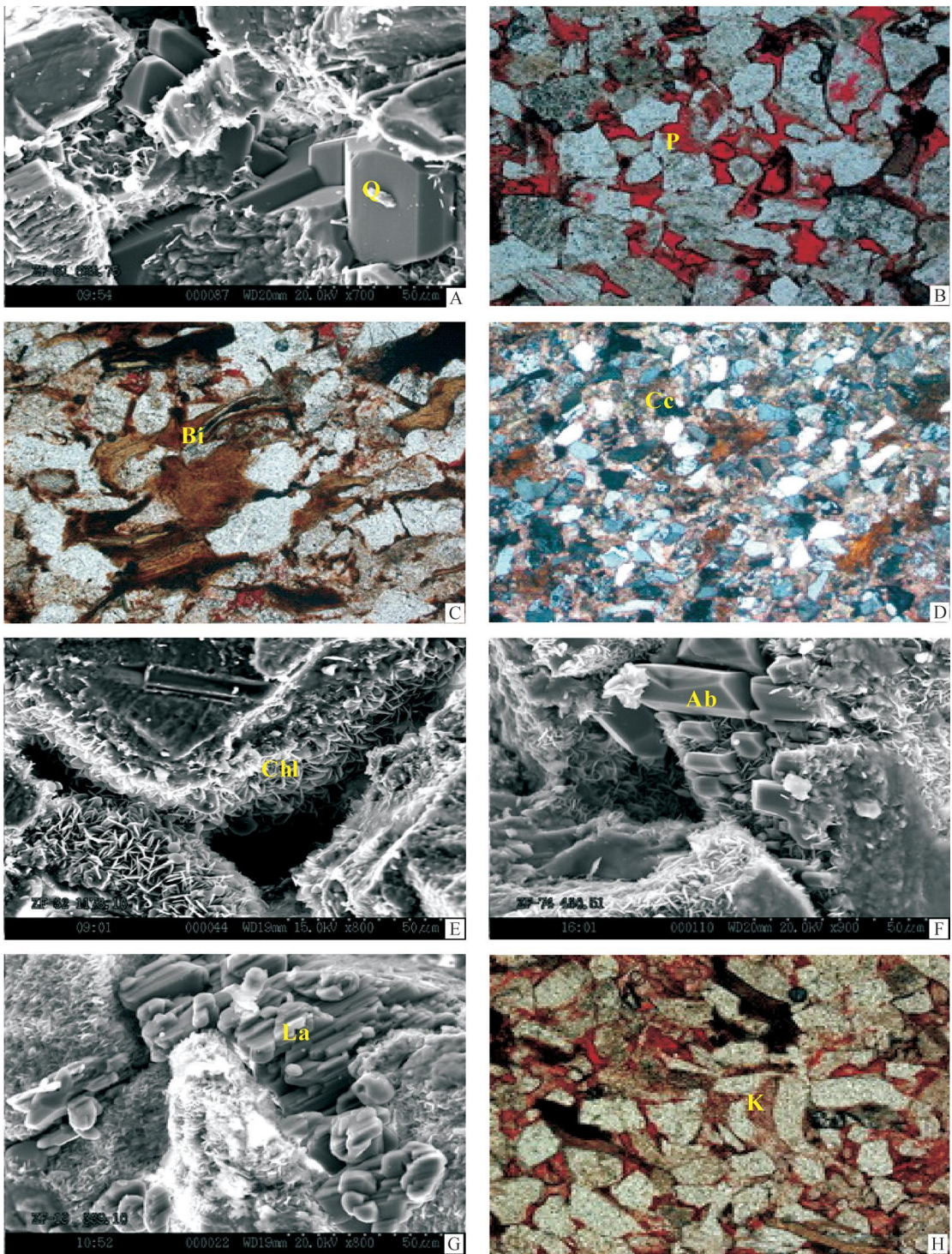
( $R_o = 0.63\%$  和  $R_o = 1.00\%$  分别为开始生油和生油高峰)

Fig 1 Relationship between diagenesis-pore evolution and burial-thermal history of the study area

( $R_o = 0.63\%$  and  $R_o = 1.00\%$  are onset of oil generation and peak oil generation, respectively)

岩过程中经历了不同程度的压实作用,在压实作用的过程中还有粘土矿物的析出,主要是绿泥石呈薄膜状附着在颗粒表面,从而进一步堵塞孔道。随着成岩作用的深化,压实作用使刚性颗粒间紧密排列,呈线状接触,并逐步被压溶作用所替代,表现为颗粒间的凹凸接触及石英、长石的次生加大(图 2A)使原生孔隙进一步减小,喉道半径缩小,渗透性变差。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<sup>[13]</sup>。因此碎屑云

母通过膨胀蚀变和促进石英、长石颗粒的压溶作用从而使孔隙度和渗透率进一步降低。在研究区绿泥石膜发育的细粒岩屑长石砂岩及长石砂岩中,碎屑颗粒间呈点—线状接触,机械压实作用强度较弱,残余颗粒间孔隙较发育(图 2B);在绿泥石膜不发育而泥质杂基含量较高的砂岩中,机械压实作用强烈,其表现为一方面碎屑颗粒间紧密接触,以线状接触为主,局部为凹凸状接触;另一方面泥岩岩屑和黑云母碎屑发生强烈的假杂基化,使云母被挤压变形,挤入粒间孔隙



A 孔喉中石英自生颗粒 (电镜 700 $\times$ , F32井, 668 75m, 长 6); B 极其发育的粒间孔及绿泥石膜, (单偏光 100 $\times$ , F31井, 330 60m, 长 3); C 云母变形, (单偏光 100 $\times$ , F16井, 1068 24m, 长 8); D 细晶方解石充填孔隙, (正交 50 $\times$ , F13井, 851 30m, 长 7); E 叶片状绿泥石垂直碎屑颗粒表面分布, 呈栉壳状结构 (电镜 800 $\times$ , F25井, 1178 1m, 长 8); F 钠长石加大状生长充填孔喉, (电镜 900 $\times$ , FQ1井, 430 51m, 长 3); G 浊沸石呈斑状胶结充填孔隙, 且发生溶蚀产生溶孔, (电镜 800 $\times$ , F31井, 339. 1m, 长 3); H 高岭石充填孔隙, (单偏光 100 $\times$ , F26井, 300 8m, 长 2)

图 2 富县探区延长组砂岩薄片、电镜扫描照片

Fig 2 Thin section and scanning electron micrographs of the Yanchang Formation in Fuxian exploration area

中形成假杂基(图 2C),从而导致砂岩的原生孔隙大量消失,结构致密。在砂岩埋藏过程中,成岩作用早期绿泥石薄膜的析出和初步固结作用,在一定程度上遏制了压实、压溶作用的进行,阻止了部分石英、长石次生加大及碳酸盐胶结物的沉淀,保护了部分原生孔隙,并为后期溶蚀型次生孔隙的形成提供了有效的通道和空间。

### 3.2 胶结充填作用对孔隙的破坏

胶结作用或自生矿物的形成充填作用是导致研究区砂岩孔隙减小,渗透率变低的另一个主要作用,出现于成岩早期—中期,它使岩石孔隙度进一步降低至 10%左右。富县探区砂岩中的胶结物主要有自生粘土矿物、碳酸盐矿物、自生石英、长石及浊沸石等,碳酸盐是造成本区储集砂岩孔隙度和渗透率降低的主要胶结物。它们在碎屑颗粒间沉淀析出充填孔隙,或者以相互交代以及交代碎屑长石等形式出现,占据砂岩的孔隙空间,降低孔隙度和渗透率,形成致密储层。碳酸盐胶结作用往往为多期,早成岩 B 期的亮晶方解石形成于绿泥石膜、石英与长石次生加大边之后,多呈细晶、泥晶或它形晶充填残余粒间孔隙(图 2D),并交代绿泥石膜和石英次生加大边。晚期胶结物常含铁质,为铁方解石和少量铁白云石,是由于孔隙水中的  $Fe^{2+}$  增加,沿解理缝或晶粒四周交代碳酸盐或碎屑颗粒形成。

自生粘土矿物胶结物是砂岩孔隙度和渗透率降低的另一个原因,研究区主要发育绿泥石、高岭石、伊利石及伊蒙混层。在早成岩 A 期,黑云母碎屑发生了强烈的水化水解作用,提供了充足的  $Mg^{2+}$  和  $Fe^{2+}$ ,在碱性介质条件下绿泥石析出,多以叶片状绿泥石垂直于碎屑颗粒表面分布,呈栉壳状结构(图 2E),使喉道变得迂回曲折,甚至完全堵塞,从而大大降低渗透率。绿泥石薄膜为早成岩 A 期砂岩形成的主要胶结物,但它的生长不可能全部终止于成岩作用的早期阶段,前人的研究认为,其生长一直持续到成岩早期甚至更晚<sup>[14]</sup>,一旦绿泥石薄膜形成,在一些地方会出现绿泥石在原有绿泥石表面继续生长的现象。

早成岩 B 期伊蒙混层和伊利石析出普遍存在,且下部油层组明显高于上部油层组(表 3),说明延长组下部油层组成岩作用阶段明显高于上部油层组。伊利石胶结物常呈丝发状及卷片状搭桥式生长于孔隙壁上,使粒间孔隙变成晶间孔隙,使孔隙度和渗透率降低。

晚成岩 A 期,长石、花岗岩屑等骨架颗粒在酸性孔隙水介质条件下发生溶蚀,生成自生高岭石矿物。高岭石主要赋存状态是作为孔隙充填方式产出,减少了原始粒间孔隙。

表 3 延长组砂岩粘土矿物胶结物 X-衍射数据

Table 3 The X-diffraction data of clay mineral cement of Yanchang Formation sandstone

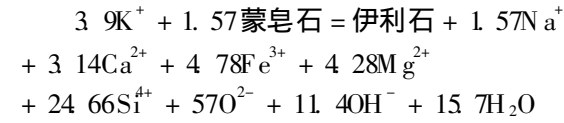
层位	样品数	伊利石 (I)	高岭石 (K)	绿泥石 (C)	伊/蒙间 (I/S)	间层比 S/%
长 8	30	37.3	6.6	28.5	27.6	24.5
长 7	26	37.4	9.5	27.3	25.9	22.7
长 6	40	25	9.35	49.1	16.6	19.1
长 4+5	2	37	10	42.5	10.5	15
延长组下部	98	32.4	8.6	36.9	22.2	21.6
长 3	19	4.7	20.1	72.7	2.5	7.8
长 2	9	6.7	30	56.9	6.4	11.1
延长组上部	28	5.4	23.4	67.5	3.8	9.5

研究区普遍发育石英、长石次生加大,成岩早期的石英次生加大,由于其空间较大,加大边一般呈较宽。到成岩后期由于大量的粒间孔隙已被胶结物占据,受胶结物等形态的限制,石英次生加大表现为充填剩余孔隙,长石加大表现为钾长石加大状充填孔隙和加大状钠长石充填孔隙(图 2F)。

此外,研究区发育浊沸石胶结物,且主要分布在长 3 油层组,浊沸石的发育程度及其溶蚀状况,已成为延长组有利砂岩储集体预测的一个重要指标。然而,浊沸石的形成条件,尤其是形成温度是一个颇有争议的问题,不少研究者根据浊沸石产出层位中其它温度判别标志获得浊沸石形成的温度在一个很宽的范围内变动<sup>[15-17]</sup>,大多数的研究者认为<sup>[18-19]</sup>,沉积岩中的成岩浊沸石形成主要有两个途径,即高岭石和方解石反应生成浊沸石和斜长石蚀变形成浊沸石,均与火山物质有关。近年来,有人应用吉布斯自由能增量( $\Delta G$ )计算了碎屑岩储层中浊沸石形成的温压条件,认为前者所需的最低温度约 174℃,后者所需的最低温度约 36℃。因此,从成岩温度与浊沸石形成所需热力学条件的关系来说,富县探区延长组储层砂岩的浊沸石主要是由斜长石蚀变形成的,长石蚀变形成浊沸石的反应必须要有  $SO_2$  参与,所以大量浊沸石的形成应在蒙皂石开始向伊蒙混层和伊利石转化阶段。

事实上,研究区延长组含多层凝灰岩,在早成岩晚期,大量的火山物质形成蒙皂石并能及时向伊利

石转化。按 Alberta 等 (1981), 该反应可表示为 (按 A 是不活动组分的反应):

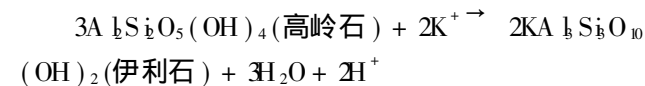


反应中所需要的  $\text{K}^+$  来源于钾长石的溶解及碎屑云母类矿物的破坏, 反应产生的  $\text{Ca}^{2+}$  进入到碳酸盐胶结物或浊沸石中,  $\text{Fe}^{3+}$  被还原后进入到含铁碳酸盐中,  $\text{Mg}^{2+}$  进入到白云石中,  $\text{Si}^{4+}$  造成次生石英的沉淀, 也可能进入到沉淀的浊沸石中,  $\text{Na}^+$  则可引起钠长石的沉淀或斜长石的钠长石化。大量自生矿物沉淀所需要的离子来源都与该反应有关, 因而 Alberta 等将该反应的反应物称为成岩作用的胶结剂。

浊沸石的分布与长石和碳酸盐的分布有关, 长石的大量存在是浊沸石形成的物质条件, 即斜长石必须要有足够含量才能形成浊沸石<sup>[20]</sup>。延长组储层砂岩中, 自生浊沸石和碳酸盐胶结物呈互消长关系, 原因是浊沸石和碳酸盐胶结物的沉淀过程存在  $\text{Ca}^{2+}$  的竞争, 在低  $\text{H}^+$  离子浓度, 较高  $P_{\text{CO}_2}$  时会发生方解石沉淀, 反之, 则可能发生浊沸石的胶结作用。富县探区浊沸石胶结物主要发育在长 3 油层组, 且碳酸盐胶结物含量明显低于其它层位, 其原因就是该层位长石碎屑含量较高, 平均达到 53.36%。

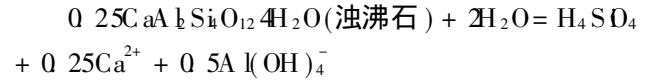
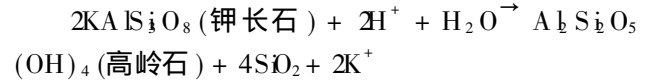
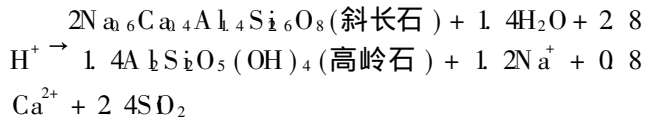
### 3.3 溶解作用对孔隙的改善

溶解作用是改善孔、渗条件的重要途径。在晚成岩 A 亚期, 富含有机酸和无机酸的酸性孔隙流体是导致储层碎屑组分发生溶解的主要动力和介质。烃源岩中丰富的有机质向烃类转化过程中释放出大量  $\text{CO}_2$ , 使孔隙流体介质呈酸性<sup>[21, 22]</sup>; 随埋藏深度增加, 温度升高, 泥岩中的干酪根在 80~120°C 时含氧官能团因热裂解形成羧酸等有机酸, 可使铝硅酸盐和碳酸盐矿物的溶解度增大, 并发生溶蚀作用<sup>[18]</sup>; 粘土矿物的频繁转化会产生酸性流体, 如高岭石向伊利石转化过程中可产生  $\text{H}^+$ <sup>[21]</sup>:

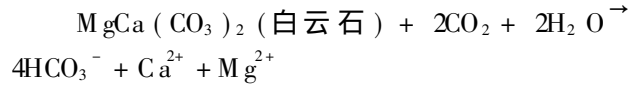
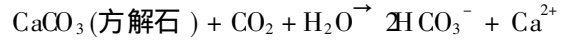


深埋藏晚期成岩阶段, 在 100~140°C 范围内 (有机质高成熟阶段), 硫酸盐与烃类发生氧化还原反应产生  $\text{H}_2\text{S}$  溶于水中, 形成酸性地层水介质<sup>[15]</sup>。

以上各种途径形成的酸性孔隙流体造成储层岩石骨架颗粒 (以斜长石为主, 少量钾长石) 及早先形成的自生浊沸石胶结物发生溶解<sup>[23]</sup> (图 2G)。



反应式右边的  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , 在  $\text{Al}^{3+}$  的浓度达到 100 ppm 时, 可呈络合物被孔隙水带走, 在弱酸性条件下结晶产生自形高岭石集合体充填于孔隙中,  $\text{SiO}_2$  可在原处或经孔隙水带到别处沉淀形成自生石英, 自生石英与自生高岭石集合体为晚成岩 A 期酸性矿物组合。此外, 早期成岩胶结物方解石和白云石也发生了一定规模的溶解:



富县探区延长组高岭石分布的一个重要特征是在纵向上的明显分带性, 即高岭石含量在靠近印支期不整合面的上部油层组长 2 长 3 油层组明显高于下部油层组, 可能与印支期暴露时间间隔中大气淡水对长石的溶解作用有关, 研究表明: 大气降水也能导致矿物的溶解<sup>[22, 24]</sup>, 大气水的这种淋滤作用可延续到 1500~2300 m。主要表现为碳酸盐胶结物的溶解, 长石及岩屑沿其解理缝、微裂缝及颗粒边缘的溶解, 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, 可见伴随长石和方解石的溶解作用发生了高岭石化 (图 2H)。与早期成岩高岭石相比, 表生成岩高岭石无伊利石化现象。

总之, 研究区延长组经历了晚三叠世的下降 → 晚三叠世末的上升 → 早、中侏罗世的下降 → 中侏罗世末的上升 → 早白垩世的下降 → 晚白垩世末的上升等多次地壳升降, 孔隙变化则经历了原生孔隙丧失 → 次生孔隙出现 → 原生孔隙和次生孔隙丧失 → 次生孔隙出现的反复过程 (图 1), 在整个盆地演化过程中形成的孔隙中, 对油的储集有意义的有三种, 一是在早成岩—中成岩半成熟期经压实和胶结后残余下来的原生粒间孔隙, 一是在早白垩世有机质成熟阶段由于深溶作用产生的溶蚀孔隙; 再就是在机械压实过程中形成的微裂隙。至于表生成岩条件下形成的淋滤孔, 由于形成较晚, 对油的早期储集意义不大。

## 4 储层孔喉特征

### 4.1 储层孔隙类型

富县探区延长组长 8~长 2 油层组砂岩储层发育多种孔隙类型,主要有残余粒间孔、溶蚀次生孔隙、和少量晶间微孔隙及微裂隙等。

残余粒间孔,是指在成岩过程中原生粒间孔隙被填隙物部分充填改造后形成的一类孔隙,这类孔隙孔径较大,直径一般为 10~50  $\mu\text{m}$ ,连通性好,且在各个目的层段均较发育,但分布很不均一,具有强烈的非均质性。

溶蚀型次生孔隙包括溶蚀粒间孔隙、溶蚀粒内孔隙、铸模孔隙和溶蚀填隙物内孔隙。溶解组分主要为长石与方解石,此外有云母、岩屑、粘土矿物、浊沸石、和绿泥石化碎屑。其中长石溶蚀粒内孔相对发育,其次为浊沸石胶结物发生溶解形成的溶蚀浊沸石内孔隙,尤其是长 3 油层组的主要孔隙类型之一。

晶间微孔隙主要有自生绿泥石、自生高岭石和自生伊利石、伊蒙混层晶间微孔隙,此种孔隙孔径较小,且连通性较差,大大地降低了储层的渗透率。

微裂隙主要有两种。一种是颗粒间缝隙和云母碎屑、长石碎屑的解理缝,这些微缝宽度一般小于 3  $\mu\text{m}$ ,由于它们形成较早,分布普遍,因此对于粒间孔隙与粒内孔隙的连通起了重要作用。另一种是裂缝,指砂岩在外力作用下发生破裂而形成的一类次生孔隙。研究区砂岩在成岩期因受构造应力作用发生挤压,导致部分砂岩形成破裂缝。裂缝孔隙多出现于致密砂岩中,在 21 口井岩芯观察中有 4 口井见到 0.6~2.0 m 的裂缝 5 条。但研究区砂岩裂缝不发育,且分布具有很强的不均一性。

研究区各种孔隙中以粒间孔含量最高,其次是长石溶孔,从纵向来看,长 2 长 3 及长 6 油层组的粒间孔、溶蚀孔和总孔隙含量均明显高于长 7 和长 8 油层组(图 3)。说明一方面在埋藏成岩期,延长组下部地层成岩强度明显大于上部地层,原生粒间孔保存较少,另一方面,晚白垩世至第三纪鄂尔多斯盆地抬升遭受剥蚀期间,上部地层更接近地表环境,受大气降水的淋滤作用更强烈,次生孔隙更发育。

### 4.2 储层孔喉分布特征

通过铸体薄片观察和压汞资料所反映的孔喉分布特征来看,富县探区延长组储集砂岩孔喉分选较差,大多数样品的毛管压力曲线略粗歪度,少量样品细歪度,孔喉分布频率直方图上,以单峰为主,有少量

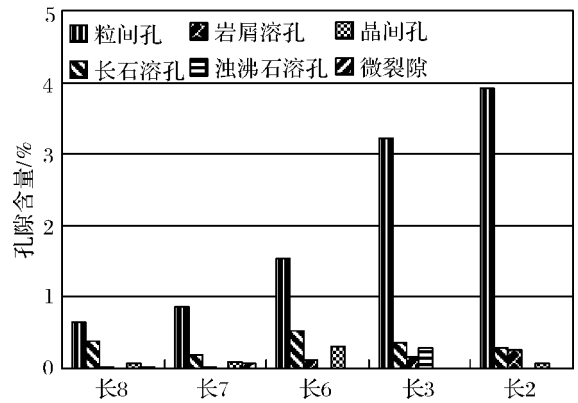


图 3 延长组砂岩孔隙类型及含量

Fig 3 Pore type and content of Yanchang Formation sandstone

呈双峰,峰值低,峰位宽,峰值一般小于 30%。在单峰型分布中,较粗孔喉峰态,主峰位多处于 0.00735~0.735  $\mu\text{m}$  之间,喉道中值半径在 0.0054~0.8448  $\mu\text{m}$  范围内,在三角洲平原分流河道和三角洲前缘水下分流河道砂体中均有分布;细孔喉峰态,主峰位多位于 0.000735~0.00735  $\mu\text{m}$  处,这种孔喉类型最大进汞饱和度小于 50%,主要分布在水下分流河道的边缘部位。

通过铸体薄片和扫描电镜分析统计,富县探区延长组平均孔径在 0~50  $\mu\text{m}$  之间,其中在 10~50  $\mu\text{m}$  (小孔)之间占 66.3%,在 0.5~10  $\mu\text{m}$  (细孔隙)之间占 3.1%,小于 0.5  $\mu\text{m}$  (微孔隙)占 30.6%。连接孔隙之间的喉道主要有两种,即残余孔隙和晶间微孔隙。

### 4.3 储层孔喉结构分类

富县探区延长组孔隙喉道均偏细,结合前人对鄂尔多斯盆地延长组储层孔喉特征的研究<sup>[25]</sup>,将研究区储层孔喉结构划分为五类:小孔细喉、小孔微细喉、小孔微喉、微细孔微细喉和微细孔微喉型,相应的压汞曲线形态分别为 iv、㉔、㉕和㉖类(图 4)。

iv类:毛管压力曲线呈略向左下凹的陡坡状,多出现平台,排驱压力一般低于 1.0 MPa 中值压力多为 0.87~11.38 MPa 中值半径一般大于 0.1  $\mu\text{m}$ ,分选中等一较差,变异系数为 0.14~0.38,孔隙度多大于 10%,渗透率变化大,为  $0.053 \times 10^{-3} \sim 5.250 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为  $1.279 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。此类砂岩多出现在三角洲平原分流河道砂体中,也可在三角洲前缘水下分流河道砂体中分布,出现频率为 20.5%。

㉔类:毛管压力曲线呈向左下凹的直线状接近 45°左右的斜坡状,多出现较缓的平台,排驱压力多为

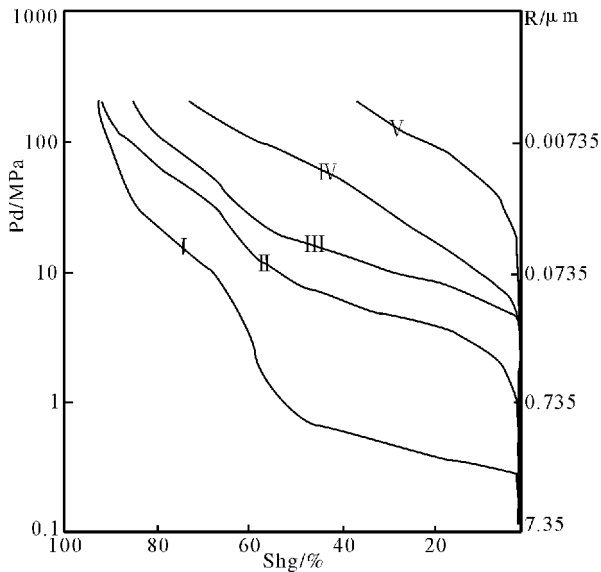


图 4 延长组砂岩典型毛管压力曲线

Fig 4 Typical Hg injection curves of Yanchang Formation sandstones in Ansai Oilfield

1.031 2~1.826 7 MPa, 中值压力平均 28.850 7 MPa, 中值半径一般为 0.036 5~0.185 7  $\mu\text{m}$ , 平均为 0.072 3  $\mu\text{m}$ , 分选中等—较差, 变异系数为 0.123 5~0.629 8, 平均为 0.279 1。孔隙度多大于 8%, 平均孔隙度为 13%, 平均渗透率为  $1.98 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 渗透率变化大, 为  $0.072 7 \times 10^{-3} \sim 2.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均为  $0.534 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。这类砂岩主要出现在三角洲平原分流河道砂体及三角洲前缘水下分流河道砂体中, 出现频率为 23.1%。

④类: 毛管压力曲线呈分布于图形上半部的向右凸的斜坡状或略向左下凹的平台状, 门槛压力中等, 多为 2.916 9~4.245 1 MPa, 中值压力平均 42.376 8 MPa, 中值半径一般为 0.013~0.101 5  $\mu\text{m}$ , 平均为 0.034  $\mu\text{m}$ , 分选较差, 变异系数变化范围大, 为 0.071 5~1.722 4, 平均为 0.314 9。孔隙度为 5.9%~12.8%, 平均为 9.8%, 渗透率变化大, 为  $0.050 4 \times 10^{-3} \sim 0.576 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均为  $0.202 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。多出现在三角洲前缘水下分流河道砂体中, 也可在三角洲平原分流河道砂体中分布, 出现频率为 19.7%。

⑤类: 毛管压力曲线呈分布于图形上半部的直线状接近 45°左右的斜坡状。门槛压力较高, 多为 4.543 8~8.742 5 MPa, 中值压力平均 68.952 4 MPa, 中值半径一般为 0.005 4~0.043 2  $\mu\text{m}$ , 平均为 0.015 1  $\mu\text{m}$ , 分选差, 变异系数变化范围大, 为 0.046

8~1.912, 平均为 0.328 5。此类储层物性较差, 孔隙度为 2.2%~11.7%, 平均为 7%, 渗透率较低, 变化范围大, 为  $0.021 2 \times 10^{-3} \sim 0.371 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均为  $0.123 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 这类储层多出现在三角洲前缘水下分流河道砂体中, 出现频率为 20.5%。

(九类: 毛管压力曲线呈分布于图形上半部的略向右凸的斜坡状。此类砂岩储集层门槛压力高, 大于 8 MPa, 最大孔隙半径一般小于 0.25  $\mu\text{m}$ , 最大进汞量不超过 50%, 此类储层物性差, 孔隙度为 0.8%~10.2%, 平均为 5.3%, 渗透率低, 变化范围大, 为  $0.009 \times 10^{-3} \sim 0.088 8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均为  $0.0341 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 多出现在三角洲前缘水下分流河道侧翼中, 出现频率为 16.2%。

参照前人根据砂岩储集岩孔隙类型、毛管压力参数的分类评价标准<sup>[26,27]</sup>, 前四类孔喉结构为有效储层, 第五种孔喉结构为无效储层。

## 5 结论

砂岩各组分含量变化大是造成研究区储层成岩变化和孔隙结构复杂的因素之一。砂岩的成分成熟度较低, 结构成熟度中等, 主要为岩屑长石细砂岩和长石细砂岩。填隙物组分总体含量高并以胶结物为主, 其中主要为方解石和绿泥石膜, 其次为水云母和硅质胶结, 此外, 在长 3 和长 2 油层组中分别发育浊沸石和高岭石胶结物。

富县探区延长组成岩作用已经普遍进入晚成岩 A 期, 下部成岩阶段明显高于上部成岩阶段, 较显著的成岩作用有压实及压溶作用、胶结充填作用和溶解作用三种类型, 它们对砂岩的孔隙性和渗透性有很大的影响, 对于油气藏的形成和开发有密切的关系。早期压实和压溶作用及晚期绿泥石、方解石、浊沸石和高岭石等胶结物充填破坏了部分孔隙, 同时颗粒周围绿泥石薄膜阻止了石英、长石的自生加大, 从而使部分粒间孔隙得以保存; 晚期成岩有机质脱羧与表生成岩溶蚀作用是本区碎屑岩次生孔隙形成的主要原因, 溶蚀组分主要为长石和后期胶结物浊沸石。

富县探区自生浊沸石和碳酸盐胶结物呈互消长关系, 浊沸石胶结物主要发育在长 3 油层组, 且碳酸盐胶结物含量明显低于其它层位, 其原因就是该层位长石碎屑含量较高, 在成岩过程中蚀变形成浊沸石。高岭石在纵向上有明显分带性, 即高岭石含量在上部油层组长 2、长 3 油层组明显高于下部油层组, 可能是印支期暴露时间间隔中大气淡水对长石溶蚀并



生了高岭石化。

研究区孔隙类型主要有残余粒间孔、溶蚀次生孔隙、和少量晶间微孔隙及微裂隙等,以残余粒间孔和长石溶孔为主,其次为岩屑溶孔和浊沸石溶孔。孔喉结构可以划分为五类,即小孔细喉、小孔微细喉、小孔微喉、微细孔微细喉和微细孔微喉型,其中前四种为研究区有效储层,后一种为无效储层。

### 参考文献 (References)

- 1 谢正温, 谢渊, 王剑, 等. 富县地区延长组层序地层对储层的控制 [J]. 矿物岩石, 2004, 24(2): 95-103 [Xie Zhengwen, Xie Yuan, Wang Jian, *et al.* Control of sequence stratigraphy on the reservoir of Yanchang Formation in Fuxian area, northern Shaanxi [J]. *Journal of Mineral Petrology*, 2004, 24(2): 95-103]
- 2 张新建, 张剑君. 富县探区延长组重矿物组合特征及地质意义 [J]. 新疆石油地质, 2006, 27(1): 49-52 [Zhang Xinjian, Zhang Jianjun. Heavy minerals characters and geologic significance of Yanchang Formation in Fuxian exploration area, Ordos Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(1): 49-52]
- 3 郭艳琴. 富县探区延长组储层微观特征研究 [D]. 西安: 西北大学, 2006 [Guo Yanqin. Research on reservoir micro-characteristic of Yanchang Formation in Fuxian exploration area of the Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2006]
- 4 陈景山, 周彦, 彭军, 等. 富县探区低孔低渗砂体的成因类型与层内非均质模式 [J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 53-58 [Chen Jingshan, Zhou Yan, Peng Jun, *et al.* Genetic type and intraformational heterogeneity pattern of low-porosity and low-permeability sandbodies in Fuxian exploration Area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(1): 53-58]
- 5 苟迎春, 李建齐, 郑红军, 等. 富县探区低孔低渗砂体的成因类型与层内非均质模式 [J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 360-364 [Gou Yingchun, Li Jianqi, Zheng Hongjun, *et al.* Diagenesis of the Chang 6 Member Upper Triassic Fuxian area of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(3): 360-364]
- 6 王艳, 洪宇, 王运所, 等. 陕北富县探区延长组长 3 储层特征及评价 [J]. 西北地质, 2006, 39(4): 97-104 [Wang Yan, Hong Yu, Wang Yunsuo, *et al.* Characteristic and evaluation of Chang 3 Member reservoir of the Yanchang Formation in the Fuxian area, north Shaanxi 2006, 39(4): 97-104]
- 7 宋凯, 吕剑文, 杜金良, 等. 鄂尔多斯盆地中部上三叠统延长组物源方向分析与三角洲沉积体系 [J]. 古地理学报, 2002, 4(3): 59-66 [Song Kai, Lv Jianwen, Du Jinliang, *et al.* Source direction analysis and delta depositional systems of Yanchang Formation of the Upper Triassic in the central Ordos Basin [J]. *Journal of Paleogeography*, 2002, 4(3): 59-66]
- 8 张成立. 延长油区盆地构造模拟及含油气系统分析 [D]. 西安: 西北大学, 1999 [Zhang Chengli. Basin structure modeling and analysis of oil system in Yanchang area [D]. Xi'an: Northwest University, 1999]
- 9 裴泽楠, 薛叔浩编著. 油气储层评价技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994, 59-64 [Qiu Yinan, Xue Shuhao. Appraisal Technology of Hydrocarbon Reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994, 59-64]
- 10 Alka M, Salem S, Morad S, *et al.* Diagenesis and reservoir-quality evolution of fluvial sandstones during progressive burial and uplift: evidence from the Upper Jurassic Boipeba Member, Reconcavo Basin, Northeastern Brazil [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(7): 1015-1040
- 11 Paxton S T, Szabo J O, Calvert C S, *et al.* Preservation of primary porosity in deeply buried sandstones: A new play concept from the Cretaceous Tuscaloosa Sandstone of Louisiana [AAPG Annual Convention with DPA /EMD divisions and SEPM. Technical program with abstracts [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74: 737
- 12 Szabo J O, Paxton S T. Intergranular volume (IGV) decline curves for evaluating and predicting compaction and porosity loss in sandstones [C]// AAPG 1991 Annual Convention with DPA /EMD divisions and SEPM. Technical program with abstracts [J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75: 678
- 13 Oelkers E H, Bjorkum P A, Murphy W M. A petrographic and computational investigation of quartz cementation and porosity reduction in North sea sandstones [J]. *American Journal of Science*, 1996, 296: 420-452
- 14 Ehrenberg S N. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain-coating chlorite: Examples from the Norwegian Continental Shelf [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(7): 1260-1286
- 15 赵孟为. 划分成岩作用与埋藏变质作用的指标及其界限 [J]. 地质论评, 1995, 41(3): 233-244 [Zhao Mengwei. The indicators and boundary for separating diagenesis from burial metamorphism [J]. *Geological Review*, 1995, 41(3): 233-244]
- 16 Wopfner H, Markwort S, Semkiva P M. Early diagenetic laumontite in the Lower Triassic Manda Beds of the Ruhuhu Basin, southern Tanzania [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1991, 61(1): 65-72
- 17 Bloch S, Helmold K P. Approaches to predicting reservoir quality in sandstones [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(1): 97-115
- 18 张立飞. 陕北三叠系延长统浊沸石的成因及形成条件的理论计算 [J]. 岩石学报, 1992, 8(2): 145-152 [Zhang Liefei. Origin of laumontite and condition for its formation in Triassic Yanchang series, North Shaanxi [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1992, 8(2): 145-152]
- 19 柳益群. 关于成岩作用与变质作用界限的讨论——从沸石谈起 [J]. 地质论评, 1996, 42(3): 216-222 [Liu Yiqun. The boundary between diagenesis and metamorphism—a discussion with reference to zeolite facies [J]. *Geological Review*, 1996, 42(3): 216-222]
- 20 Jin Hwan Noh and Boles J R. Origin of zeolite cements in the Miocene sandstones, North Tejon oil fields, California [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63(2): 248-260
- 21 Surlan R C, Crossey L J, Hagen E S, Heasler H P. Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 78(1): 1-23
- 22 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——以塔里木盆地西南坳陷地区为例 [J]. 沉积学报, 1999, 17(4): 584-590 [Wang Qi, Shi Jifan, Xue Lianhua, *et al.* Characteristics of fluid-rock interaction in elastic reservoir con-

- trolled by evolution of diagenetic environment taking the southwest depression of Tarin Basin as an example[ J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 1999 17(4): 584-590
- 23 Savage D, Caved M R, Haight D, *et al*. The reaction kinetics of laumontite under hydrothermal conditions Europe[ J]. *Journal of Mineral* 1993 523-535
- 24 Giles M R, DeBoer R B. Origin and significance of redistributional secondary porosity[ J]. *Marine and Petroleum Geology* 1990 6 378-397
- 25 李志伟, 刘颖梅, 安塞油田长 2 长 3 浅油层特征研究[ J]. 低渗透油气田, 2000 5(2): 14-18[ Li Zhiwei Liu Yingmei Characteristics of shallow Chang 2, Chang 3 reservoirs in Ansai oilfield [ J]. *Low Permeability Reservoirs* 2000 5(2): 14-18]
- 26 罗蛰潭, 王允诚. 油气储集层的孔隙结构[ M]. 北京: 科学出版社, 1986 201-205[ Luo Zhetan, Wang Yuncheng Pore Structure of Hydrocarbon Reservoirs[M]. Beijing: Science Press 1986 201-205]
- 27 庞雯, 郭德运, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地甘谷驿油田东区长 6 储层特征及储层评价[ J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2004 40(5): 96-99[ Pang Wen, Guo Deyun, Zhao Jingzhou, *et al*. Reservoir feature and evaluation of oil bearing Chang 6 Bed in the east of Ganguyi Oilfield in Ordos Basin [ J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences* 2004 40(5): 96-99]

## Diagenesis and Pore Structure Characteristic of Yanchang Formation of Upper Triassic in Fuxian Exploration Area

GUO De-yun<sup>1</sup> GUO Yan-qin<sup>2</sup> LIW en-hou<sup>1</sup> LI Ke-yong<sup>3</sup> LONG Li-ping<sup>4</sup>

(1 Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069; 2 Institute of Oil and Gas Resources, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065;

3 Institute of Energy Resources and Environmental Engineering, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000

4 Changqing Well Construction Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an 710021)

**Abstract** On the basis of a careful analysis of thin section observation, scanning electron microscope and X-ray diffraction data, the diagenetic stage of Yanchang Formation in Fuxian exploration area is the A stage of late diagenesis and the main diagenetic metamorphism include mechanical-chemical compaction, consolidated fill and dissolution. The mechanical-chemical impact and consolidated fill are the main factors causing the loss of porosity for the sandstones. Carbonate, hydrosyalite and quartz-feldspar overgrowths are the main cements that reduced the reservoir quality of the sandstones. Thin chlorite film around detrital grains prevented from part of quartz and feldspar overgrowth and carbonate cement precipitation, which cause a part of primary pore preserved and hence caused a better reservoir quality. The main factor for the great quantity secondary pore is dissolution partly of detrital feldspars and laumontite cements developed in early stage by the acidic liquid related to decomposition of organic matter during hydrocarbon enrichment in the late diagenesis and meteoric-waters during epidiagenesis.

Laumontite cement developed mainly in Chang 3 Oilbeds which were owing to the high content of feldspar clastic and the alteration to feldspar at the diagenetic process. Kaolinite content is high in the Chang 2 and Chang 3 Oilbeds which probably were owing to feldspar corrosion by fresh water in atmosphere and the kaolinite deposit at Indo-Chinese epoch.

The main pore types are residual intergranular pore and feldspar-dissolved pore and the pore-throat structure can be divided into five types which are eyelet-thin throat, eyelet-micro-thin throat, eyelet-micro-throat, micro-thin pore-micro-thin throat and micro-thin pore-micro-throat in which the last type is unavailable reservoir.

**Key words** diagenesis; pore structure; Yanchang Formation of Upper Triassic; Fuxian exploration area; Ordos basin