

doi:10.3799/dqkx.2017.558

# 鄂尔多斯盆地南部延长组重力流致密储层成岩作用及物性演化

孙宁亮<sup>1</sup>, 钟建华<sup>1</sup>, 刘绍光<sup>2</sup>, 田东恩<sup>3</sup>, 刘闯<sup>1</sup>, 曹梦春<sup>1</sup>, 杨冠群<sup>1</sup>, 郝兵<sup>1</sup>

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 陕西延长油田股份有限公司勘探开发技术研究中心, 陕西延安 716000

3. 陕西延长油田股份有限公司, 陕西靖边 718500

**摘要:** 成岩作用及物性演化的研究对致密砂岩储层和致密油开发具有重要意义。综合利用岩石铸体薄片鉴定、扫描电镜、X衍射分析、流体包裹体分析等测试手段, 对研究区致密储层进行详细研究。研究表明: 深水重力流砂体粒度细, 孔喉组合以细孔—微喉型为主, 物性差, 是一套典型的特低渗透储层; 目前正处于中成岩B期, 其成岩演化序列为: 机械压实作用/方解石胶结→凝灰物质水解蚀变/云母水化/伊利石胶结/绿泥石胶结/石英溶蚀→早期长石溶蚀/石英加大/碳酸盐灰泥重结晶/早期碳酸盐胶结物溶蚀→晚期长石溶蚀→铁方解石胶结, 成岩环境主要经历了碱性→酸性→弱碱性的转换过程; 距今约99~118 Ma的早白垩世, 研究区储层发生了连续的2期油气充注; 储层物性演化史表明早成岩期储层的成岩作用对储层物性影响大, 使储层已经致密化, 研究区具有先致密后成藏的特性。

**关键词:** 鄂尔多斯盆地; 延长组; 深水重力流; 致密储层; 成岩作用; 物性演化; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2017)10-1802-15

收稿日期: 2017-01-03

## Diagenesis and Physical Property Evolution of Gravity Flow Tight Reservoir of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin

Sun Ningliang<sup>1</sup>, Zhong Jianhua<sup>1</sup>, Liu Shaoguang<sup>2</sup>, Tian Dongen<sup>3</sup>, Liu Chuang<sup>1</sup>, Cao Mengchun<sup>1</sup>, Yang Guanqun<sup>1</sup>, Hao Bing<sup>1</sup>

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Exploratioin &amp; Development Technology Research Center, Yanchang Oil Field Co. Ltd., Yan'an 716000, China

3. Yanchang Oil Field Co. Ltd., Jingbian 718500, China

**Abstract:** The research of diagenesis and physical property evolution is important to tight sandstone reservoir and tight oil exploitation. The tight reservoir was detailedly studied in the study area by the analysis of cast thin section, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction and homogenization temperature analysis of fluid inclusion in this study. The results show that deep-water sand body is a typical ultra-low porosity and permeability reservoir, which has fine granularity, poor reservoir physical properties, with thin pore-micro throat dominated pore-throat combination. The reservoir in the B sub-stage of mesogenetic diagenesis has experienced the following complex diagenesis evolution sequence: compaction/calcite cementation→tuffaceous hydrolyze alteration/mica hydration/illite cementation/chlorite cementation/quartz dissolution→early feldspar dissolution/quartz overgrowth/carbonate plaster recrystallization/early carbonate-cement dissolution→late feldspar dissolution→ferroan calcite cementation. The diagenetic environment underwent an evolution of alkalescence→acid→alkalescence. The test data of fluid inclusions show that Early Cretaceous (99—118 Ma) is the main hydrocarbon accumulation period with two hydrocarbon injections. The reservoir physical properties evolution show that early diagenesis had great influence on the reservoir, and it is inferreded that the sandstone had already been compacted very tight before the hydrocarbon accumulation period.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No.41172093); 中央高校基本科研业务费专项资金(No.15CX06002A)。

**作者简介:** 孙宁亮(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事重力流沉积及非常规储层研究。ORCID: 0000-0002-5333-6363。

E-mail: sunningliangll@163.com

**引用格式:** 孙宁亮, 钟建华, 刘绍光, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地南部延长组重力流致密储层成岩作用及物性演化. 地球科学, 42(10): 1802—1816.

**Key words:** Ordos basin; Yanchang Formation; deep-water gravity flow; tight reservoir; diagenesis; physical property evolution; petroleum geology.

## 0 引言

鄂尔多斯盆地经过40余年的勘探与开发,逐步实现了由三角洲岩性油气藏向深湖重力流岩性油气藏,由常规油气藏向非常规致密油气藏的转变(武富礼等,2004;陈全红等,2007;杨华等,2012)。近年来,随着勘探程度的不断提高,鄂尔多斯盆地南部深水重力流砂体得到了极大的关注(付锁堂等,2010;付金华等,2013;廖纪佳等,2013;杨仁超等,2014;杨华等,2015),成为鄂尔多斯盆地增储上产的重要目标。2006年长庆油田在白豹地区三叠系延长组长6油层组发现 $3\,000\text{ km}^2$ 的深水含油砂岩,可形成 $3\times 10^8\sim 5\times 10^8\text{ t}$ 的石油地质储量(邹才能等,2009),证明深水油气具有重要的勘探价值。研究区位于鄂

尔多斯盆地南部旬邑—正宁地区,在延长组长6—长7期深水重力流砂体广泛发育,同时重力流形成的深水砂岩储层非均质性强,经历了复杂的成岩演化,这就使得优质储层的分布规律极其复杂,严重制约了研究区储层的有效勘探开发。因此,亟需对研究区重力流储层特征及成岩作用进行研究,加深对重力流储层分布规律的认识,以期为研究区重力流储层的勘探开发提供理论指导。同时研究区油气成藏时间及期次、成岩期次与成藏期次的顺序关系还有待于进一步分析,以完善研究区油气成藏规律研究。本次研究工区面积约 $1\,600\text{ km}^2$ ,主要研究目的层位为三叠系延长组长6—长7油层组,同时作者对鄂尔多斯盆地南部旬邑三水河、彬县百子沟、铜川耀县瑶曲、铜川漆水河、铜川何家坊5个野外地质剖面

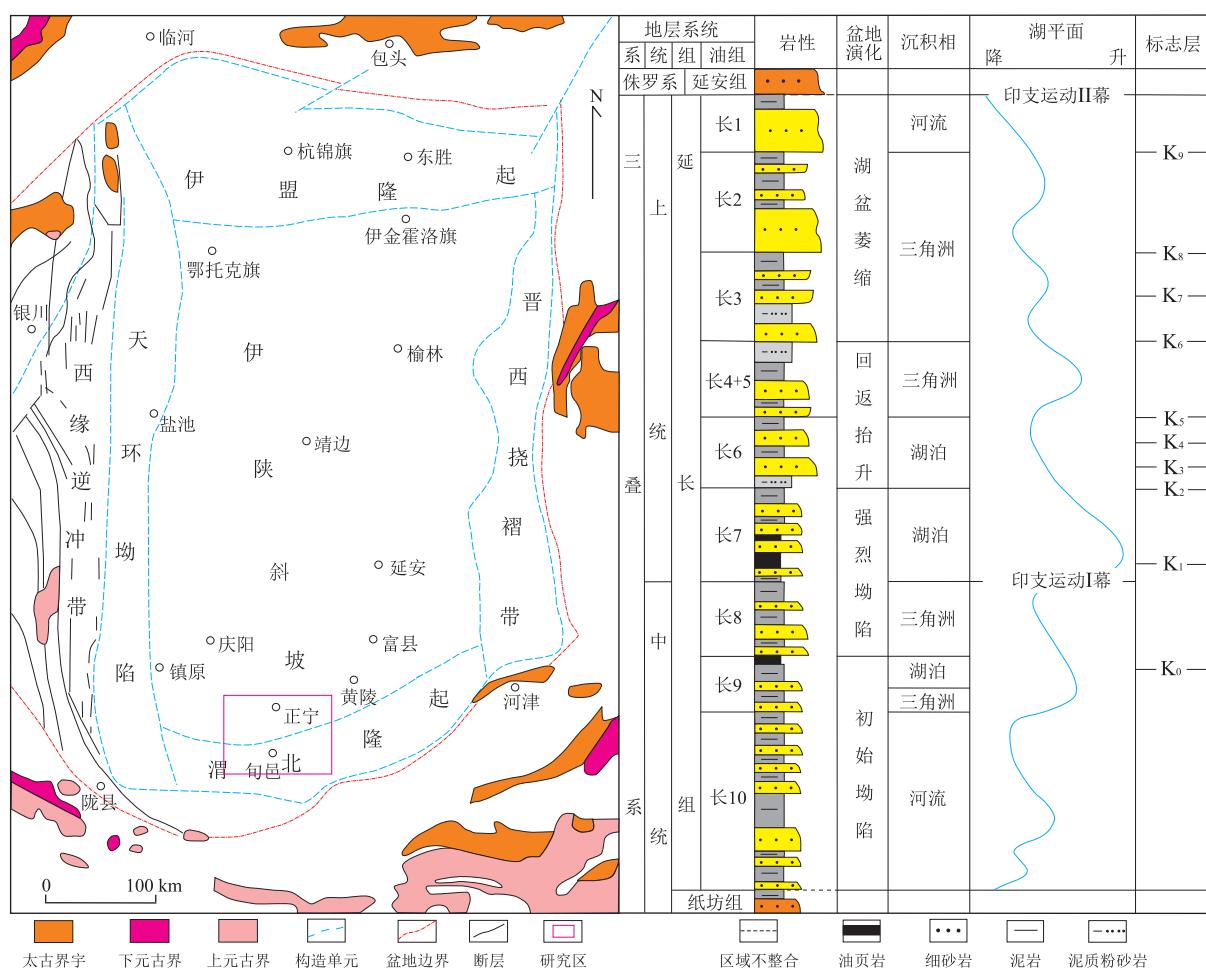


图 1 研究构造位置及延长组地层综合柱状图

Fig.1 The tectonic location of study area and comprehensive stratigraphic histogram of Yanchang Formation  
据周翔等(2016)修改

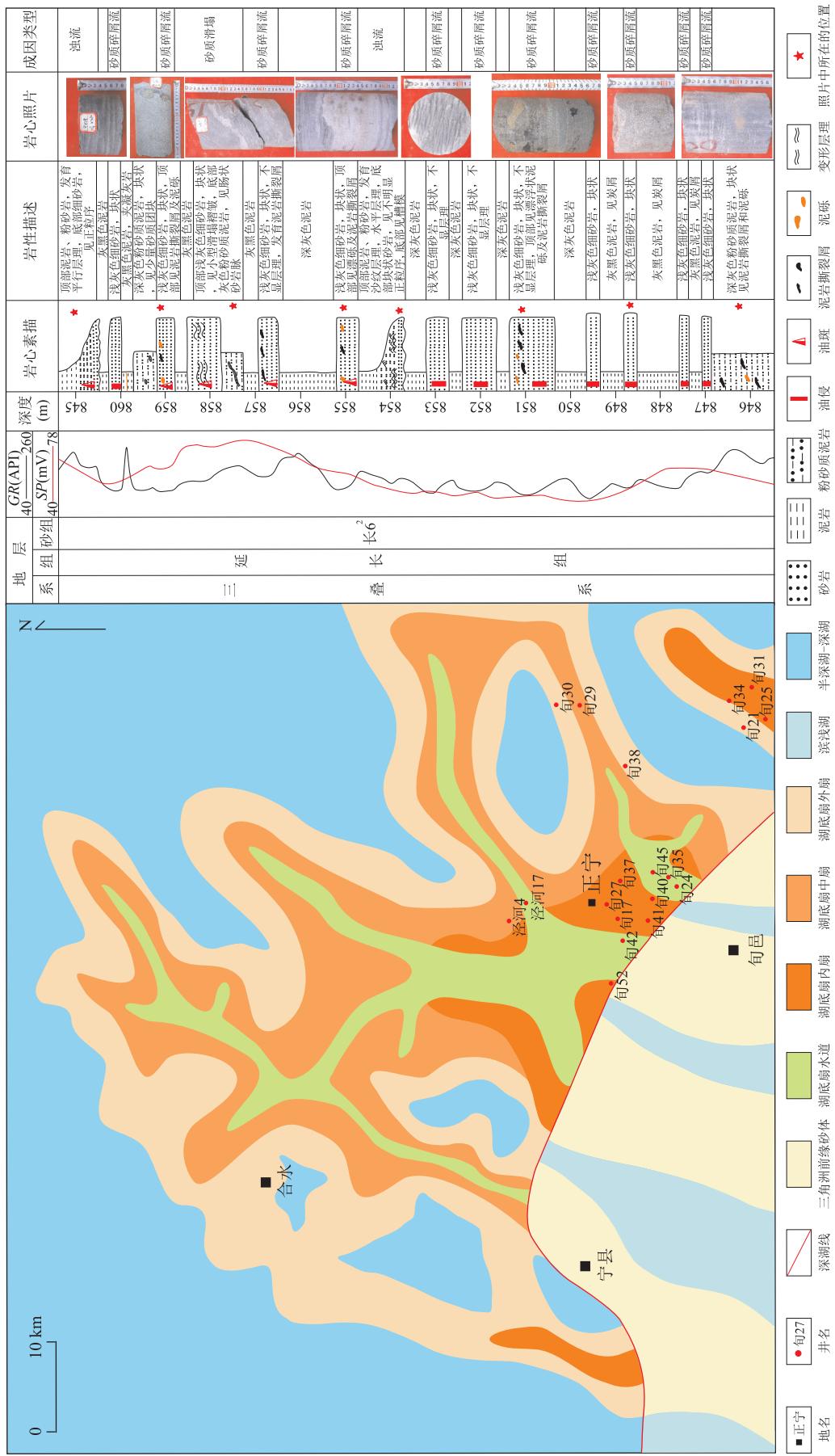


图 2 鄂尔多斯盆地南部地区延长组长6<sup>2</sup>亚段沉积相平面展布图及旬42井岩心柱状图  
Fig. 2 Planar distribution of sedimentary facies during the Chang 6<sup>2</sup> period and core columnar section of Xun42 well in southern Ordos basin

表 1 研究区长 6、长 7 油层组深水重力流砂岩碎屑岩组分含量

Table 1 Statistics of clastic constituents of deep-water gravity flow sandstone of Chang 6, Chang 7 oil layers in study area

层位	石英(%)	长石(%)	岩屑(%)					样品数(个)
			变质岩	岩浆岩	沉积岩	其他	小计	
长 6	37.6	25.4	9.7	6.0	2.4	4.0	22.1	49
长 7	35.3	24.8	10.5	8.7	1.6	3.5	24.3	60

表 2 研究区长 6、长 7 油层组深水重力流砂岩储集层填隙物含量

Table 2 Statistics of interporous filings of deep-water gravity flow sandstone of Chang 6, Chang 7 oil layers in study area

层位	填隙物(%)								样品数(个)	
	高岭石	水云母	铁方解石	方解石	铁白云石	白云石	硅质	浊沸石		
长 6	2.2	1.6	1.72	0.92	0.96	0.67	1.5	1	10.57	49
长 7	1.5	2.2	1.81	1.11	0.87	0.74	2.0	1	11.23	60

及工区内的 28 口取心井进行精细观察,收集到钻测井资料约 140 口以及铸体薄片、扫描电镜、X 衍射、流体包裹体等分析测试资料 300 余件,基于上述资料对研究区内深水重力流砂体储层特征、成岩作用、油气成藏时间、成岩演化序列、成岩物性演化进行综合研究,为研究区进一步勘探开发提供地质依据。

## 1 研究区沉积背景

研究区位于鄂尔多斯盆地南部,地跨陕北斜坡及渭北隆起两个一级构造单元(图 1),地势南高北低,东高西低。在晚三叠世延长期,鄂尔多斯盆地经历了大型内陆坳陷盆地形成、发展、消亡的全过程,沉积了一套厚度约 1 000~1 300 m 的陆源碎屑岩系,根据标志层特征自下而上可分为长 10~长 1,共 10 个油层组(杨华等,2015;周翔等,2016)(图 1)。研究区主要发育南部物源的辫状河三角洲一半深湖、深湖沉积体系(武富礼等,2004;朱筱敏等,2013),长 7 期是湖盆最大湖泛期,深湖面积区域最大,长 6 期深湖面积有所萎缩,但总体上研究区在长 6—长 7 期处于半深湖—深湖环境,通过对研究区沉积相的分析,在研究区主要发育湖底扇沉积(图 2),又可分为内扇、中扇、外扇 3 个亚相,内扇主要发育主水道和主水道侧翼两个微相,主水道主要见厚层砂质碎屑流块状砂岩,主水道侧翼见中薄层砂质碎屑流砂岩及泥质沉积,中扇亚相分为分支水道、分支水道侧翼两个微相,分支水道主要见中—厚层砂质碎屑流砂岩,分支水道侧翼见薄层砂质碎屑流砂体、浊流砂体及泥质沉积,外扇主要见薄层浊流席状砂沉积。

## 2 深水砂岩储层基本特征

### 2.1 储层岩石学特征

通过 109 张岩石薄片分析鉴定,研究区长 6—长 7 深水重力流砂岩的岩石类型主要为长石岩屑砂岩及岩屑长石砂岩(图 3),岩屑成分中变质岩、岩浆岩岩屑含量较高,沉积岩岩屑较少(表 1)。填隙物主要由陆源杂基和胶结物组成(表 2),陆源杂基主要为水云母、凝灰物质及一些黏土矿物,并可见少量的灰泥,胶结物主要为碳酸盐胶结物(铁方解石、方解石、铁白云石、白云石)、硅质胶结物(石英次生加大)和黏土胶结物。

长 6、长 7 油层组重力流砂岩粒度较细,以细砂岩为主,其次为粉砂岩和少量中砂岩,碎屑颗粒的磨圆度以次棱角状为主,其次为棱角状—次棱角状、次

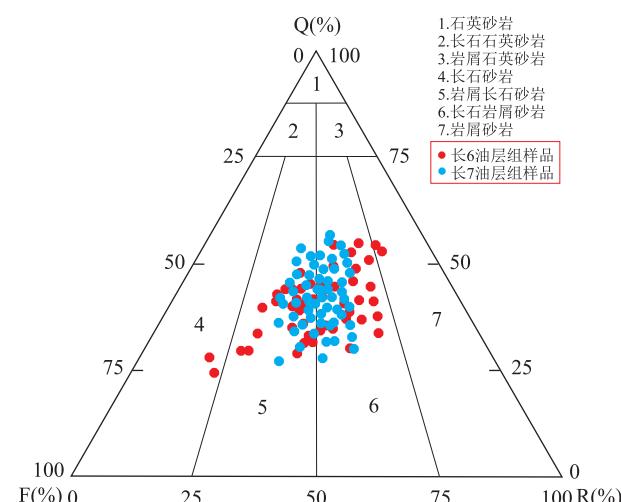


图 3 研究区长 6、长 7 油层组深水重力流砂岩岩石组分三角图

Fig.3 Detrital composition of deep-water gravity flow sandstone of Chang 6, Chang 7 oil layers in study area

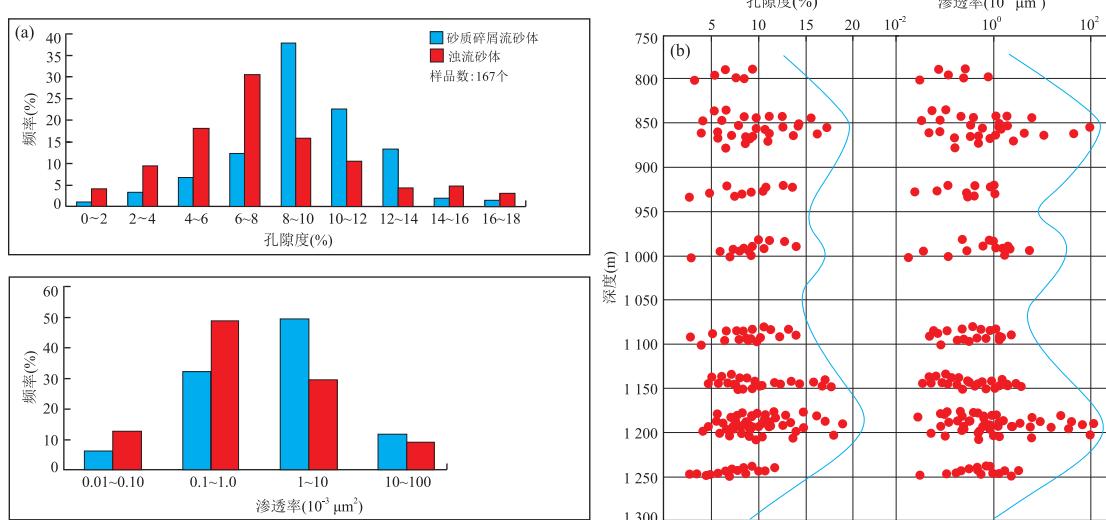


图 4 鄂尔多斯盆地南部延长组深水重力流致密储层物性分布特征

Fig.4 Reservoir properties of deep-water gravity flow tight reservoir of Yanchang Formation in southern Ordos basin

a.重力流不同类型砂体孔渗频率分布直方图;b.物性与埋深关系

圆状,颗粒之间的接触关系主要是点接触、线接触,偶见凹凸接触,缝合线接触很少见,胶结类型主要有孔隙式胶结、加大—孔隙式胶结及孔隙—薄膜式胶结。

## 2.2 储层物性及孔喉结构特征

通过岩心物性资料分析,研究区长 6—长 7 深水重力流砂体储层物性普遍不好(图 4a),扇水道中的砂质碎屑流块状砂体孔隙度多为 8%~12%,平均值为 9.8%,渗透率为  $(0.5 \sim 1.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均值为  $0.89 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;水道侧翼及外扇部分的浊积岩砂体孔隙度多为 4%~10%,平均值为 7.9%,渗透率为  $(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均值为  $0.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。研究区储层主要埋深为 800~1 250 m(图 4b),而且在 820~880 m 及 1 150~1 250 m 两个深度范围内存在高孔高渗带,高孔高渗带也是碎屑流储层较为发育的地方,是研究区重要的产油层段。根据赵靖舟等(2012)陕北储层分类评价标准,研究区长 6、长 7 深水重力流储层总体上为一套特低渗透储层。

通过毛管压力参数统计分析(表 3),深水重力流砂岩分选系数为 2.14~2.71,平均值为 2.41;变异系数为 0.15~0.22,平均值为 0.19;排驱压力为 0.04~2.54 MPa,平均值为 0.85 MPa;饱和度中值压力为 1.93~23.85 MPa,平均值为 3.56 MPa;最大连通喉道为 0.29~2.87  $\mu\text{m}$ ,平均值为 0.84  $\mu\text{m}$ ;中值连通喉道为 0.14~0.46  $\mu\text{m}$ ,平均值为 0.35  $\mu\text{m}$ 。总体来说深水砂岩储层孔隙结构相对较差,基本为略偏粗歪度,分选差,孔喉组合以细孔—微喉型

表 3 研究区深水重力流致密储层毛管压力参数

Table 3 Statistics of capillary pressure parameters of deep-water gravity flow tight reservoir in study area

主要参数	取值范围	平均值
分选系数	2.14~2.71	2.41
变异系数	0.15~0.22	0.19
排驱压力(MPa)	0.04~2.54	0.85
饱和度中值压力(MPa)	1.93~23.85	3.56
最大连通喉道( $\mu\text{m}$ )	0.29~2.87	0.84
中值连通喉道( $\mu\text{m}$ )	0.14~0.46	0.35

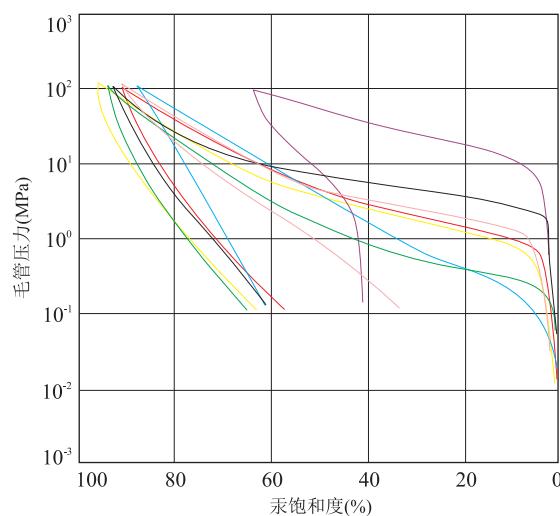


图 5 研究区深水重力流致密储层毛管压力曲线特征

Fig.5 Characteristics of capillary pressure curve of deep-water gravity flow tight reservoir in study area

为主(图 5),孔喉的连通性差,以不连通的死孔喉居多。

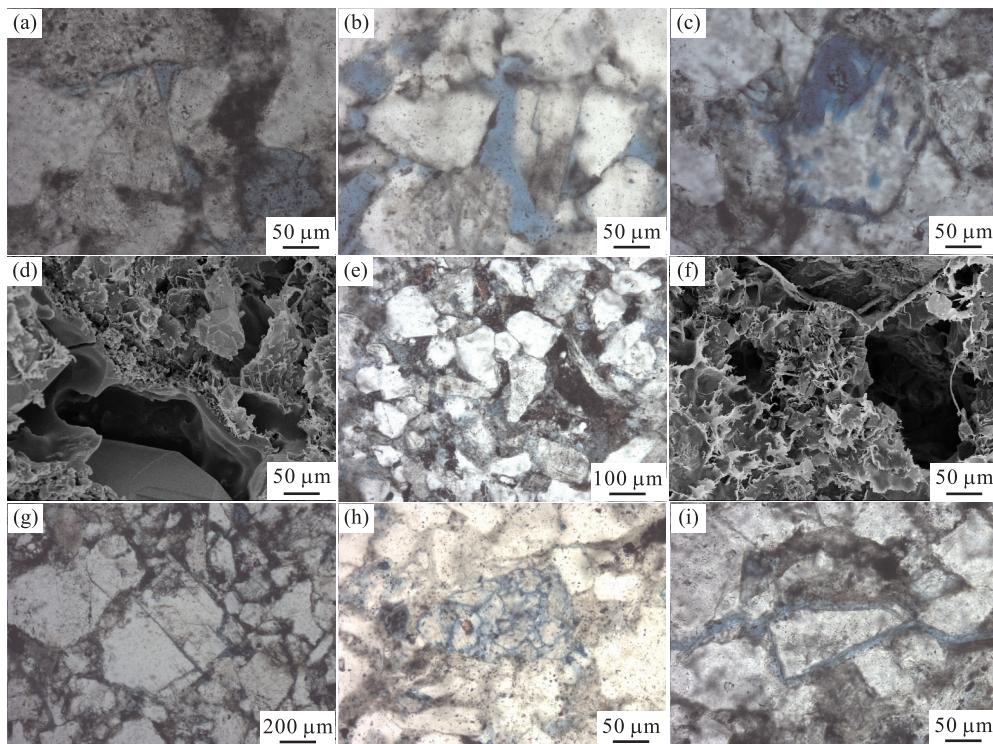


图 6 鄂尔多斯盆地南部延长组深水重力流致密储层孔隙类型特征

Fig.6 Characteristics of pore types of deep-water gravity flow tight reservoir of Yanchang Formation in Southern Ordos basin

a. 残余原生粒间孔, 旬 42 井, 853.5 m, 长 6,  $\times 50$ , 单偏光; b. 粒间溶孔, 旬 42 井, 854.5 m, 长 6,  $\times 50$ , 单偏光; c. 长石粒内溶孔, 旬 40 井, 1 071.5 m, 长 7,  $\times 50$ , 单偏光; d. 粒内溶蚀, 旬 40 井, 1 061.8 m, 长 6,  $\times 5.0$  k, 5.0 kV; e. 杂基微孔, 旬 42 井, 799.7 m, 长 6,  $\times 100$ , 单偏光; f. 伊利石晶间孔, 旬 41 井, 1 060.3 m, 长 7,  $\times 3.5$  k, 5.0 kV; g. 成岩缝, 旬 40 井, 1 064.5 m, 长 7,  $\times 200$ , 单偏光; h. 超压缝, 旬 41 井, 1 009.1 m, 长 6,  $\times 50$ , 单偏光; i. 构造张裂缝, 旬 40 井, 1 071.5 m, 长 7,  $\times 50$ , 单偏光

根据薄片及扫描电镜分析, 研究区深水重力流砂岩的孔隙类型主要有原生孔隙和次生孔隙。原生孔隙主要是原生粒间孔, 其形状较为规则, 边缘平直, 没有明显的溶蚀痕迹, 孔隙的连通性也较好(图 6a), 约占储集总空间的 29.1%。次生孔隙一般是指岩石在沉积作用过程之后, 成岩作用中形成的孔隙, 研究区的次生孔隙主要包括粒间溶蚀孔隙(图 6b)、粒内溶蚀孔隙(图 6c, 6d)、填隙物内溶孔(图 6e)和黏土矿物晶间孔(图 6f)、微裂缝(图 6g, 6h, 6i), 其中溶蚀孔隙约占储集总空间的 60.8%, 黏土矿物晶间孔约占 6.9%, 微裂缝约占 3.2%。微裂缝在研究区较发育, 按照成因可分为成岩缝、超压缝和构造缝。成岩缝主要包括压实作用形成的压裂缝及脱水形成的收缩缝, 在研究区主要见因压实作用形成的颗粒压裂缝(图 6g);超压缝主要是由于生排烃作用及水热增压形成异常高压缝, 主要表现为颗粒呈撕裂状向四周散开, 没有明显的优选方向(图 6h);构造裂缝是由于构造压力变化形成的岩石破裂缝, 分为张裂缝和剪裂缝, 张裂缝一般不切穿颗粒, 而是绕过颗粒延伸(图 6i), 在研究区张裂缝较为发育, 剪裂缝为

一组有特定延伸方向的切穿颗粒的裂缝。

### 3 储层成岩作用特征

#### 3.1 成岩作用类型

笔者通过 109 张薄片观察、扫描电镜及阴极发光分析, 发现研究区储层的成岩作用主要包括以下 5 种:压实作用、胶结作用、交代作用、溶蚀作用及灰泥重结晶作用。重力流储层有其自身的特殊性, 很多重力流砂岩与泥页岩广泛直接接触, 致使在成岩演化的过程中不可避免地出现泥页岩与砂岩成岩流体的交换, 这种砂岩和泥岩的协同成岩作用成为研究区重力流储层成岩作用的突出特点。

**3.1.1 压实作用** 研究区储层压实作用强烈, 是成岩作用早期致使储层质量变差的重要原因。研究区的重力流储层岩屑、杂基含量高, 抗压实能力弱, 致使研究区的储层表现为强压实。压实作用在研究区主要表现为以下几种形式:

(1) 塑性颗粒的变形。主要是云母、泥质岩屑等

表 4 研究区深水重力流致密储层碳酸盐胶结物含量

Table 4 Statistics of carbonate cements of deep-water gravity flow tight reservoir in study area

层位	方解石(%)	铁方解石(%)	白云石(%)	铁白云石(%)	菱铁矿(%)	碳酸盐胶结物总量(%)
长 6	0.921	1.721	0.665	0.964	0	4.27
长 7	1.116	1.811	0.741	0.867	0	4.43
平均值	1.018	1.766	0.703	0.865	0	4.40

被压弯曲(图 8a)、伸长或被硬碎屑嵌入,这种现象在研究区深水重力流砂岩中非常普遍,软组分在压实作用下变形强烈,甚至呈假杂基状,使原生孔隙大为减少(罗静兰等,2014;张创等,2014)。

(2)刚性颗粒被压裂。如石英、长石等刚性矿物,当其上覆压力超过颗粒所能承受的抗压强度时,颗粒沿其薄弱面破裂,长石一般沿解理面破裂或直接垂直于解理面破裂(图 8b),石英则易产生楔形裂隙。

(3)颗粒之间接触关系的变化。随着压实作用的增强,颗粒接触关系渐趋紧密,碎屑颗粒由彼此分离到相互靠近,发生碎屑颗粒的定向排列,出现由点接触到线接触再到凹凸接触的特征(图 8c)。

### 3.1.2 胶结作用

研究区胶结作用强,可发生在成岩作用的任何一个阶段,并且具有继承性,是使储层后期致密化的重要因素。重力流砂岩储层的胶结作用主要有以下几种:

(1)硅质胶结。在研究区重力流储层中硅质胶结物的含量不高(长 7 最高为 2%),主要表现为石英次生加大和孔隙中充填自生石英晶体两种形式。石英次生加大形成的温度为 65~130 °C(Rezaee *et al.*, 1997),同时需要一定的孔隙空间和硅质来源,其硅质主要来自于长石的溶蚀,在研究区可见石英的二级加大(图 8d)。在深水重力流储层中(埋深小于 1 500 m),特别是浊积岩中杂基含量较高,抑制了石英次生加大的生长空间,再加上早期压实作用使得储层孔隙度大大减少,不容易形成多期次生加大的条件,通过分析测试石英加大边中的流体包裹体均一温度多为 93~100 °C,判定研究区的石英次生加大多为 1 期,在油气充注之前、成岩作用的中期形成。此外也可见到孔隙中充填自生石英的现象(图 8e),充填的自生石英一方面减少了原生孔隙,另一方面也不利于次生孔隙的产生。

(2)碳酸盐胶结。碳酸盐胶结物是研究区重力流砂岩储层中含量较多的自生矿物,其总含量的平均值为 4.4%,约占储层胶结物总量的 43.5%,因此碳酸盐胶结物的研究对于分析重力流储层的成岩作用具有重要意义。研究区的碳酸盐胶结物主要呈颗粒间胶结物(图 8f)和交代物形式出现,主要可见方

表 5 研究区长 6、长 7 油层组中泥页岩黏土矿物相对含量

Table 5 Relative content of shale clay minerals of Chang 6, Chang 7 oil layers in study area

黏土矿物相对含量(%)					样品数
伊利石	绿泥石	高岭石	伊蒙混层	伊/蒙间层比(%·S)	(个)
38.5	6.5	5.1	49.9	20	30

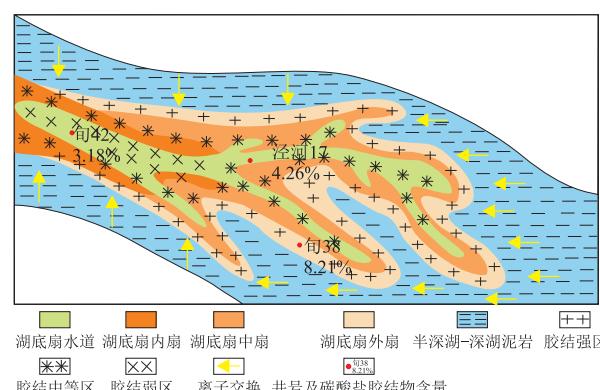


图 7 研究区深水重力流致密储层碳酸盐胶结强度模式

Fig.7 The carbonate cementation strength model of deep-water tight gravity flow reservoir in study area

解石、铁方解石、白云石、铁白云石胶结,其中铁方解石胶结最普遍(图 8g),占碳酸盐胶结物总含量的 37.9%(表 4)。

重力流沉积形成的砂体与湖相泥岩直接接触,因此湖相泥岩的热演化对重力流砂体的成岩作用有重要影响,很多研究表明,泥岩成岩作用中排出的孔隙水是砂岩储层中碳酸盐胶结物的重要物质来源(Glumac and Walker, 2002; Wolela, 2010),特别是黏土矿物中蒙脱石的伊利石化,是研究区碳酸盐胶结物中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的来源,其涉及的化学反应方程式如下(Longstaffe, 1981):  $4.5\text{K}^+ + 8\text{Al}^{3+} + \text{蒙脱石} \rightarrow \text{伊利石} + \text{Na}^+ + 2\text{Ca}^{2+} + 2.5\text{Fe}^{3+} + 2\text{Mg}^{2+} + 3\text{Si}^{4+}$ ,从表 5 中可以看出研究区泥页岩中伊蒙间层含量特别多,其在生烃热演化过程中产生的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  可以与  $\text{CO}_2$  相结合易形成碳酸盐胶结。此外,重力流砂岩中的白云岩岩屑,在有机酸的作用下,溶解、释放出碳酸根离子,泥页岩地层中的凝灰物质、暗色矿物(火成岩岩屑)

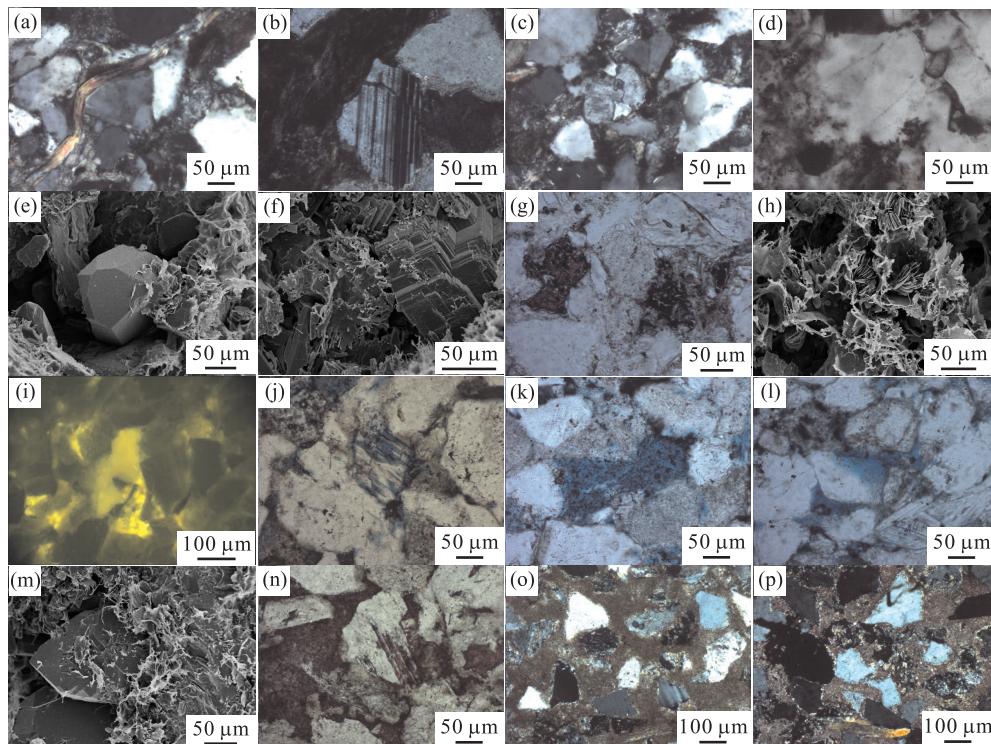


图 8 鄂尔多斯盆地南部延长组深水重力流致密储层典型成岩作用

Fig.8 Typical diagenesis of deep-water gravity flow tight reservoir of Yanchang Formation in southern Ordos basin

a. 白云母受到压实作用,被压弯变形,旬 52 井,1 159.6 m,长 7, $\times 50$ ,正交光;b. 长石垂直于解理被压裂,旬 41 井,1 106.4 m,长 7, $\times 50$ ,正交光;c. 颗粒之间凹凸接触,旬 52 井,1 157.6 m,长 7, $\times 50$ ,正交光;d. 石英次生加大,旬 40 井,1 071.4 m,长 7, $\times 50$ ,单偏光;e. 孔隙中充填自生石英,旬 41 井,1 060.3 m,长 7, $\times 2.5$  k,5.0 kV;f. 颗粒间的方解石胶结,旬 41 井,1 061.5 m,长 7, $\times 4.5$  k,5.0 kV;g. 铁方解石胶结,旬 40 井,1 061.4 m,长 6, $\times 50$ ,单偏光;h. 高岭石向伊利石转化,旬 40 井,864.6 m,长 6, $\times 3.0$  k,5.0 kV;i. 长石颗粒溶孔充填油质沥青,发较强的黄绿荧光,部分粒间孔隙充填油质沥青发橙黄—黄色荧光,强度中等,旬 37 井,1 073.8 m,长 7;j. 长石沿解理缝被溶蚀,旬 41 井,1 009.1 m,长 6, $\times 50$ ,单偏光;k. 碳酸盐胶结物溶蚀,旬 41 井,1 066.3 m,长 7, $\times 50$ ,单偏光;l. 石英颗粒边缘溶蚀,旬 42 井,853.5 m,长 6, $\times 50$ ,单偏光;m. 伊利石交代石英形成的边缘溶蚀孔及颗粒内部孔隙,旬 41 井,1 009.1 m,长 6, $\times 3.0$  k,5.0 kV;n. 铁方解石交代长石,旬 55 井,964.6 m,长 6, $\times 50$ ,单偏光;o. 碳酸盐灰泥重结晶作用,旬 55 井,964.5 m,长 6, $\times 50$ ,正交光;p. 碳酸盐灰泥重结晶作用,旬 55 井,964.7 m,长 6, $\times 50$ ,正交光

表 6 研究区深水重力流砂体黏土矿物相对含量

Table 6 Relative content of clay minerals of deep-water gravity flow sandstone in study area

层段	黏土矿物相对含量(%)					样品数 (个)
	伊利石	绿泥石	高岭石	伊蒙混层	伊/蒙间层比(%·S)	
长 6	36.14	18.28	21.28	24.30	20	15
长 7	39.83	16.83	15.36	27.98	20	17

因有机酸的溶解可提供部分铁离子,它们也为铁方解石的形成奠定了物质基础(付金华等,2013),同时晚期形成的铁方解石具有较强的耐腐蚀性,不易形成次生孔隙(陈朝兵等,2013)。

通过数据统计发现,碳酸盐胶结物的含量与距离泥岩的远近有着密切关系,一般在外扇亚相中薄层浊积岩碳酸盐含量最高,扇中亚相中砂体的碳酸盐胶结物含量居中,而扇根亚相中砂体的碳酸盐含量相对较少(图 7)。在薄片及扫描电镜分析中,也很难看到早期的碳酸盐胶结物因流体性质的变化导致

碳酸盐胶结物较强溶蚀的现象,再加上后期沉淀形成的碳酸盐胶结物也很难被溶蚀,致使储层中含有较多的碳酸盐胶结物,这是使延长组重力流储层孔渗性降低的一个非常重要的原因。

(3) 黏土矿物胶结。通过 X 衍射及扫描电镜分析,笔者发现研究区的黏土矿物较为发育,主要有伊利石、伊/蒙混层、高岭石、绿泥石及它们的过渡类型,其中伊利石含量最高,其次是伊蒙混层(表 6)。研究区黏土矿物的形成主要有 2 种方式,一是由长石、岩屑及云母、火山物质等蚀变而来,在研究区长石和

岩屑的含量较高(表 1),它们在酸性水介质下很容易发生蚀变并生成黏土矿物;二是来自于自生黏土矿物之间的相互转化,一般在酸性条件下,高岭石稳定,随着 pH 值增大,若有钾离子的参与,高岭石会蚀变成伊利石(图 8h),若有铁镁离子的参与,则会转化成绿泥石(陈鑫等,2009a,2009b;祝海华等,2015).黏土矿物的存在一方面极大的减少了储层孔隙空间,降低了储层的孔渗性,另一方面对喉道产生极大的影响,使喉道变得迂回曲折,甚至堵塞喉道,使渗透率大大降低.

**3.1.3 溶蚀作用** 溶蚀作用在研究区主要表现为酸性溶蚀和碱性溶蚀 2 种.酸性溶蚀可见长石溶蚀、碳酸盐胶结物溶蚀及碳酸盐岩屑溶蚀 3 种类型.长石的溶蚀方式主要表现为 2 种,一是颗粒内溶蚀,主要是沿长石内部解理缝和双晶面进行溶蚀;二是沿颗粒边缘溶蚀,在边缘形成溶蚀港湾状(图 8j).在研究区也可见到碳酸盐胶结物被部分溶蚀(图 8k),碳酸盐岩屑表现为粒内溶蚀.碱性溶蚀主要表现为石英颗粒边缘溶蚀(图 8l),此外还可以见到因伊利石交代石英形成的颗粒边缘溶蚀孔及颗粒内部溶蚀孔隙(图 8m),溶蚀程度较弱.总体来说,研究区以酸性溶蚀为主,并可见部分碱性溶蚀.

**3.1.4 交代作用** 交代作用是一种矿物代替另一种矿物的现象,其实质是体系内的化学平衡及平衡转移问题(朱筱敏,2008).研究区的交代作用较为复杂,主要包括碳酸盐之间的相互交代、碳酸盐矿物与颗粒及其他自生矿物之间的交代,也可见到黏土矿物对石英的交代(图 8m).在研究区常见到铁方解石交代长石现象(图 8n),铁方解石呈不规则的形状交代长石边缘,或者是铁方解石沿长石解理或双晶方向交代,这可能是由于长石的溶解度随温度的增加而增加,而铁方解石的溶解度却降低,或者是富含  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  的溶液能溶解长石晶格.

**3.1.5 灰泥重结晶作用** 研究区的灰泥重结晶作用主要发生在杂基含量比较高的细砂岩中,杂基以碳酸盐灰泥为主,储层物性本身较差.随着埋深及温度、压力的增加,碳酸盐灰泥杂基会发生重结晶作用(图 8o),因此也称为碳酸盐灰泥重结晶.灰泥重结晶需要两个条件,一是要达到一定的温度和压力条件,一般认为其重结晶开始的温度范围为 50~70 °C (Heydari *et al.*, 2002),二是需要外来碱性高钙流体参与(康玉柱,2007; Harting *et al.*, 2011).此外也可以看到铁方解石胶结同灰泥重结晶同时存在的现象(图 8p),其  $\text{Fe}^{2+}$  的来源与泥页岩成岩流体交换

有关,这种泥岩与砂岩的协同成岩作用是重力流储层的突出特点.发育灰泥重结晶的储层粒度很细,杂基含量特别高,一般在外扇的薄层浊积岩中可见,再加上后期的碳酸盐胶结不容易被溶蚀,会堵塞孔隙和喉道使得储层物性变差.

## 4 油气成藏时间及油气充注

通过对研究区 58 个烃类及盐水包裹体的均一温度测试分析(图 9),均一温度分布为 90~115 °C,

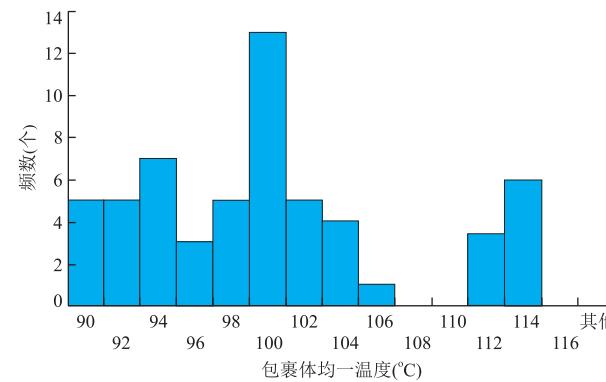


图 9 研究区流体包裹体均一温度分布直方图

Fig. 9 The uniform temperature distribution histogram of fluid inclusions in study area

并有两个明显的温度区间:第 1 期油气包裹体均一温度为 90~104 °C,其峰值均一温度为 100 °C,第 2 期油气包裹体均一温度为 112~114 °C,其峰值均一温度为 114 °C.两期均一温度分布连续,表明油气为连续充注;两个峰值,表示研究区烃类充注是一个由强到弱、再由弱到强的幕式充注过程.结合埋藏史演化分析(图 10),研究区第 1 期油气包裹体 90~104 °C,距今约 108~118 Ma,第 2 期油气包裹体 112~114 °C,距今约 99~103 Ma,代表了早白垩世晚期油气大规模聚集成藏的过程.两期均一温度峰值年龄间隔仅 9 Ma 左右,可以说明两期油气为连续充注,实则是一期两幕的成藏模式.

## 5 成岩演化序列及成岩流体演化

研究区成岩演化序列的确定是通过自生矿物及胶结物的交代、溶蚀充填关系,并结合流体包裹体均一温度及埋藏史综合确定的,同时根据伊/蒙间层中蒙脱石的含量、镜煤反射率、古地温梯度及碳酸盐胶结类型等参数,确定了延长组长 6—长 7 油层组经

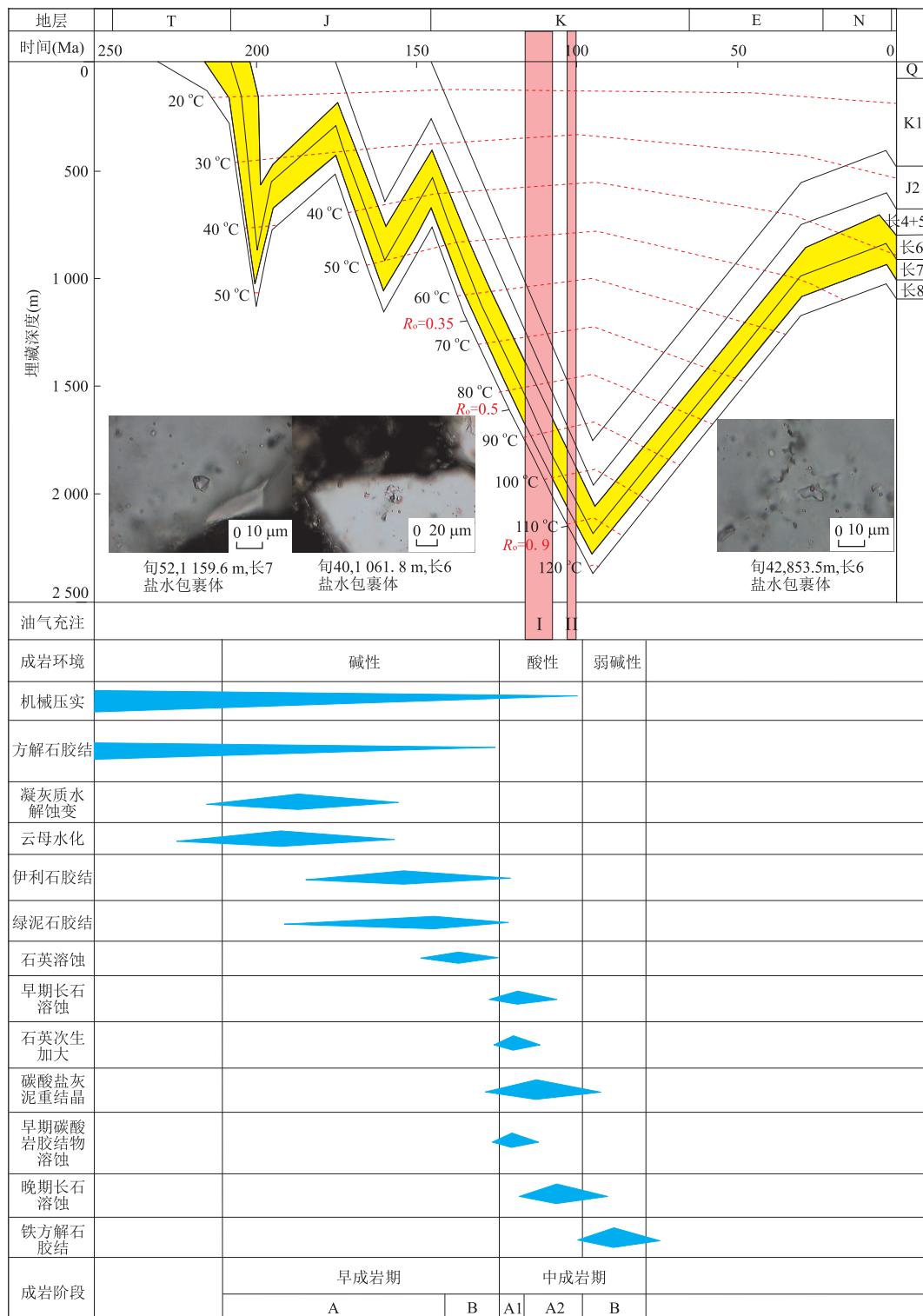


图 10 鄂尔多斯盆地南部延长组深水重力流致密储层成岩演化序列及成藏史

Fig.10 Reservoir diagenesis sequence and hydrocarbon accumulation history of deep-water gravity flow tight reservoir of Yanchang Formation in southern Ordos basin

历了早成岩期、中成岩 A1、A2 期，现今处于中成岩 B 期。

沉积物沉积以后，随着埋藏深度的增加，主要发生机械压实作用，泥岩受到压实作用影响较大，其中

的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  得到不断释放，并进入到砂岩储层中，在碱性成岩环境下，出现了早期方解石胶结（图 8f），随着温度、压力的不断增加，储层中的云母发生水化，火山凝灰物质在偏碱性的环境下容易发

生水解蚀变(王宏语等,2010),使得研究区成岩环境碱性增强,伊利石及绿泥石等自生黏土矿物开始沉淀、转化。此外,在研究区见到石英边缘少量溶蚀的现象(图 8l),其也对应于早期的碱性成岩环境。研究区长石溶蚀较为普遍,由长石的溶蚀孔隙被沥青充填(图 8i),说明较早期的酸性溶蚀发生的时间应早于早期的油气充注,长石在酸性环境下溶蚀的产物之一是  $\text{SiO}_2$ ,这就为石英的次生加大提供了物质基础,同时发生了石英次生加大现象(图 8o),此时也发生了早期碳酸盐胶结物的溶蚀。泥页岩在生烃热演化过程中排放大量的有机酸,有机酸随之进入储层,对长石进行溶蚀,这是酸性溶蚀的重要阶段,通过铁方解石交代充填长石溶蚀孔(图 8n),说明铁方解石胶结晚于长石溶蚀,也晚于油气充注。碳酸盐灰泥重结晶的细砂岩储层中灰泥杂基含量较高,原始物性差,在早期压实过程中孔隙水逐渐排出,但达不到所需的温度、压力条件,也没有外来碱性流体的参与,长石溶蚀可以为碳酸盐灰泥重结晶提供物质来源,因此碳酸盐灰泥重结晶应该晚于长石溶蚀。

综上所述,鄂尔多斯盆地南部延长组重力流砂岩储层经历的主要成岩作用演化序列为:机械压实作用/方解石胶结→凝灰物质水解蚀变/云母水化/伊利石胶结/绿泥石胶结/石英溶蚀→早期长石溶蚀/石英加大/碳酸盐灰泥重结晶/早期碳酸盐胶结物溶蚀→晚期长石溶蚀→铁方解石胶结(图 10)。

成岩环境的变化可以反映成岩作用的演化过程,亦可以通过成岩作用指示成岩环境的变化。研究区沉积物在埋藏过程中主要经历了碱性和酸性环境的交替变化过程(图 10),碱性环境的变化主要是通过成岩过程中孔隙水的碱性所影响的成岩反应来体现,而酸性环境的变化主要是通过烃源岩的热演化过程间接推断的(操应长等,2013,2015;马奔奔等,2014,2015;杨田等,2016)。

距今 135 Ma 之前,地温小于 65 °C,埋深约 1 200 m,处于早成岩 A 期(图 10),地层水主要呈碱性(丁晓琪等,2011)。成岩作用以机械压实为主,同时泥岩中的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  得到释放并进入砂岩储层中,形成早期方解石胶结,由于研究区重力流砂体粒度细,杂基含量高,在强烈压实作用下,孔隙度迅速降低,同时在温度、压力增加的同时,云母发生水化,凝灰物质开始水解蚀变,主要是水合阳离子  $\text{H}_3\text{O}^+$  与碱金属离子交换,释放  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  等金属阳离子(祝海华等,2015),孔隙流体 pH 值增加,碱性增强。

距今 135~123 Ma 时期,地温为 65~85 °C,镜质体反射率为 0.35%~0.50%,埋深约为 1 200~1 600 m,处于早成岩 B 期(图 10)。在这个时期,由于云母、凝灰物质持续蚀变,碱金属离子不断增加,孔隙流体呈碱性。成岩作用主要表现为伊利石、绿泥石等自生黏土矿物胶结、转化,高岭石会蚀变成伊利石(图 8h),若有铁镁离子的参与,则会转化成绿泥石,同时在高 pH 值的碱性成岩环境中出现石英边缘的少量溶蚀现象。

距今 123~95 Ma 时期,地温为 85~120 °C,镜质体反射率为 0.5%~1.2%,埋深约为 1 600~2 400 m,处于中成岩 A1-A2 期(图 10)。这个时期长 7 烃源岩进入有机质成熟阶段,产生大量的有机酸,成岩环境显酸性,同时发生两期连续油气充注。在早期油气充注前,处于中成岩 A1 阶段,主要发生的成岩作用有早期的长石溶蚀、石英次生加大及早期碳酸盐胶结物溶蚀,同时长石的溶蚀为碳酸盐灰泥重结晶提供物质来源,同时此阶段也达到了碳酸盐灰泥重结晶所需的温度条件,因此同时发生碳酸盐灰泥重结晶,在第 2 期油气充注前的中成岩 A2 阶段,主要的成岩作用有晚期长石溶蚀。

距今 95~80 Ma 时期,处于中成岩 B 期,地层由于构造活动的影响,逐渐开始抬升,长 7 烃源岩生烃阶段结束,有机酸减少,同时由于长石及火山岩屑等的溶蚀释放的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ,使孔隙水的酸性逐渐减弱,碱性增强。由黏土矿物转化、泥页岩孔隙演化等过程中排放出了大量  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ (孙致学等,2010),为晚期方解石的胶结提供物质基础,形成铁方解石胶结。

通过以上分析,研究区的成岩环境经历了碱性→酸性→弱碱性的转换过程,同时与前面所述的成岩演化序列也有较好的对应关系。

## 6 储层物性演化史

以铸体薄片为对象,结合储层埋藏史及成岩作用演化序列,利用图像分析技术厘定不同成岩事件造成的储层孔隙度变化(任大忠等,2016;杨田等,2016),笔者系统分析了储层物性演化史(图 11)。根据 Beard and Weyl(1973)总结提出的砂岩原始孔隙度的计算公式, $\Phi_1 = 20.91 + 20.90/S_0$ ( $\Phi_1$  为砂岩未固结的原始孔隙度(%); $S_0$  为 Trask 分选系数,即  $S_0 = (P_{25}/P_{75})^{1/2}$ , $P_{25}, P_{75}$  是累计曲线上 25% 和 75% 对应的颗粒直径),刚性颗粒砂岩的原始孔

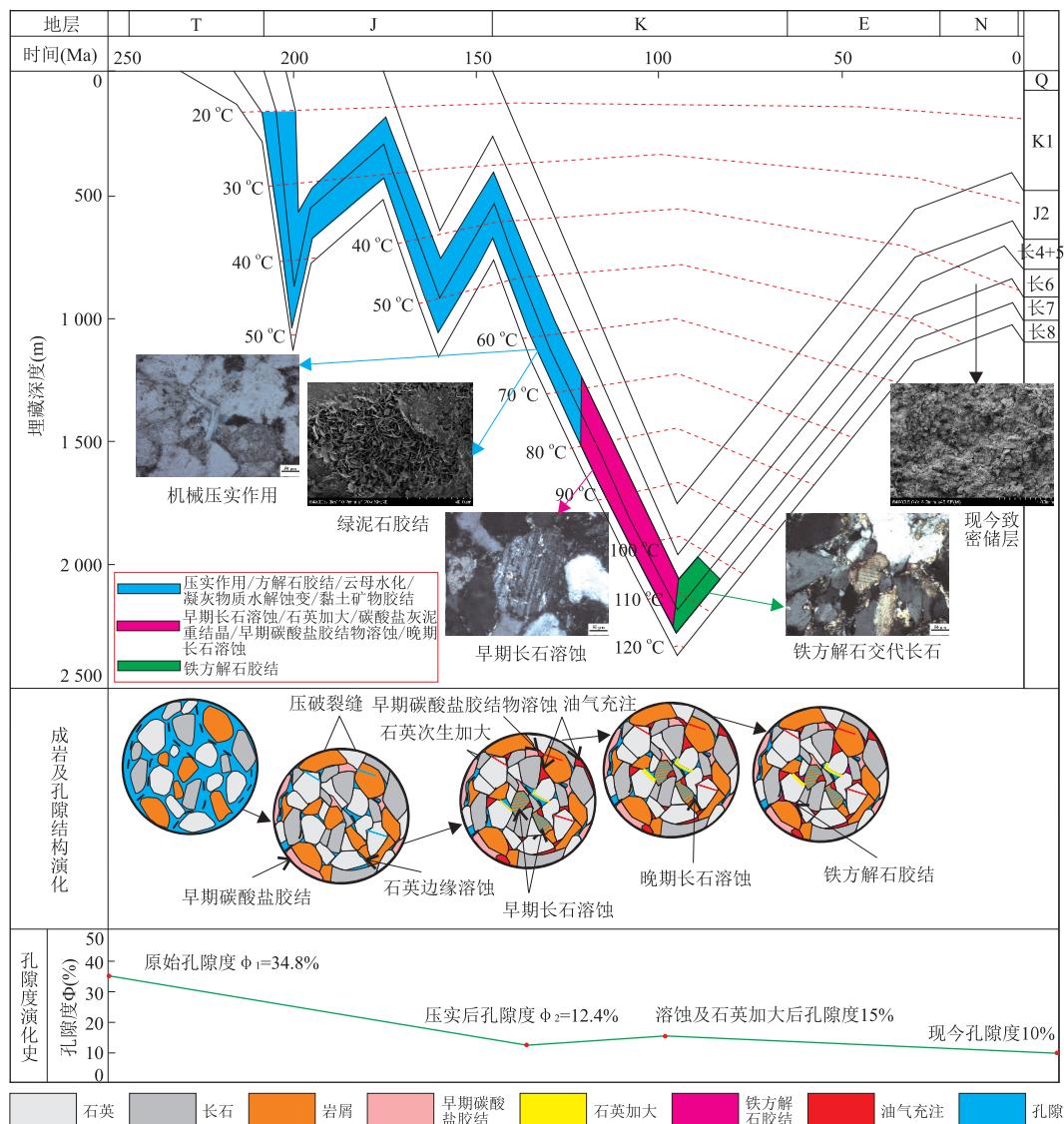


图 11 鄂尔多斯盆地南部延长组深水重力流致密储层地质历史时期储层物性演化

Fig.11 Reservoir properties evolution history of deep-water gravity flow tight reservoir of Yanchang Formation in southern Ordos basin

隙度取值为 34.8%，然后根据早期碳酸盐胶结、黏土矿物胶结物含量，粒间孔及石英溶蚀孔面孔率，结合物性分析孔隙度数据求得压实后剩余粒间孔隙度  $\Phi_2 = 12.4\%$ 。这一阶段主要对应的是早成岩阶段，该阶段储层物性变化较为复杂，一方面大量的黏土矿物发生胶结占据了原生粒间孔，同时黏土矿物晶间微孔的出现严重降低了储层的渗透率；另一方面，储层中大量的杂基在压实作用下，发生变形，占据原生孔隙，使得颗粒之间接触更加紧密，这都是使研究区储层变致密的重要原因。

压实作用之后，对应的是中成岩 A1-A2 期，发生了长石溶蚀及碳酸盐胶结物溶蚀，增孔量为 2%~6%，同时发生了石英次生加大，估计石英加大损失的孔隙度为 1%~2%，这时期的储层孔隙度低于

15%，同时在这个时期发生了油气充注。最后一个阶段是中成岩 B 期，这个时候发生了晚期碳酸盐胶结，主要是铁方解石胶结，损失孔隙度为 5% 左右，最终研究区储层的孔隙度基本上维持在 10% 以下。通过分析可知，基于储层岩石学特征，早成岩作用期发生的一系列物性变化，对储层致密化产生了重要影响，使研究区具有先致密后成藏的特征。

## 7 结论

(1) 鄂尔多斯盆地南部延长组长 6—长 7 油层组深水重力流砂岩粒度细，成分成熟度及结构成熟度低，储集空间主要是原生粒间孔、次生溶蚀孔、黏土矿物晶间孔及微裂缝，孔喉组合以细孔—微喉型

为主,连通性差,储层物性差,是一套典型的特低渗透储层。

(2)研究区储层的成岩作用主要包括压实作用、胶结作用、交代作用、溶蚀作用及灰泥重结晶作用,其中压实作用和胶结作用对储层致密化产生了重要影响。目前储层正处于中成岩 B 期,其经历的成岩演化序列为:机械压实作用/方解石胶结→凝灰物质水解蚀变/云母水化/伊利石胶结/绿泥石胶结/石英溶蚀→早期长石溶蚀/石英加大/碳酸盐灰泥重结晶/早期碳酸盐胶结物溶蚀→晚期长石溶蚀→铁方解石胶结,其经历的成岩环境转换为碱性→酸性→弱碱性,在距今约 99~118 Ma 的早白垩世,研究区发生了连续的两期油气充注。

(3)经过压实作用后的早成岩期储层的孔隙度由 34.8% 变为 12.4%,孔隙度损失 22.4%,经过中成岩 A1-A2 期溶蚀作用后储层的孔隙度为 15%,增孔率为 2.6%,在中成岩 B 期碳酸盐胶结作用后储层的孔隙度为 10%,孔隙度损失 5%,其中早成岩期储层的成岩作用对储层物性产生的影响最大,使储层已经致密化,而后发生了油气充注,研究区具有先致密后成藏的特性。

致谢:评审专家及编辑部老师提出了非常宝贵的意见,对论文的完善和进一步提高发挥了重要作用,在此表示衷心的感谢!

## References

- Beard,D.C.,Weyl,P.K.,1973.Influence of Texture on Porosity and Permeability of Unconsolidated Sand. *AAPG Bulletin*, 57 (2): 349—369. doi: 10.1306/819a4272—16c5—11d7—8645000102c1865d
- Cao,Y.C.,Cheng,X.,Wang,Y.Z.,et al.,2015.Diagenesis of Paleogene Glutinite Reservoir and Its Control on Physical Property in the North Zone of Chenzhen Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33 (6): 1192—1203 (in Chinese with English abstract).
- Cao,Y.C.,Ma,B.B.,Wang,Y.Z.,et al.,2013.Genetic Mechanisms and Classified Evaluation of Low Permeability Reservoirs of Es<sub>4</sub><sup>s</sup> in the North Zone of Bonan Sag. *Natural Gas Geoscience*, 24 (5): 865—875 (in Chinese with English abstract).
- Chen,Q.,H.,Li,W.H.,Gao,Y.X.,et al.,2007.The Significance of Hydrocarbon Accumulation and Deep Lacustrine Sediment of Yanchang Formation,Upper Triassic in Ordos Basin. *Science China Earth Sciences*, 37(Suppl. I):39—48 (in Chinese).
- Chen,X.,Yuan,J.,Zhong,J.H.,et al.,2009a.Clay Minerals in Clastic Rock Reservoir of Deep Formation in Paleogene of Dongying Sag. *Journal of China University of Petroleum*, 33(2):29—33 (in Chinese with English abstract).
- Chen,X.,Zhong,J.H.,Yuan,J.,et al.,2009b.Development and Formation of Paleogene Kaolinite, Bonan Subsag. *Petroleum Exploration and Development*, 36 (4): 456—462 (in Chinese with English abstract).
- Chen,Z.B.,Zhu,Y.S.,Chen,X.J.,et al.,2013.Sedimentation and Diagenesis of Chang 8<sup>2</sup> Reservoir in the Yanchang Formation in Jiyuan Region, Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 34 (5):685—692 (in Chinese with English abstract).
- Ding,X.Q.,Zhang,S.N.,Ge,P.L.,et al.,2011.Research on Diagenesis System of Yanchang Formation Reservoirs, Southeast Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(1):97—104 (in Chinese with English abstract).
- Fu,J.H.,Deng,X.Q.,Zhang,X.L.,et al.,2013.Relationship between Deepwater Sandstone and Tight Oil of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 15 (5): 625—634 (in Chinese with English abstract).
- Fu,S.T.,Deng,X.Q.,Pang,J.L.,2010.Characteristics and Mechanism of Thick Sandbody of Yanchang Formation at the Centre of Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28 (6):1081—1087 (in Chinese with English abstract).
- Glumac,B.,Walker,K.R.,2002.Effects of Grand-Cycle Ces-sation on the Diagenesis of Upper Cambrian Carbonate Deposits in the Southern Appalachians, U.S.A.. *Journal of Sedimentary Research*, 74(4):570—586.
- Harting,K.A.,Sorghani,G.S.,Goldstein,R.H.,et al.,2011.Dolomite in Permian Paleosols of the Bravo Dome CO<sub>2</sub> Field, U. S. A.: Permian Reflux Followed by Late Recrystallization at Elevated Temperature. *Journal of Sedimentary Research*, 81(3—4):248—265.
- Heydari,E.,Wade,W.J.,2002.Massive Recrystallization of Low-Mg Calcite at High Temperatures in Hydrocarbon Source Rocks: Implication for Organic Acids as Factors in Diagenesis. *AAPG Bulletin*, 86(7):1285—1303. doi: 10.1306/61EEDC7E—173E—11D7—8645000102C1865D
- Kang,Y.Z.,2007.Reservoir Rock Characteristics of Paleozoic Marine Facies Carbonate Rock in the Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(3):217—223 (in Chinese with English abstract).
- Liao,J.J.,Zhu,X.M.,Deng,X.Q.,et al.,2013.Sedimentary Characteristics and Model of Gravity Flow in Triassic Yanchang Formation of Longdong Area in Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 20 (2): 29—39 (in Chinese with English abstract).

- Longstaffe, F.J., 1981. Clays and the Resource Geologist. Mineralogical Association of Canada, Calagary, 1—109.
- Luo, J.L., Liu, X.S., Fu, X.Y., et al., 2014. Impact of Petrologic Components and Their Diagenetic Evolution on Tight Sandstone Reservoir Quality and Gas Yield: A Case Study from He 8 Gas-Bearing Reservoir of Upper Paleozoic in Northern Ordos Basin. *Earth Science*, 39 (5): 537—545 (in Chinese with English abstract).
- Ma, B.B., Cao, Y.C., Wang, Y.Z., 2014. Genetic Mechanisms and Classified Evaluation of Low Permeability Reservoirs of Es<sub>1</sub><sup>s</sup> in Yanjia Area, Dongying Depression. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 45 (12): 4277—4291 (in Chinese with English abstract).
- Ma, B.B., Cao, Y.C., Wang, Y.Z., et al., 2015. Diagenetic Evolution and Its Influence on Physical Properties of Es<sub>1</sub><sup>s</sup> Reservoir in the Northern Steep Zone of the Bonan Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33 (1): 170—180 (in Chinese with English abstract).
- Ren, D.Z., Sun, W., Huang, H., et al., 2016. Formation Mechanism of Chang 6 Tight Sandstone Reservoir in Jiyuan Oilfield, Ordos Basin. *Earth Science*, 41 (10): 1735—1744 (in Chinese with English abstract).
- Rezaee, M.R., Tingate, P.R., 1997. Origin of Quartz Cement in the Tirrawarra Sandstone, Southern Cooper Basin, South Australia. *Journal of Sedimentary Research*, 67 (1): 168—177. doi: 10.1306/D4268522-2B26-11D7-8648000102C1865D
- Sun, Z.X., Sun, Z.L., Lu, H.J., et al., 2010. Characteristics of Carbonate Cements in Sandstone Reservoirs: A Case from Yanchang Formation, Middle and Southern Ordos Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 37 (5): 543—551 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Y., Fan, T. L., Xiao, Y. Y., et al., 2010. Effect of Tuffaceous Components on Physical Property of Sandstone Reservoir. *Acta Petrolei Sinica*, 31 (3): 432—439 (in Chinese with English abstract).
- Wolela, A., 2010. Diagenetic Evolution of the Ansian Pliensbachian Adigrat Sandstone, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Science*, 56: 29—42. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2009.05.005
- Wu, F.L., Li, W.H., Li, Y.H., et al., 2004. Delta Sediments and Evolution of the Yanchang Formation of Upper Triassic in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 6 (3): 307—315 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Chen, H.D., Fu, J.H., 2012. Sedimentary Geology and Oil Pool Distribution Patterns of Late Triassic in the Ordos Basin. *Science Press*, Beijing, 265—318 (in Chinese).
- Yang, H., Niu, X.B., Luo, S.S., et al., 2015. Research of Simulated Experiment on Gravity Flow Deposits of Tight Sand Bodies of Chang 7 Formation in Longdong Area, Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 22 (3): 322—332 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R.C., He, Z.L., Qiu, G.Q., et al., 2014. Late Triassic Gravity Flow Depositional Systems in the Southern Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41 (6): 661—670 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Cao, Y.C., Wang, Y.Z., et al., 2016. Genesis of High-Quality Reservoirs of Fan Delta Front in Lower Part of the Fourth Member of Shahejie Formation in Bonan Subsag. *Earth Science*, 40 (12): 2067—2080 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C., Sun, W., Gao, H., et al., 2014. Reservoir Diagenetic Facies and Porosity Evolution Pathways of Chang 8 Formation in Huachi, Ordos Basin. *Earth Science*, 39 (4): 411—420 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.Z., Bai, Y.B., Cao, Q., et al., 2012. Quasi-Continuous Hydrocarbon Accumulation: A New Pattern for Large Tight Sand Oilfields in the Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 33 (6): 811—827 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X., He, S., Liu, P., et al., 2016. Characteristics and Classification of Tight Oil Pore Structure in Reservoir Chang 6 of Daijiaping Area, Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 23 (3): 253—265 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H.H., Zhong, D.K., Yao, J.L., et al., 2015. Alkaline Diagenesis and Its Effects on Reservoir Porosity: A Case Study of Upper Triassic Chang 7 Tight Sandstones in Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42 (1): 51—59 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.M., 2008. *Sedimentary Petrology*. Petroleum Industry Press, Beijing, 144—145 (in Chinese).
- Zhu, X.M., Deng, X.Q., Liu, Z.L., et al., 2013. Sedimentary Characteristics and Model of Shallow Braided Delta in Large-Scale Lacustrine: An Example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 20 (2): 19—28 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Zhao, Z.Z., Yang, H., et al., 2009. Genetic Mechanism and Distribution of Sandy Debris Flows in Terrestrial Lacustrine Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27 (6): 1065—1075 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 操应长, 程鑫, 王艳忠, 等, 2015. 车镇北带古近系砂砾岩储层成岩作用特征及其对物性的影响. *沉积学报*, 33 (6): 1192—1203.

- 操应长,马奔奔,王艳忠,等,2013.渤海洼陷北带沙四上亚段储层低渗透成因机制及分类评价.天然气地球科学,24(5): 865—875.
- 陈全红,李文厚,高永祥,等,2007.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组深湖沉积与油气聚集意义.中国科学:地球科学,37(增刊 I): 39—48.
- 陈鑫,袁静,钟建华,等,2009a.东营凹陷古近系深部碎屑岩储层中的黏土矿物.中国石油大学学报(自然科学版),33(2): 29—33.
- 陈鑫,钟建华,袁静,等,2009b.渤海洼陷古近系高岭石发育特征及转化机理.石油勘探与开发,36(4): 456—462.
- 陈朝兵,朱玉双,陈新晶,等,2013.鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长 82 储层沉积成岩作用.石油与天然气地质,34(5): 685—692.
- 丁晓琪,张峭楠,葛鹏莉,等,2011.鄂尔多斯盆地东南部延长组储层成岩体系研究.沉积学报,29(1): 97—104.
- 付金华,邓秀芹,张晓磊,等,2013.鄂尔多斯盆地三叠系延长组深水砂岩与致密油的关系.古地理学报,15(5): 625—634.
- 付锁堂,邓秀芹,庞锦莲,2010.晚三叠世鄂尔多斯盆地湖盆沉积中心厚层砂体特征及形成机制分析.沉积学报,28(6): 1081—1087.
- 康玉柱,2007.塔里木盆地古生代海相碳酸盐岩储集岩特征.石油实验地质,29(3): 217—223.
- 廖纪佳,朱筱敏,邓秀芹,等,2013.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组重力流沉积特征及其模式.地学前缘,20(2): 29—39.
- 罗静兰,刘新社,付晓燕,等,2014.岩石学组成及其成岩演化过程对致密砂岩储集质量与产能的影响:以鄂尔多斯盆地上古生界盒 8 天然气储层为例.地球科学,39(5): 537—545.
- 马奔奔,操应长,王艳忠,2014.东营凹陷盐家地区沙四上亚段储层低渗透成因机制及分类评价.中南大学学报(自然科学版),45(12): 4277—4291.
- 马奔奔,操应长,王艳忠,等,2015.渤海洼陷北部陡坡带沙四上亚段成岩演化及其对储层物性的影响.沉积学报,33(1): 170—180.
- 任大忠,孙卫,黄海,等,2016.鄂尔多斯盆地姬塬油田长 6 致密砂岩储层成因机理.地球科学,41(10): 1735—1744.
- 孙致学,孙治雷,鲁洪江,等,2010.砂岩储层中碳酸盐胶结物特征——以鄂尔多斯盆地中南部延长组为例.石油勘探与开发,37(5): 543—551.
- 王宏语,樊太亮,肖莹莹,等,2010.凝灰质成分对砂岩储集性能的影响.石油学报,31(3): 432—439.
- 武富礼,李文厚,李玉宏,等,2004.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组三角洲沉积及演化.古地理学报,6(3): 307—315.
- 杨华,陈洪德,付金华,2012.鄂尔多斯盆地晚三叠世沉积地层与油藏分布规律.北京:科学出版社,265—318.
- 杨华,牛小兵,罗顺社,等,2015.鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段致密砂体重力流沉积模拟实验研究.地学前缘,22(3): 322—332.
- 杨仁超,何治亮,邱桂强,等,2014.鄂尔多斯盆地南部晚三叠世重力流沉积体系.石油勘探与开发,41(6): 661—670.
- 杨田,操应长,王艳忠,等,2015.渤海洼陷沙四下亚段扇三角洲前缘优质储层成因.地球科学,40(12): 2067—2080.
- 张创,孙卫,高辉,等,2014.鄂尔多斯盆地华池长 8 储层成岩相与孔隙度演化.地球科学,39(4): 411—420.
- 赵清舟,白玉彬,曹青,等,2012.鄂尔多斯盆地准连续型低渗透一致密砂岩大油田成藏模式.石油与天然气地质,33(6): 811—827.
- 周翔,何生,刘萍,等,2016.鄂尔多斯盆地代家坪地区长 6 致密储层孔隙结构特征及分类评价.地学前缘,23(3): 253—265.
- 祝海华,钟大康,姚泾利,等,2015.碱性环境成岩作用及对储层孔隙的影响——以鄂尔多斯盆地长 7 段致密砂岩为例.石油勘探与开发,42(1): 51—59.
- 朱筱敏,2008.沉积岩石学.北京:石油工业出版社,144—145.
- 朱筱敏,邓秀芹,刘自亮,等,2013.大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式:以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例.地学前缘,20(2): 19—28.
- 邹才能,赵政璋,杨华,等,2009.陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征——以鄂尔多斯盆地为例.沉积学报,27(6): 1065—1075.