

# 鄂尔多斯盆地 LX 地区山西组储层成岩演化及成岩相研究

王存武<sup>1</sup> 马东旭<sup>2,3</sup> 田兵<sup>2</sup> 梁建设<sup>1</sup> 王琪<sup>2</sup> 刘铁树<sup>1</sup>

(1.中海油研究总院新能源研究中心 北京 100028;

2.甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室 兰州 730000;3.中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 利用鄂尔多斯盆地 LX 地区山西组铸体薄片、扫描电镜、阴极发光、地球化学资料等,通过统计、计算等方法,对该区山西组储层岩石学特征、成岩作用类型、成岩演化阶段及成岩演化过程进行研究,在此基础上建立研究区山西组成岩相类型及划分标准,并最终确定了该区山西组成岩相平面展布特征。研究表明:压实和胶结作用是研究区山西组储层砂岩致密化的主要原因;成岩阶段主体已经进入中成岩 B 期;其成岩演化过程为早成岩 A 期的压实及少量胶结阶段,早成岩 B 期的压实及少量溶蚀及胶结阶段,中成岩 A 期的大量溶蚀和胶结阶段以及中成岩 B 期的碳酸盐胶结阶段;成岩相类型分为 4 类:中等压实—弱胶结—溶蚀相,中等压实—中等胶结—溶蚀相,中等压实—强胶结相,强压实—杂基强充填相;有利成岩相在研究区分布面积较广,说明研究区具备了良好的勘探潜力,尤其是发育在研究区的中等压实—弱胶结—溶蚀相区域,可作为该区山西组下一步勘探开发的重点。

**关键词** LX 地区 山西组 成岩演化 成岩相

**第一作者简介** 王存武 男 1980 年出生 博士 非常规油气 E-mail: wangcw@cnooc.com.cn

**中图分类号** TE122.2 **文献标识码** A

## 0 引言

经过对鄂尔多斯盆地上古生界天然气勘探开发的成果总结,认为对于储层的认识是提高勘探开发率的关键因素之一<sup>[1]</sup>。目前,对于该盆地上古生界储层砂岩的控制因素主要集中在沉积和成岩作用的认识上<sup>[2-4]</sup>,前者通过原始沉积物质以及沉积相控制着储层砂体的原始组成和展布特征,而后者除了埋藏过程中的机械压实外,还会通过水—岩反应对储层进行改造,可以说,成岩作用决定了储层最终的储集性能。成岩相建立在成岩作用的基础之上,是表征储层特征及储层优劣的直接反应和综合表现<sup>[5]</sup>。然而目前对于成岩相的划分标准以及划分类型还未统一,不同学者在不同地区的不同地质背景下,建立了多种成岩相划分标准,且由于成岩作用类型丰富,导致了成岩相划分的类型也相对较多<sup>[6-15]</sup>,这就需要从研究对象的实际出发,建立适合该区特有的分类方案,以期达到最终的研究目的。

LX 地区位于鄂尔多斯盆地东北缘(图 1),前期主要以煤及煤层气勘探开发为主要方向<sup>[16-20]</sup>。近几

年来,随着勘探的深入,发现该区上古生界具有良好的天然气显示。但由于该区为勘探新区,勘探程度较低,对于储层的研究相对薄弱,制约了天然气勘探开发的效率。本次研究以 LX 地区山西组为主要研究对象,通过铸体薄片、阴极发光、扫描电镜以及地球化学资料等,对其岩石学特征、成岩作用类型、成岩演化过程、埋藏过程中孔隙定量演化进行研究,在此基础上结合测井特征建立适合该区山西组的成岩相划分标准及类型,确定成岩相平面展布特征,为下一步勘探开发提供理论依据。

## 1 区域地质概况

研究区上古生界自下而上发育有石炭系本溪组,二叠系太原组、山西组、石盒子组以及石千峰组。其中,作为煤系地层的山西组中发育有北盆沟砂岩等多套砂体,具有形成天然气藏的先决条件,且经过前期勘探发现具有良好的天然气显示,是该区重点产气层位之一。

鄂尔多斯盆地山西组沉积时期,正直沉积体系由海相、海陆过渡相向陆相转变<sup>[22]</sup>,且受到海西运动的

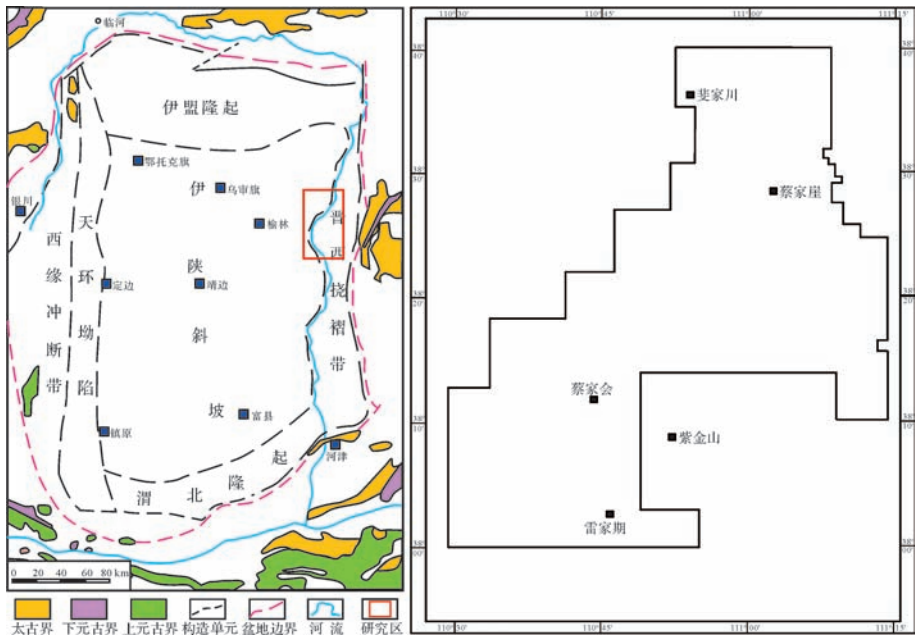


图1 研究区构造及地理位置图(盆地底图据杨仁超等<sup>[21]</sup>,有修改)

Fig.1 Map showing the tectonic and geographic location of the study area (basin base map after Yang et al.<sup>[21]</sup>)

影响,盆地周缘火山活动频发<sup>[23-24]</sup>。根据研究区露头、岩芯、测井等资料,并结合前人<sup>[25-26]</sup>对该区沉积环境的研究,认为该区山西组以发育三角洲平原亚相为主,分流河道作为主要的储集相带由北向南展布;物源主要来自盆地北部阴山山脉,岩屑类型以变质岩为主,石英含量较低<sup>[27-28]</sup>,且储层受到火山物质的影响较大<sup>[29-30]</sup>。储层砂岩整体物性较差,且横向上非均质性较强,为典型的岩性气藏,含气饱和度较高,平均值为72.69%。

## 2 储层基础特征

### 2.1 储层岩石学特征

根据研究区10口井共36块薄片镜下统计得出,山西组砂岩岩石类型以岩屑砂岩为主,岩屑质石英砂岩和长石质岩屑砂岩次之(图2)。骨架颗粒中石英平均含量为45.79%,岩屑次之,为25.87%,长石相对含量最低,仅为2.55%。岩屑组分中,以变质岩岩屑为主,平均含量为15.06%,火成岩岩屑次之,为5.21%,另含少量燧石及沉积岩岩屑,分别为3.04%和0.77%。变质岩岩屑中,以高级变质岩和片岩、千枚岩、泥板岩等副变质岩为主,另含少量变质沉积岩岩屑,高级变质岩含量为7.46%,副变质岩为6.10%,变质沉积岩岩屑仅为1.50%。

填隙物含量普遍较高,平均含量为25.79%,胶结

物以方解石、硅质、高岭石为主,分别占到4.71%、2.42%以及5.01%,另含少量菱铁矿、铁质及自生伊利石,平均含量分别为1.13%、1.37%和1.11%;杂基以水云母为主,平均含量为5.92%,另含1.71%的凝灰质填隙物,以及由凝灰质填隙物蚀变而来的绿泥石,平均含量为1.47%;此外,还存在少量白云石、绿泥石膜以及自生绿泥石等。碎屑颗粒粒径最大值为4.05 mm,最小粒径为0.11 mm,主要粒径介于0.36~0.56,平均为0.46 mm;磨圆以次圆一次棱为主,分选差—中等。从整体来看,山西组储层砂岩表现出富岩屑低长石、填隙物含量高、分选磨圆一般的特点。

### 2.2 储层物性及孔隙特征

根据20口井共347件样品孔隙度和渗透率值得出,研究区山西组储层物性呈现出明显的低孔低渗特征,平均孔隙度为5.45%,渗透率为 $0.24 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$ ;结合8口井共25组样品压汞数据可得,排驱压力平均值为0.93 MPa,中值半径为0.11  $\mu\text{m}$ ,分选系数为1.90,退汞效率为33.62%,表明具有较差的孔隙结构特征。孔隙类型以次生孔隙为主,原生粒间孔含量较低,颗粒间杂基溶孔相对含量为18.74%,颗粒溶孔为51.38%,高岭石晶间孔为10.26,裂缝为13.60%,原生粒间孔仅占6.02%(图3)。

## 3 成岩作用类型

成岩作用是影响储层储集性能的关键因素,成岩

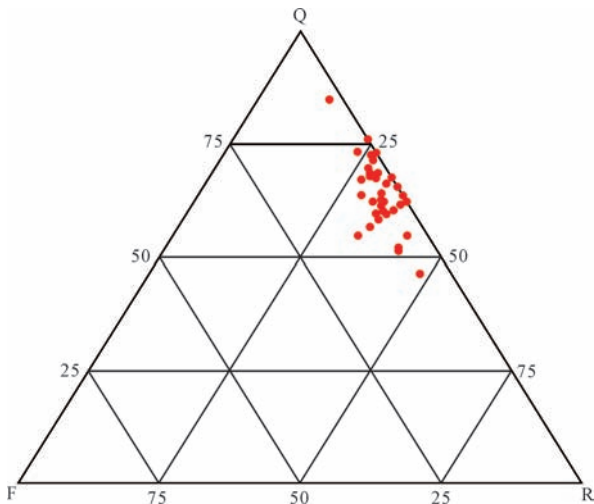


图2 研究区山西组储层砂岩类型三角图解

Fig.2 The triangular diagram of the sandstone types of Shanxi Formation in the study area

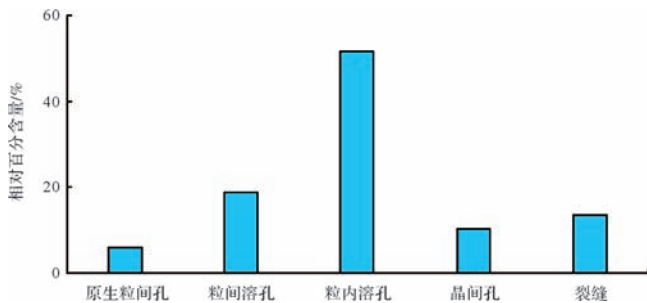


图3 研究区山西组储层砂岩孔隙类型相对含量

Fig.3 The relative contents of pore type of Shanxi Formation in the study area

作用的类型是研究成岩过程的基础。通过对研究区山西组铸体薄片的镜下观察,并结合扫描电镜、阴极发光等分析测试手段,认为研究区山西组成岩作用类型主要为压实、胶结、溶蚀作用。压实、胶结作用为主要的破坏性成岩作用,溶蚀作用为主要的建设性成岩作用。

### 3.1 压实作用

压实作用作为致密砂岩储层主要的破坏性成岩作用,是储层物性变差的主要影响因素之一。若储层中存在大量刚性颗粒,石英、长石等,则压实作用对原生孔隙的影响较小,可保留部分原生孔隙,反之,若砂岩中存在的塑性颗粒较多,如云母、千枚岩、泥板岩岩屑等,不利于原生孔隙的保存,以至于在成岩作用早期由于强烈压实变形而形成致密砂岩,使后期酸性流体无法正常进入,导致储层溶蚀作用不发育。研究区山西组储层砂岩这种塑性颗粒富集程度存在差异性,

根据大量镜下观察,塑性颗粒多集中在细砂岩中,其塑性岩屑(千枚岩、泥板岩、云母)平均含量高达13.33%,中砂岩为9.27%,粗砂岩为2.17%,这种差异性导致储层非均质性在压实作用下表现的更加明显,细砂岩中常见塑性颗粒压实变形较为强烈;加之同沉积凝灰质填隙物不受水流的分选影响,广泛存在于粒间孔隙中,导致原生粒间孔隙并不发育,使得储层压实作用更加强烈,成为主要的破坏性成岩作用(图4A,B)。

### 3.2 胶结作用

#### 3.2.1 硅质胶结作用

硅质胶结作为主要的胶结物之一,在研究区整个上古生界储层砂岩中广泛存在,硅质胶结物可以呈现出多种存在形式,主要有石英加大边以及颗粒间充填孔隙两种主要的形式出现。石英加大边主要分为I~III级,早成岩阶段主要以I级次生加大为主,存在形式以锥晶状为主要特征,II~III级为研究区上古生界主要的硅质胶结物发育形式,以形成较为完整的晶面为主,主要存在于中成岩阶段之后(图4C)。充填孔隙的石英主要分为自形和他形两种,自形石英常呈六方双锥晶体存在与颗粒之间的孔隙中(图4D),他形石英则以连晶状或嵌晶状充填孔隙(图4E),对孔隙破坏性更大。另外在颗粒之间还存在着隐晶质或微晶石英,是由成岩早期凝灰质蚀变而来<sup>[31-32]</sup>(图4F)。

#### 3.2.2 黏土矿物胶结作用

研究区山西组自生黏土矿物胶结物主要以高岭石为主,绿泥石、伊利石等次之。高岭石反映酸性成岩阶段以及相对较为封闭的环境,单晶为假六方板状,集合体呈书页状、蠕虫状、手风琴状以及扇状等(图4G),主要由火山物质以及长石的蚀变或溶蚀形成(图4H),原始的凝灰质填隙物往往在单偏光镜下为棕色或者淡黄色,正交偏光下常呈波状消光,凝灰质填隙物蚀变后原地生成的高岭石往往晶形较差,俗称为“脏高岭石”(图4I),异地沉淀或长石溶蚀和蚀变形成的长石往往晶形较好,会形成一定的晶间孔。自生沉淀形成的绿泥石、绿泥石包膜以及伊利石含量较低(图4J),以杂基形式存在的水云母含量较高(4K),根据大量镜下观察认为,由于其具有可溶、成岩收缩缝、石英晶屑以及凝灰质渐变的特点,认为其主要由凝灰质填隙物蚀变形成(图4L)。

#### 3.2.3 碳酸盐胶结作用

研究区山西组储层砂岩中碳酸盐胶结物包括菱

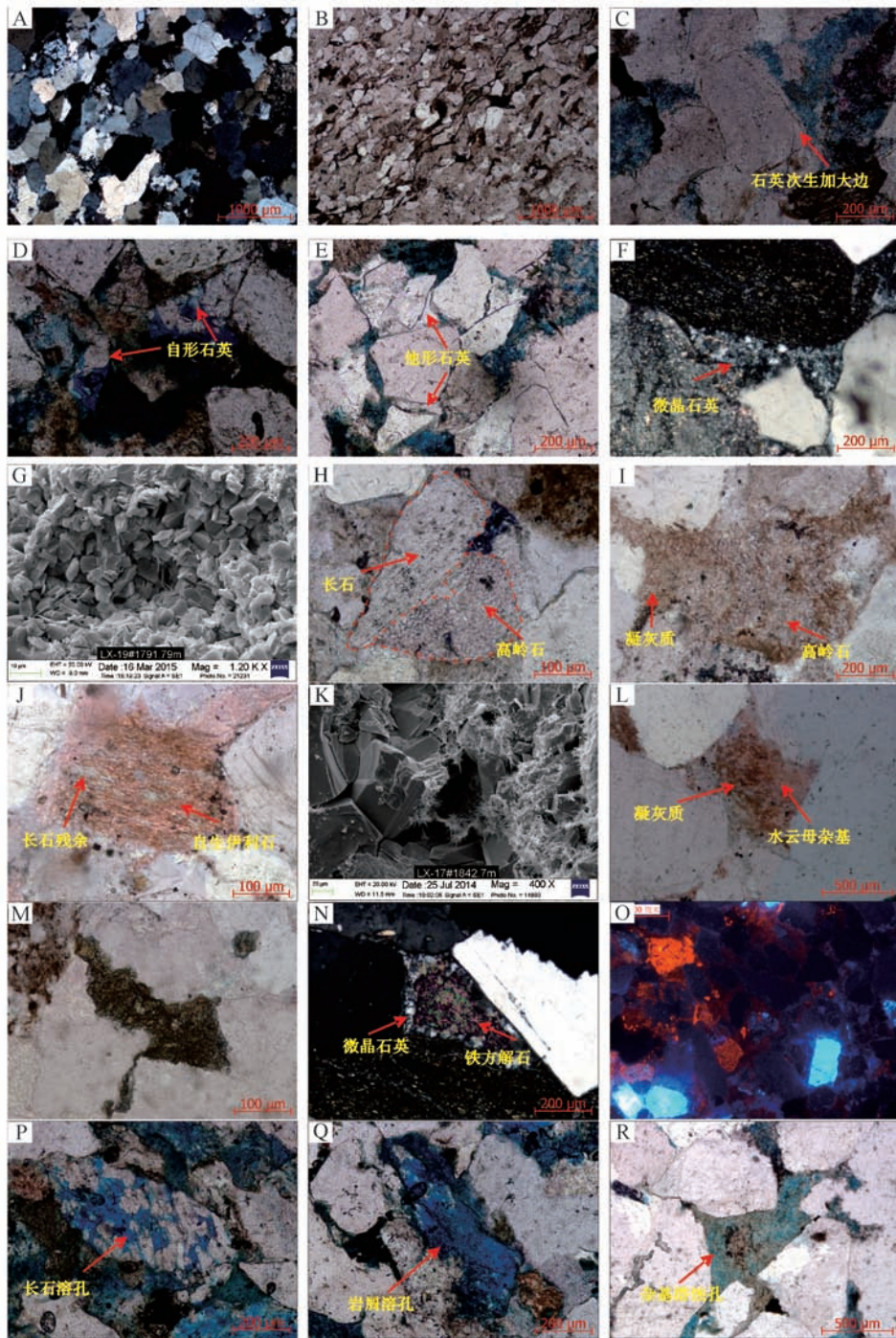


图4 研究区山西组储层特征照片

A.粗—中砂岩颗粒线—凹凸状接触(LX-8井,1 908 m,×25(+));B.细砂岩中大量塑性岩屑被压实呈定向性(LX-8井,1 891.68 m,×25(-));C.石英颗粒多级次生加大边(LX-8井,1 832.7 m,×100(-));D.充填在孔隙中的自形石英(LX-26井,1 824 m,×100(-));E.充填在孔隙中的他形石英(LX-26井,1 825.8 m,×100(-));F.凝灰质原地蚀变形成的微晶石英(LX-12井,1 791.21 m,×100(+));G.呈假六方板状的高岭石集合体(LX-19井,1 791.79 m,×1 200,SEM);H.长石蚀变后原地生成的高岭石(LX-7井,1 858.1 m,×200(-));I.凝灰质填隙物蚀变形成的“脏”高岭石(LX-7井,1 895.9 m,×100(-));J.自生伊利石交代长石颗粒(LX-12井,1 966 m,×200(-));K.丝片状伊利石和次生加大石英充填粒间孔隙(LX-17井,1 842.7 m,×400,SEM);L.水云母及凝灰质填隙物蚀变残余呈渐变关系(LX-20井,1 696.6 m,×50(-));M.成岩早期颗粒间沉淀形成的菱铁矿(LX-17井,1 819.5 m,×200(-));N.孔隙中存在成岩早期形成的石英微晶及晚期形成的铁方解石(LX-12井,1 791.21 m,×100(+));O.阴极发光下颜色较暗的铁方解石(LX-101井,1 597.8 m,阴极发光);P.长石溶蚀孔(LX-26井,1 824 m,×100(-));Q.岩屑溶孔(LX-26井,1 824 m,×100(-));R.凝灰质经过蚀变及溶蚀后形成的水云母杂基溶孔(LX-26井,1 916 m,×50(-))。

Fig.4 The characteristics of photograph of the Shanxi Formation in the study area

铁矿、铁方解石、铁白云石、白云石和少量方解石。从形成时期上可分为早期、中期和晚期,其成因各有不同。早期碳酸盐以泥晶形式存在,主要为方解石和白云石以及菱铁矿,主要形成于主要压实期之前,是颗粒间中的孔隙水沉淀形成的(图4M)。在中成岩早期,随着成岩环境介质条件的改变,泥晶和微晶碳酸盐将向粉晶和细晶碳酸盐转化,形成中期碳酸盐。在中成岩晚期,特别是在中成岩阶段B期,由于地层埋藏深度大,温度和压力增高,在高温缺氧的还原环境下,多形成含铁的晚期碳酸盐矿物。山西组储层砂岩中最常见的是晚期铁方解石,多呈连晶状充填在各类残留粒间孔、次生溶孔中,并交代石英颗粒,在胶结物内部常见交代石英残骸(图4N,O)。

### 3.3 溶蚀作用

溶蚀作用在研究区山西组储层砂岩中是一种建设性成岩作用,是形成次生孔隙的主要方式,根据pH值可以分为酸性溶蚀和碱性溶蚀,以酸性溶蚀为主,其主要发生在早成岩B期—中成岩A期,由于砂岩中存在的可溶性组分较多(主要为长石(图4P)、岩屑(图4Q)和杂基(图4R)),加之山西组为含煤地层,酸性流体产生后近距离进入砂体进行溶蚀,当反应后物质运移较为通畅时,可形成良好的储集空间,反之则会在附近沉淀形成大量的胶结物,如高岭石等。

## 4 成岩演化序列及孔隙度定量计算

### 4.1 成岩阶段及演化序列

成岩演化的过程具有阶段性,本次研究依据碎屑岩成岩阶段的划分标准<sup>[33]</sup>(SY/T 5477—2003)进行成岩阶段划分。根据数据统计,研究区山西组地层中镜质体反射率介于0.98%~1.42%,平均值为1.19%(5口井共17件),最高热解峰温度介于312℃~480℃,平均值为456.42℃(5口井共25件),说明山西组地层已经演化到了中成岩阶段;根据黏土矿物X衍射分析得出,I(伊利石)/S(蒙皂石)混层矿物处在有序混层带,S层在I/S混层中比例常在0~40%之间,平均值为13.57%(9口井共23件),为中成岩B期;另外,根据大量镜下观察认为,大部分石英颗粒普遍具有II~III级的次生加大边,碳酸盐胶结物含铁或铁方解石为主,部分凝灰质也在中成岩B期碱性环境中蚀变形成(胶状)绿泥石和胶状水云母等,其在单偏光下常呈绿色和橙色胶体状特征,正交偏光下往往呈现出波状消光特点。综上所述,研究区山西组储

层砂岩已经演化到了中成岩阶段,大部分已经达到了中成岩B期。

成岩演化序列可以通过观察自生矿物之间的叠置、穿插、充填以及交代关系来判断,根据大量镜下观察认为,LX地区山西组经历的成岩演化过程为:早成岩A阶段,I期机械压实→无铁泥晶方解石、白云石、菱铁矿沉淀、凝灰质填隙物蚀变(水云母)→I期石英(微晶、隐晶质),为早期压实、少量碳酸盐胶结以及大量水云母杂基形成阶段;早成岩B阶段,II期机械压实→I期有机酸流体进入→I期溶蚀→I期自生高岭石+II期自生石英,为早期压实及少量溶蚀及胶结阶段;中成岩A阶段,II期有机酸流体进入→II期溶蚀→II期自生高岭石+III期自生石英→水云母杂基、骨架颗粒等绢云母化→I期伊利石→含铁碳酸盐胶结,为大量溶蚀和胶结阶段;中成岩B阶段,IV期自生石英→II期伊利石→晚期亚铁碳酸盐胶结交代(图5),为碳酸盐胶结阶段。

### 4.2 成岩演化过程中孔隙度定量表征

本次计算以研究区山西组10口井34块铸体薄片以及7口井共35件粒度分析为基础,原始孔隙度根据Beard(1973)计算方法求得<sup>[34]</sup>,孔隙度定量演化则参考王瑞飞(2007)、楚美娟(2013)、盛军(2015)对于孔隙度的计算公式<sup>[35-37]</sup>,具体如下:

$$\Phi_0(\text{原始孔隙度}) = 20.91 + 22.9/S_0;$$

式中: $S_0$ 为特拉斯克分选系数, $S_0 = (P_{25}/P_{75})^{1/2}$ ;  $P_{25}$ 为粒度概率累积曲线上25%处颗粒直径的值;  $P_{75}$ 为粒度概率累积曲线上75%处颗粒直径的值。

$\Phi_1$ (压实残余孔隙度) = 胶结物+残余粒间孔面孔率×物性分析孔隙度/面孔率;

$\Phi_2$ (胶结残余孔隙度) = 残余粒间孔面孔率×物性分析孔隙度/面孔率;

$\Phi_3$ (溶蚀提供孔隙度) = 溶蚀孔面孔率×物性分析孔隙度/面孔率;

$\Phi_4$ (晶间孔提供孔隙度) = 晶间孔面孔率×物性分析孔隙度/面孔率;

$\Phi_5$ (裂缝提供孔隙度) = 裂缝面孔率×物性分析孔隙度/面孔率;

$$\text{压实强度} = (\Phi_0 - \Phi_1) / \Phi_0 \times 100\%;$$

$$\text{胶结强度} = (\Phi_1 - \Phi_2) / \Phi_0 \times 100\%;$$

$$\text{溶蚀强度} = \text{溶蚀面孔率} / \text{总面孔率} \times 100\%。$$

根据相应公式计算得出,研究区山西组原始孔隙度介于26.74%~34.37%,平均值为30.04%,压实减量介于2.80%~20.28%,平均值为13.80%,胶结减

成岩阶段		古地温 / $^{\circ}\text{C}$	$R_f/\%$	I/S 中 S 层 /%	成熟阶段	压实作用	颗粒接触类型	自生矿物组合							溶蚀作用		烃类侵位	成岩环境	孔隙类型
期	亚期							绿泥石	高岭石	伊利石	石英加大	菱铁矿	方解石	白云石	长石	碳酸盐			
早成岩	A	<65	<0.35	>70	未成熟	强	点			凝灰质蚀变								弱碱性	原生孔
	B	65-85	0.35-0.5	70-50	低成熟	较强	点											酸性	原生孔为主 少量溶蚀孔
中成岩	A1	85-110	0.5-0.8	50-35	低成熟-成熟	较弱	点-线											中性	原生孔减少 溶蚀孔增多
	A2	110-140	0.8-1.3	35-15	成熟	弱	线											弱碱性	少量原生孔 与溶蚀孔隙
	B	140-175	1.3-2.0	<15	高成熟	弱	线-凹凸											弱碱性	裂缝与少量溶蚀孔
晚成岩		>175	>2.0	消失	过成熟	较强	缝合线											弱碱性	裂缝发育

图5 研究区山西组成岩序列

Fig.5 The diagenesis sequence of the Shanxi Formation in the study area

孔量介于 9.50%~27.00%，平均值为 15.85%，溶蚀增孔量 1.19%~12.86%，平均值为 5.03%，晶间孔和裂缝提供孔隙度分别介于 0~2.66%和 0~3.19%，平均值为 0.81%以及 0.67%；压实作用减孔率介于 9.33%~67.51%，平均值为 45.95%，胶结作用减孔率介于 31.63%~89.88%，平均值为 52.75%，由于原生孔隙基本不发育，溶蚀面孔率在总面孔率中比重较高，溶蚀率介于 31.25~97.22%，平均值为 70.12%。结合成岩演化史和埋藏史，认为在二叠世—中晚三叠世为准同

生—早成岩 B 阶段，成岩作用以压实为主，导致原始孔隙度降低至 16.24%；晚三叠世—中侏罗世为中成岩 A 阶段，成岩作用以溶蚀和胶结为主，大量酸性流体进入储层进行的溶蚀作用使孔隙度升至 21.27%，胶结作用（高岭石+硅质）使孔隙度降低至 8.78%，而高岭石晶间孔使得孔隙度升高至 9.59%；中侏罗世之后达到了中成岩 B 阶段，主要以亚铁碳酸盐胶结为主，孔隙度降低至 6.23%，在后期构造运动中经过裂缝改造使得最终孔隙度为 6.90%（图 6）。

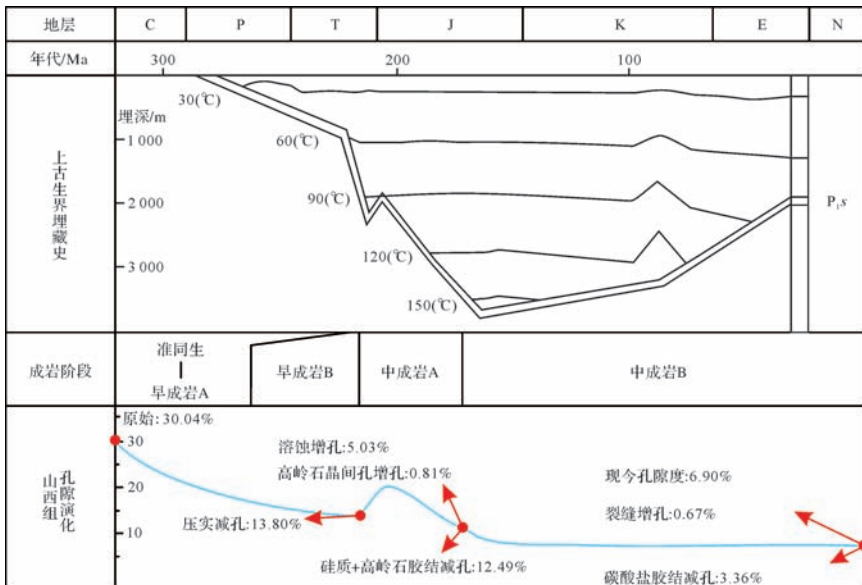


图6 研究区山西组地质历史时期储层孔隙度演化(埋藏史图引自郭本广等<sup>[38]</sup>,有修改)

Fig.6 Reservoir porosity evolution history of the Shanxi Formation in the study area (burial history after Guo et al.<sup>[38]</sup>)

## 5 成岩相划分标准及平面展布特征

目前,对于成岩相的划分不一,不同学者根据分类依据的不同产生了多种分类方案,因控制储层的成岩作用类型较多,会导致分类方案的复杂性,且取芯井段具有局限性,无法从整体上把握成岩相在纵向上或横向上的规律性。因此,应首先根据简单性原则建立取芯井段成岩相类型及划分标准,然后结合测井特征建立测井成岩相(主要以自然伽马、电阻率、密度、声波时差以及中子孔隙度曲线为主),最后确定成岩相平面展布特征。

### 5.1 成岩相划分

根据研究区山西组储层砂岩薄片镜下观察中可以得出,从破坏性成岩作用来说,影响砂岩储集性能的最主要成岩作用为压实和胶结作用,建设性成岩作用主要为溶蚀作用。依据前人对于成岩强度的分级方案<sup>[39]</sup>,结合本区山西组成岩作用定量化计算结果,将该区山西组压实率、胶结率以及溶蚀率划分为强、中、弱三个等级(表1)。划分结果表明,该区山西组压实作用以中等为主,胶结及溶蚀作用则以中等—强为特征,因此,可将成岩相划分为4类:A.中等压实—弱胶结—溶蚀相,B.中等压实—中等胶结—溶蚀相,C.中等压实—强胶结相,D.强压实—杂基强充填相,其中前两类为建设性成岩相,后两类为破坏性成岩相。

表1 研究区山西组成岩作用强度分类方案

Table 1 The grade of main diagenesis intensity of Shanxi Formation in the study area

强度等级	压实率/%	胶结率/%	溶蚀率/%
强	>65	>60	>80
中	65~35	60~40	80~40
弱	<35	<40	<40

#### (1) 中等压实—弱胶结—溶蚀相

该类成岩相为相对最好的建设性成岩相,岩性以

粗砂岩为主,经历了较强的溶蚀作用,溶蚀率一般>80%,且胶结作用较弱,硅质、碳酸盐等胶结物含量较低,胶结率一般<40%。物性相对较高,面孔率平均值为3.55%,孔隙度为10.8%,渗透率为 $0.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙类型以次生孔隙+高岭石晶间孔为主,其中颗粒溶蚀孔为主要的孔隙提供者。结合测井曲线特征认为,该成岩相具有低自然伽马、低电阻率、低密度,高声波时差,中等中子孔隙度的特征。前三者常小于60 API,  $50 \Omega \cdot \text{m}$ ,  $2.5 \text{ g/cm}^3$ ,声波时差一般大于75  $\mu\text{s/m}$ ,中子孔隙度则一般介于8%~12%(图7、表2)。

#### (2) 中等压实—中等胶结—溶蚀相

此类成岩相岩性以粗—中砂岩为主,溶蚀及胶结作用较强,胶结率一般介于40%~60%,溶蚀率一般大于40%,胶结物以硅质、高岭石、碳酸盐为主,物性相对较低,面孔率平均值为2.35%,孔隙度为6.7%,渗透率为 $0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙类型以次生孔隙+高岭石晶间孔为主。与A类成岩相相比,测井特征依然呈现出三低—高特点,但数值略有差异,自然伽马一般小于80 API,电阻率小于 $60 \Omega \cdot \text{m}$ ,密度小于 $2.5 \text{ g/cm}^3$ ,声波时差一般大于60  $\mu\text{s/m}$ ,中子孔隙度则一般介于8%~12%(图8、表2)。

#### (3) 中等压实—强胶结相

该成岩相岩性以粗—中砂岩为主,溶蚀作用较弱,胶结作用相对最强,溶蚀率一般小于40%,胶结率一般大于80%,胶结物主要以方解石为主,以连晶方式胶结颗粒,常呈现出基底式胶结特征,物性较差,面孔率平均值为0.16%,孔隙度为3.8%,渗透率为 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙类型以少量的杂基溶孔、粒内溶孔为主。测井曲线中电阻率具有典型的“钙尖峰”特点,电阻率值常大于 $60 \Omega \cdot \text{m}$ ,自然伽马一般小于80 API,声波时差一般小于65  $\mu\text{s/m}$ ,中子孔隙度和密度较高,常大于12%和 $2.6 \text{ g/cm}^3$ (图9、表2)。

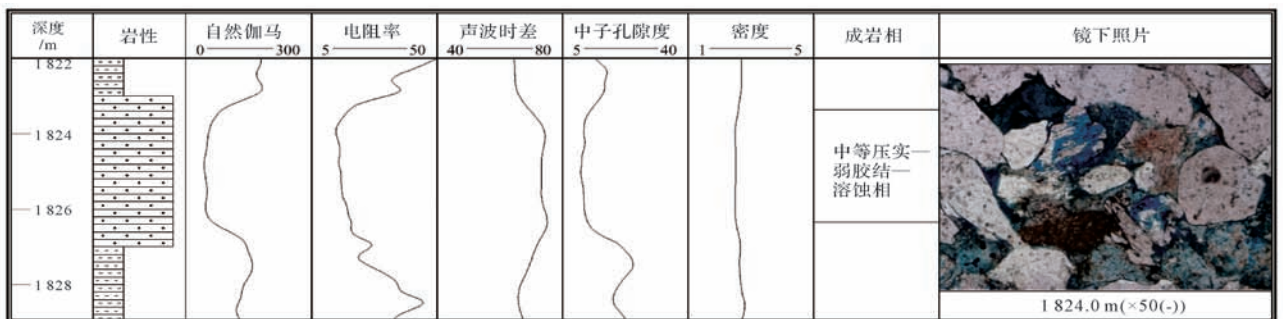


图7 中等压实—弱胶结—溶蚀相(LX-26井)

Fig.7 Moderate compaction-weak cementation-dissolution facies(Well LX-26)

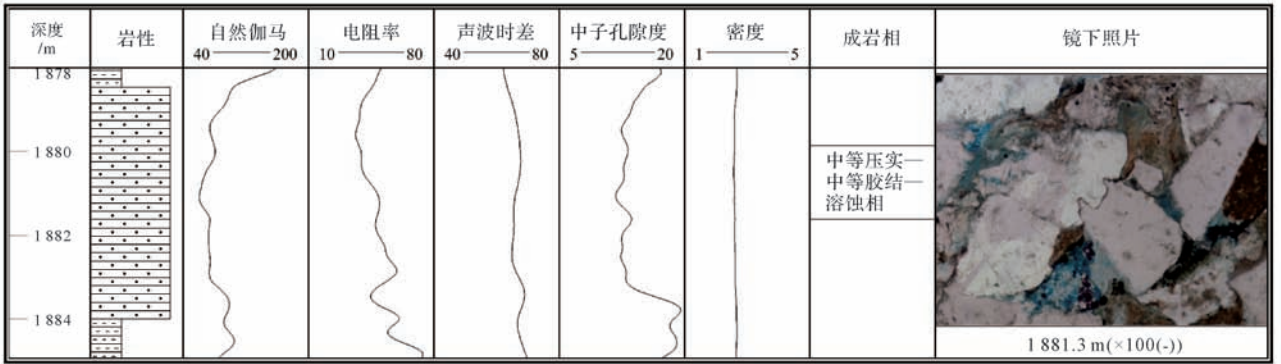


图8 中等压实—中等胶结—溶蚀相(LX-21井)

Fig.8 Moderate compaction-moderate cementation-dissolution facies(Well LX-21)

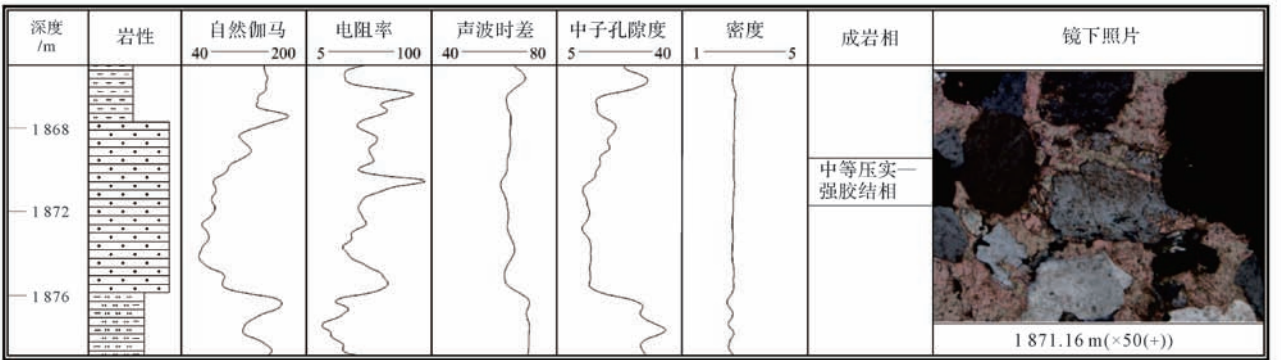


图9 中等压实—强胶结相(LX-16井)

Fig.9 Moderate compaction-strong cementation facies(Well LX-16)

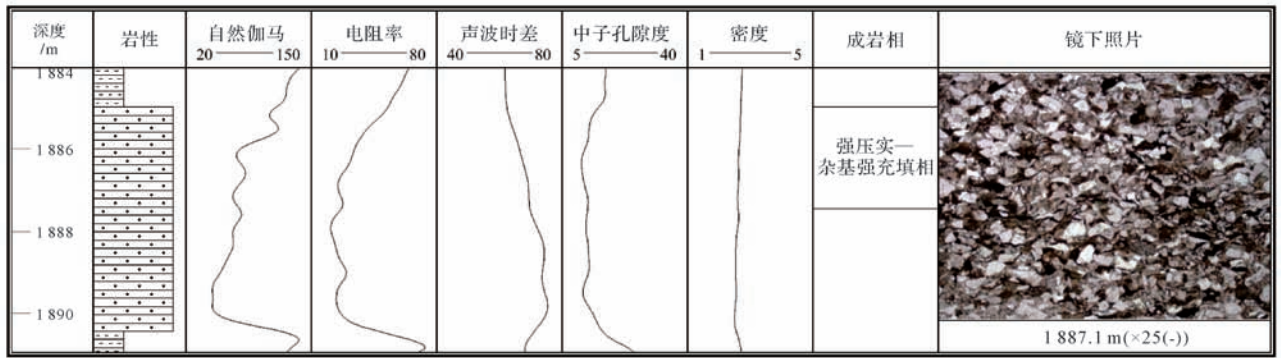


图10 强压实—杂基强充填相(LX-12井)

Fig.10 Strong compaction-matrix strong filling facies(Well LX-12)

(4) 强压实—杂基强充填相

此成岩相主要发育在中—细砂岩中,溶蚀作用较弱,压实作用相对最强,溶蚀率一般小于40%,压实率一般大于65%,胶结物含量较低,填隙物类型以水云母杂基或凝灰质填隙物为主,物性较差,面孔率平均值为0.19%,孔隙度为5.1%,渗透率为 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙类型以少量溶蚀孔为主。测井曲线呈现出三高两低特征,自然伽马、中子孔隙度、密度较高,常

分别大于80 API、10%、 $2.7 \text{ g/cm}^3$ ,声波时差和电阻率较低,常分别小于 $60 \mu\text{s/m}$ 和 $60 \Omega \cdot \text{m}$ (图10、表2)。

5.2 成岩相平面展布特征

在成岩相划分标准的基础之上,将研究区27口井山西组成岩相进行识别,并确定了该区成岩相平面展布特征。由于山西组地层厚度较大,厚度介于90~150 m,单层砂体较多,所反映的成岩相类型也不统一,而平面展布特征只能从二维角度反映有利储层的



表2 研究区山西组成岩相特征参数

Table 2 The diagenetic facies' characteristic parameters of the Shanxi Formation in the study area

成岩相 类型	岩性	岩性划分标准						测井划分标准				
		压实率 /%	胶结率 /%	溶蚀率 /%	面孔率平均值 /%	孔隙度平均值 /%	渗透率平均值 / $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	自然伽马 /API	电阻率 / $(\Omega\cdot\text{m})$	声波时差 / $(\mu\text{s}/\text{m})$	中子孔隙度 /%	密度 / $(\text{g}/\text{cm}^3)$
A	粗	35~65	<40	>80	3.55	10.8	0.59	<60	<50	>75	8~12	<2.5
B	粗—中	35~65	40~80	>40	2.35	6.7	0.32	<80	<60	>60	8~12	<2.7
C	粗—中	35~65	>80	<40	0.16	3.8	0.12	<80	>60	<65	>12	>2.6
D	中—细	>65	<40	<40	0.19	5.1	0.23	>80	<60	<60	>10	>2.7

分布情况,因此,在研究过程中主要依据了优势相原则,对于每口井砂体厚度较大的部位进行重点研究,并筛选出主要发育的成岩相类型,以此为原则进行平面展布研究(图11)。从研究区山西组成岩相平面展布图中可以看出,中等压实—弱胶结—溶蚀相分布范围较小,零星分布在研究区内,中等压实—中等胶结—溶蚀相分布范围相对最广,呈南北向分布在研究区大部分范围内,中等压实—强胶结相则主要分布在研究区南部范围中,强压实—杂基强充填相分布面积也相对局限,说明该区山西组有利成岩相较为发育,具备良好的勘探潜力,尤其是发育在研究区的中等压实—弱胶结—溶蚀相区域,可作为该区山西组下一步勘探开发的重点。

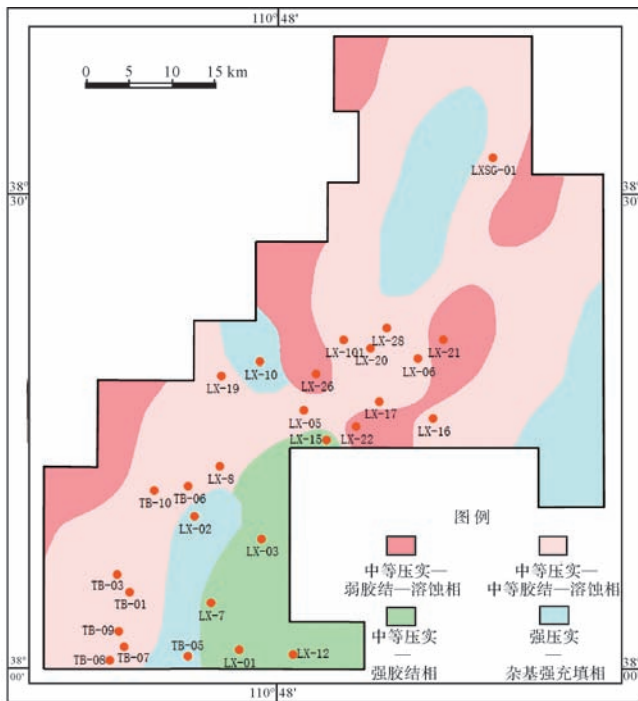


图11 研究区山西组成岩相平面展布图

Fig.11 The diagenetic facies' distribution of Shanxi Formation in the study area

## 6 结论

(1) 压实作用和胶结作用是导致研究区山西组储层砂岩变差的主要原因,溶蚀作用形成了大量的次生孔隙,提高了储层储集性能。该区山西组储层成岩阶段已经进入到中成岩阶段,且大部分已经达到了中成岩B期,其成岩演化过程为早成岩A期的压实及少量碳酸盐胶结阶段,早成岩B期的早期压实及少量溶蚀及胶结阶段,中成岩A期的大量溶蚀和胶结阶段以及中成岩B期的碳酸盐胶结阶段。

(2) 结合岩石学和测井特征将研究区山西组成岩相划分为4类:中等压实—弱胶结—溶蚀相,中等压实—中等胶结—溶蚀相,中等压实—强胶结相,强压实—杂基强充填相。

(3) 研究区山西组有利成岩相分布面积较广,具备一定的勘探潜力,尤其是发育在研究区的中等压实—弱胶结—溶蚀相区域,可作为该区山西组下一步勘探开发的重点。

## 参考文献 (References)

- 杨华,刘新社,孟培龙. 苏里格地区天然气勘探新进展[J]. 天然气工业,2011,31(2):1-8. [Yang Hua, Liu Xinshe, Meng Peilong. New development in natural gas exploration of the Sulige gas fields[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(2): 1-8.]
- 杨仁超,王秀平,樊爱萍,等. 苏里格气田东二区砂岩成岩作用与致密储层成因[J]. 沉积学报,2012,30(1):111-119. [Yang Renchao, Wang Xiuping, Fan Aiping, et al. Diagenesis of sandstone and genesis of compact reservoirs in the east II part of Sulige gas field, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(1): 111-119.]
- 陈大友,朱玉双,夏勇,等. 鄂尔多斯盆地高桥地区盒8段砂岩储层致密成因[J]. 沉积学报,2015,33(6):1217-1223. [Chen Dayou, Zhu Yushuang, Xia Yong, et al. Origin mechanism reservoir in of tightness from the He 8 section sandstone Gaoqiao area of Ordos Basin, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(6): 1217-1223.]
- 王峰,田景春,陈蓉,等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界盒8储层特征及控制因素分析[J]. 沉积学报,2009,27(2):238-245. [Wang Feng, Tian Jingchun, Chen Rong, et al. Analysis on controlling factors

- and characteristics of sandstone reservoir of He 8 (Upper Paleozoic) in the northern Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(2): 238-245.]
- 5 高辉,王雅楠,樊志强,等. 鄂尔多斯盆地神木气田山 2 段砂岩成岩相定量划分及其特征差异[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(6): 1057-1067. [Gao Hui, Wang Ya'nan, Fan Zhiqiang, et al. Quantitative classification and characteristics difference of diagenetic facies in Shan 2 sandstone of Shenmu gasfield, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(6): 1057-1067.]
  - 6 Aleta D G A, Tomita K, Kawano M. Mineralogical descriptions of the bentonite in Balamban, Cebu Province, Philippines[J]. *Clay Science*, 2000, 11(3): 299-316.
  - 7 Ochoa R I. Porosity characterization and diagenetic facies analysis of the Cambrian mount Simon sandstone: implications for a regional CO<sub>2</sub> sequestration reservoir[D]. West Lafayette, USA: Purdue University, 2010.
  - 8 Zeng Hongliu, Zhu Xiaomin, Zhu Rukai, et al. Seismic prediction of sandstone diagenetic facies: applied to Cretaceous Qingshankou Formation in Qijia depression, Songliao Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 287-295.
  - 9 王秀平,牟传龙,贡云云,等. 苏里格气田 Z30 区块下石盒子组 8 段储层成岩演化与成岩相[J]. *石油学报*, 2013, 34(5): 883-895. [Wang Xiuping, Mou Chuanlong, Gong Yunyun, et al. Diagenetic evolution and facies of reservoirs in Member 8 of Permian Xiashihezi Formation in the Z30 block of Sulige gasfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(5): 883-895.]
  - 10 林文姬,汤达祯,徐凤银,等. 苏里格气田盒 8 段成岩相类型及其测井标志[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(2): 271-273. [Lin Wenji, Tang Dazhen, Xu Fengyin, et al. Diagenesis facies type of H8 reservoir in Sulige gas field and its logging identification marker[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(2): 271-273.]
  - 11 宫雪,沈武显,李文厚,等. 苏里格气田苏 77 区块特低渗储层成岩相识别及分布规律研究[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 291-298. [Gong Xue, Shen Wuxian, Li Wenhou, et al. Diagenetic facies identification of ultra-low permeability reservoir and its distribution study of Su77 block of Sulige Gas Field[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3): 291-298.]
  - 12 张海涛,时卓,石玉江,等. 低渗透致密砂岩储层成岩相类型及测井识别方法——以鄂尔多斯盆地苏里格气田下石盒子组 8 段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(2): 256-264. [Zhang Haitao, Shi Zhuo, Shi Yujiang, et al. Diagenetic facies types and logging identification methods for low-permeability tight sandstone reservoirs: a case study on the member of 8<sup>th</sup> Xiashihezi Formation in Sulige gasfield, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(2): 256-264.]
  - 13 刘娥敏,李文厚,拜文华,等. 苏里格庙地区盒 8 段高渗储层成岩相研究[J]. *西北大学学报:自然科学版*, 2002, 32(6): 667-671. [Liu Rui'e, Li Wenhou, Bai Wenhua, et al. Diagenetic facies studies for the high-permeability reservoirs of He 8 section in Suligemiao area, Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2002, 32(6): 667-671.]
  - 14 许磊,于兴河,杨勇,等. 苏里格南部地区盒 8 段致密砂岩储层成岩作用及成岩相划分[J]. *天然气工业*, 2012, 32(7): 15-20. [Xu Lei, Yu Xinghe, Yang Yong, et al. Diagenesis and diagenetic facies of tight sandstone reservoirs in the 8<sup>th</sup> member of the Shihezi Formation, southern Sulige gas field[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(7): 15-20.]
  - 15 刘小洪,罗静兰,张三,等. 榆林-神木地区上古生界盒 8 段及山 2 段气层的成岩作用和成岩相[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(2): 200-208. [Liu Xiaohong, Luo Jinglan, Zhang San, et al. Diagenesis and diagenetic facies of gas reservoirs in the Upper Paleozoic 8<sup>th</sup> member of Shihezi Fm and 2<sup>nd</sup> member of Shanxi Fm in Yulin-Shenmu area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(2): 200-208.]
  - 16 刘新社,席胜利,周焕顺. 鄂尔多斯盆地东部上古生界煤层气储层特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2007, 35(1): 37-40. [Liu Xinshe, Xi Shengli, Zhou Huanshun. Features of Upper Paleozoic coalbed methane reservoir in eastern Ordos Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2007, 35(1): 37-40.]
  - 17 张松航,汤达祯,唐书恒,等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气储集与产出条件[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(10): 1297-1304. [Zhang Songhang, Tang Dazhen, Tang Shuheng, et al. Preservation and deliverability characteristics of coalbed methane in east margin of Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(10): 1297-1304.]
  - 18 接铭训. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发前景[J]. *天然气工业*, 2010, 30(6): 1-6. [Jie Mingxun. Prospects in coalbed methane gas exploration and production in the eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(6): 1-6.]
  - 19 李勇,汤达祯,许浩,等. 鄂尔多斯盆地东缘“翘板”支点影响下的含煤地层发育特征[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(2): 378-382. [Li Yong, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Characterization of coal bearing strata under influence of "seesaw" fulcrum in east margin of Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(02): 378-382.]
  - 20 李贵红,张泓. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气成因机制[J]. *中国科学:地球科学*, 2013, 43(8): 1359-1364. [Li Guihong, Zhang Hong. The origin mechanism of coalbed methane in the eastern edge of Ordos Basin[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(8): 1359-1364.]
  - 21 杨仁超,王言龙,樊爱萍,等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田 Z30 区块储层地质建模[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(6): 1148-1154. [Yang Renchao, Wang Yanlong, Fan Aiping, et al. Reservoir geological modeling of Z30 block in Sulige gas field, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(6): 1148-1154.]
  - 22 陈洪德,李洁,张成弓,等. 鄂尔多斯盆地山西组沉积环境讨论及其地质启示[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2213-2229. [Chen Hongde, Li Jie, Zhang Chenggong, et al. Discussion of sedimentary environment and its geological enlightenment of Shanxi Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2213-2229.]
  - 23 李贵东,温显端. 鄂尔多斯东缘中北部太原组火山灰层的特征[J]. *地学前缘*, 1999, 6(S): 22. [Li Guidong, Wen Xianduan. The characteristics of volcanic ash in the mid-northern area, eastern Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(S): 22.]

- 24 周安朝. 华北地块北缘晚古生代盆地演化及盆山耦合关系[D]. 西安:西北大学, 2000. [Zhou Anchao. The evolution of Late Paleozoic basins in northern margin of North China block and the coupling relationship between basin and range[D]. Xi'an: Northwestern University, 2000.]
- 25 解东宁, 陈玉良, 张文卿, 等. 鄂尔多斯盆地东部临县—兴县地区山西组煤成气勘探潜力分析[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(2): 149-155. [Xie Dongning, Chen Yuliang, Zhang Wenqing, et al. Coal-derived gas exploration potential analysis of Shanxi Formation in Linxian-Xingxian county of eastern Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(2): 149-155.]
- 26 谢英刚, 秦勇, 叶建平, 等. 临兴地区上古生界煤系致密砂岩气成藏条件分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 181-191. [Xie Yinggang, Qin Yong, Ye Jianping, et al. Accumulation conditions of tight gas in the Upper Paleozoic of Linxing Block[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 181-191.]
- 27 刘锐娥, 黄月明, 卫孝锋, 等. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代物源区分析及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2003, 23(3): 82-86. [Liu Rui'e, Huang Yueping, Wei Xiaofeng, et al. Analysis of provenance of Late Paleozoic in the northern Ordos Basin and its geological significance[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2003, 23(3): 82-86.]
- 28 罗静兰, 刘新社, 付晓燕, 等. 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[J]. 地球科学, 2014, 39(5): 537-545. [Luo Jinglan, Liu Xinshe, Fu Xiaoyan, et al. 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[J]. Earth Science, 2014, 39(5): 537-545.]
- 29 杨华, 杨奕华, 石小虎, 等. 鄂尔多斯盆地周缘晚古生代火山活动对盆内砂岩储层的影响[J]. 沉积学报, 2007, 25(4): 526-534. [Yang Hua, Yang Yihua, Shi Xiaohu, et al. Influence of the Late Paleozoic volcanic activity on the sandstone reservoir in the interior of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(4): 526-534.]
- 30 杨勇, 黄有根, 冯炎松, 等. 致密砂岩填隙物特征及其对储层的影响[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2015, 37(5): 1-8. [Yang Yong, Huang Yougen, Feng Yansong, et al. Characteristics of interstitial material in tight sandstone and its effects on reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2015, 37(5): 1-8.]
- 31 王秀平, 牟传龙. 苏里格气田东二区盒8段储层成岩作用与成岩相研究[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 678-689. [Wang Xiuping, Mou Chuanlong. Diagenesis and diagenetic facies of reservoir in He8 section of Shihezi Formation in east II part of Sulige gas field[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 678-689.]
- 32 陈世悦, 侯中帅, 张顺. 苏里格气田东区盒8段火山物质成岩作用特征[J]. 断块油气田, 2015, 22(2): 173-177. [Chen Shiyue, Hou Zhongshuai, Zhang Shun. Diagenesis characteristics of volcanic material in He 8 Member, east block of Sulige gas field[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(2): 173-177.]
- 33 国家经济贸易委员会. SY/T 5477—2003 中华人民共和国石油天然气行业标准-碎屑岩成岩阶段划分[S]. 北京: 石油工业出版社, 2003. [State Economic and Trade Commission of China. SY/T 5477-2003 The standard of oil and gas industry of China-the division of diagenetic stages in clastic rocks[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.]
- 34 Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(2): 349-369.
- 35 王瑞飞, 陈明强. 储层沉积—成岩过程中孔隙度参数演化的定量分析——以鄂尔多斯盆地沿25区块、庄40区块为例[J]. 地质学报, 2007, 81(10): 1432-1438. [Wang Ruifei, Chen Mingqiang. Quantitative analysis of porosity evolution during the reservoir sedimentation diagenesis-Taking the Yan 25 and Zhuang 40 areas in the Ordos Basin as examples[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(10): 1432-1438.]
- 36 楚美娟, 郭正权, 齐亚林, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长8储层定量成岩作用及成岩相分析[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3): 477-484. [Chu Meijuan, Guo Zhengquan, Qi Yalin, et al. Quantitative diagenesis and diagenetic facies analysis on Chang 8 reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3): 477-484.]
- 37 盛军, 孙卫, 解腾云, 等. 苏里格气田东南部盒8段储层成岩作用研究及其孔隙演化模式定量分析[J]. 地质科技情报, 2015, 34(1): 20-27. [Sheng Jun, Sun Wei, Xie Tengyun, et al. Diagenesis of He-8 reservoir and its quantitative analysis of porosity evolution model in southeast Sulige gas field[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(1): 20-27.]
- 38 郭本广, 许浩, 孟尚志, 等. 临兴地区非常规天然气合探共采地质条件分析[J]. 中国煤层气, 2012, 9(4): 3-6. [Guo Banguang, Xu Hao, Meng Shangzhi, et al. Geology condition analysis for unconventional gas co-exploration and concurrent production in Linxing area[J]. China Coalbed Methane, 2012, 9(4): 3-6.]
- 39 吴雪超, 汤军, 任来义, 等. 鄂尔多斯盆地延长天然气探区山西组山2段成岩相及优质储层研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(6): 1004-1010. [Wu Xuechao, Tang Jun, Ren Laiyi, et al. Diagenetic facies and high-quality reservoir study of Shanxi-2 member in Jingbian gas field, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(6): 1004-1010.]

## Diagenetic Evolution and Facies of Shanxi Formation in LX Area of Ordos Basin

WANG CunWu<sup>1</sup> MA DongXu<sup>2,3</sup> TIAN Bing<sup>2</sup> LIANG JianShe<sup>1</sup>  
WANG Qi<sup>2</sup> LIU TieShu<sup>1</sup>

(1. New Energy Research Center, CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China;

2. Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province/Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Analyzed on casting thin sections, SEM, cathode luminescence, geochemical data, etc and combined with the method of statistics and calculation, we studied the petrologic feature, diagenetic types, sequence, and quantitative evolution of Shanxi Formation in LX area. Based on these researches, we established the types and classification standard of diagenetic facies, and determined the diagenetic facies' distribution of Shanxi Formation in the studied area. The following conclusions were obtained. The compaction and cementation were the main reasons for the densification of Shanxi formation in the studied area. The diagenetic stage was B of middle diagenesis phase. And the diagenetic evolution as follows: Stage A of early diagenesis phase went through the compaction and little carbonate cementation, and stage B was compaction, little cementation and dissolution. Stage A of middle diagenesis phase was mainly experiencing the dissolution and cementation, and stage B was carbonate cementation. The main types of diagenetic facies were moderate compaction, weak cementation, dissolution facies, moderate compaction, moderate cementation, dissolution facies, moderate compaction, strong cementation facies, and strong compaction, matrix strong filling facies. The favorable diagenetic facies was widely distributed in the studied area, which showed that the study area had a good exploration potential. Especially, the moderate compaction, weak cementation, dissolution facies was key area in the next exploration and development of Shanxi Formation in the studied area.

**Key words:** LX area; Shanxi Formation; diagenetic evolution; diagenetic facies