

文章编号: 1000-0550(2017)01-0163-10

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.01.016

# 鄂尔多斯盆地临兴地区下石盒子组不同粒级砂岩成岩演化及孔隙定量研究

王琪<sup>1,2</sup>, 马东旭<sup>2,3</sup>, 余芳<sup>4</sup>, 吉鸿杰<sup>2,3</sup>, 苏旭亮<sup>5</sup>, 李小燕<sup>6</sup>, 郝乐伟<sup>2</sup>, 魏中衡<sup>7</sup>

1. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 西安 710018
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
4. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710018
5. 青岛地质工程勘察院, 山东青岛 266071
6. 中国科学院兰州文献情报中心, 兰州 730000
7. 正元地理信息有限责任公司山东分公司, 济南 250101

**摘要** 利用鄂尔多斯盆地临兴地区下石盒子组铸体薄片、扫描电镜、阴极发光、包裹体分析、地球化学等资料, 通过统计与计算等方法, 对研究区下石盒子组不同粒级砂岩的岩石学特征、成岩演化序列以及埋藏过程中孔隙的定量演化进行研究。结果表明: ①岩石学组成中, 粗砂岩刚性颗粒含量高, 塑性颗粒则多集中在细砂岩中; 粗砂岩中硅质胶结、碳酸盐胶结含量较高, 中、细砂岩以高岭石胶结为主。②成岩演化阶段中, 粗砂岩经历的成岩作用较为完全, 而细砂岩在早成岩 B 期就已经基本致密化, 中砂岩则为二者的过渡型。③二叠世—中晚三叠世为准同生—早成岩 B 阶段, 成岩作用以压实为主, 其对细砂岩孔隙度影响最大; 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, 粗砂岩溶蚀作用较强, 孔隙度较高, 细砂岩基本不发育溶蚀和胶结作用; 中侏罗世之后, 成岩阶段达到了中成岩 B, 以亚铁碳酸盐胶结为主, 粗砂岩受到胶结作用较强, 降低了一定孔隙度, 但物性依然较好, 粗、中、细砂岩最终孔隙度分别为 11.07%、6.08% 及 2.60%。综上所述, 粗砂岩由于压实作用较弱, 溶蚀作用较强, 可以形成良好的储集空间, 中砂岩主要受控于压实和胶结作用的双重影响, 形成次一级的储集空间, 而细砂岩以压实破坏为主, 物性相对最差。

**关键词** 鄂尔多斯; 下石盒子组; 不同粒级砂岩; 成岩演化; 孔隙定量

**第一作者简介** 王琪, 男, 1967 年出生, 博士, 研究员, 储层地质学及地球化学, E-mail: qiwang@lzb.ac.cn

**中图分类号** TE122.2 **文献标识码** A

## 0 引言

鄂尔多斯盆地上古生界天然气藏作为非常规气藏, 且经前人大量研究认为是典型的岩性气藏<sup>[1-3]</sup>, 因此对于该气藏储层的研究和认识尤为关键。成岩作用是控制储层的主要因素之一<sup>[4-6]</sup>, 其通过水—岩反应改造储层。目前多数学者对成岩作用的研究是把储层砂岩作为一个整体, 并在此基础上研究储层孔隙定量演化<sup>[7-10]</sup>。然而笔者认为砂体的粗细程度、物质组成等是制约储层成岩作用的重要影响因素, 不同岩性以及不同粒级砂岩经历的成岩作用程度以及孔隙演化是不同的。近年来, 有学者从不同岩性出发研究其成岩作用和孔隙演化的不同, 并取得了一定的认

识。罗静兰等<sup>[11]</sup>及李杪等<sup>[12]</sup>认为, 鄂尔多斯盆地不同源区控制下形成的石英砂岩与岩屑石英砂岩经历了复杂的多期成岩作用过程, 石英砂岩由于初始物质以及孔隙组成不同于岩屑砂岩, 因而具有较好的物性, 而高塑性岩屑砂岩则在早成岩阶段已经致密化; 刘占良等<sup>[13]</sup>则从苏里格气田东二区物源交汇处形成的长石石英砂岩和岩屑砂岩出发, 认为岩性及原始物质组分的差异导致了成岩反应、成岩序列和成岩产物的差异。然而前人针对的研究范围较大, 岩性较为复杂, 在基于物源较为单一控制下的小范围地区, 岩性基本一致, 成岩作用的不同则主要体现在不同粒级砂岩中, 因此在此种情况下将不同粒级砂岩分开来研究是更为精细和合理的。

**收稿日期:** 2016-03-18; **收修改稿日期:** 2016-05-07

**基金项目:** 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室开放课题(2016GSKJ05-01); 国家自然科学基金(41502142); 中国科学院油气资源研究重点实验室开放基金(KFJJ2013-02); 中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB3-12); 甘肃省重点实验室专项(1309RTSA041) [ **Foundation:** Open Research Project of National Engineering Laboratory, No.2016GSKJ05-01; Chinese National Natural Science Foundation, No. 41502142; Key Laboratory of Petroleum Resource Research Foundation, Chinese Academy of Sciences, No. KFJJ2013-02; Western Action Plan Project of CAS, No. KZCX2-XB3-12; Key Laboratory Project of Gansu Province, No. 1309RTSA041 ]

不同粒级砂岩的物质组成以及成岩演化将最终决定储层储集性能的不同,储集性能的不同又会影响勘探开发的效果,鄂尔多斯盆地临兴地区下石盒子组砂岩作为该区勘探开发的主力产气层,区块面积较小,物源指向及岩性相对单一,对于正确认识不同粒级砂岩的成岩过程研究有助于进一步对储层的了解。因此本文将结合各类分析测试手段,运用统计、计算等方法分析该区下石盒子组不同粒级砂岩的岩石学特征、成岩作用及成岩演化,并在此基础上结合埋藏史探讨不同时期各粒级砂岩孔隙演化特征。该研究对于深入了解研究区下石盒子组砂岩储层成岩过程以及寻找有利储集带具有重要意义,并为下一步勘探开发提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯盆地东北缘(图1),其晚古生代地层自下而上发育有本溪组、太原组、山西组、石盒子组以及石千峰组,其中太原组及山西组为主要的煤系地层,在烃源岩演化过程中释放大量的有机酸以及煤成气,经过短暂运移至下石盒子组,使其形成相对优质的天然气藏。结合野外露头、岩芯、分析测试数据以及结合前人研究成果认为,研究区下石盒子组主要发育曲流河沉积,河道及边滩砂体发育粒级较粗的

砂体,形成良好的储集空间,而河漫等沉积体则往往由于水动力相对较弱形成粒级较细的砂体。

## 2 储层岩石学特征

研究区下石盒子组砂岩类型以岩屑砂岩为主,含量为81.95%,岩屑质石英砂岩和长石岩屑砂岩次之,分别占到6.38%和11.67%。骨架颗粒中石英平均含量为45.62%,岩屑为25.7%,长石为4.61%,分别占到碎屑总量的60.04%、33.88%和6.08%。该区下石盒子组以岩屑含量较高为特点,岩屑组分中以变质岩岩屑为主,平均含量为15.43%,其中包括石英岩岩屑,千枚岩及泥板岩岩屑,变质沉积岩岩屑等,平均含量分别为9.02%、4.91%和1.50%;火成岩岩屑次之,以火山碎屑岩为主,平均含量为5.56%;沉积岩岩屑以粉砂岩、泥岩为主,平均含量为1.06%;另含少量的燧石以及云母等,平均含量分别为2.52%和1.26%。粗、中、细砂岩在碎屑组分中最大的不同表现在塑性岩屑的含量,在水流分异的作用下,粗砂岩往往富集了较多的刚性颗粒,如石英、石英岩以及长石等,而千枚岩、泥板岩、云母等则由于较易搬运,往往集中在细砂岩中(图2)。根据镜下观察统计,粗砂岩塑性岩屑含量为2.26%,中砂岩为9.47%,细砂岩为15.57%。

该区下石盒子组以高含量填隙物为主要特征,平

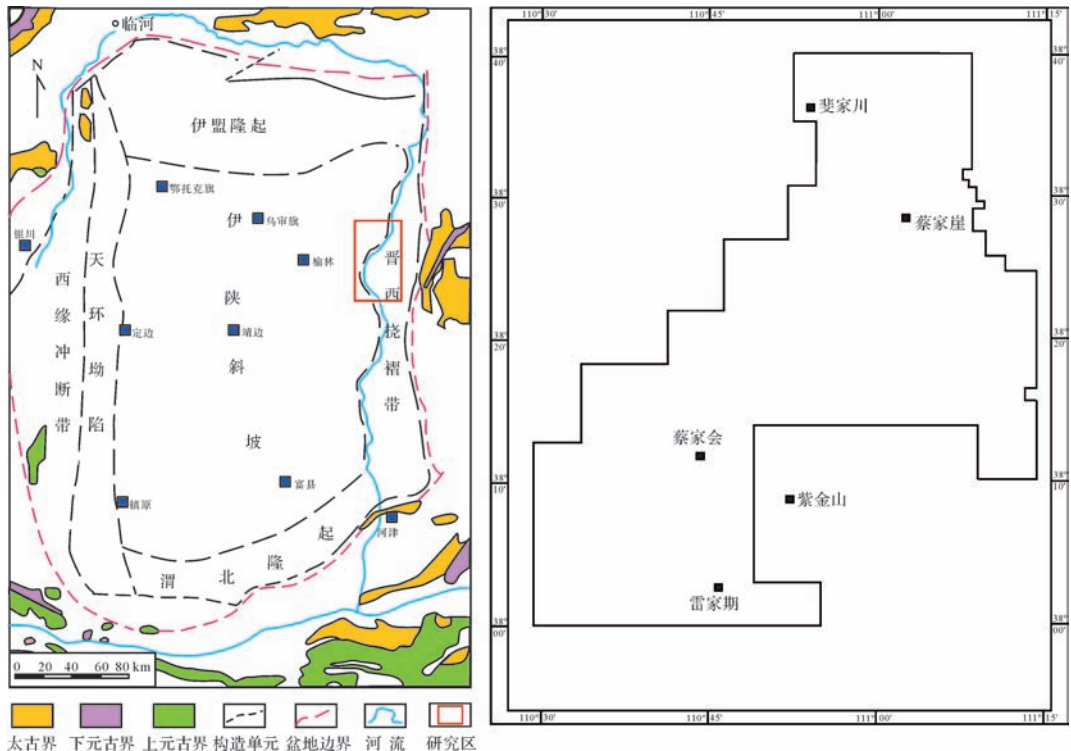


图1 研究区构造及地理位置图

Fig.1 Map showing the tectonic and geographic location of the study area

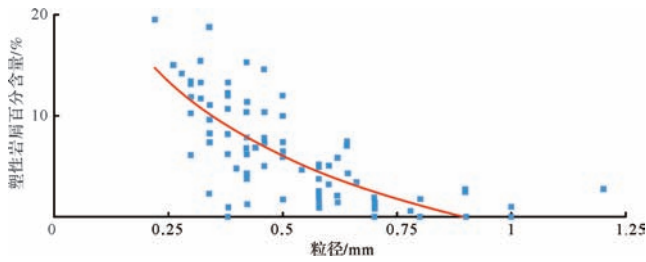


图2 研究区下石盒子组砂岩中塑性岩屑含量与砂岩粒径关系图

Fig.2 The relationship between content of plastic rock debris and grain size of sandstone of the Lower Shihezi Formation in the study area

均含量为 24.03%。其中,胶结物以高岭石为主,平均含量为 5.65%;含铁及铁方解石次之,平均含量为 4.16%;硅质胶结物平均含量为 2.32%;绿泥石膜相对较为发育,平均含量为 0.97%;另含 1.21%的铁质胶结物以及少量的自生伊利石和自生绿泥石。杂基由凝灰质及其蚀变产物(蚀变绿泥石、蚀变胶状水云母)和水云母杂基组成,其中后者发生大量的绢云母化,凝灰质平均含量为 2.18%,蚀变绿泥石和蚀变胶状水云母为 1.90%和 0.39%,水云母杂基含量相对较高,为 4.19%。三种粒级的砂岩在填隙物中的不同主要体现在胶结物上,硅质胶结在粗砂岩中最为发育,平均含量为 2.58%,中砂岩为 2.02%,细砂岩为 1.17%,高岭石多集中发育在中砂岩中,平均含量为 6.86%,粗砂岩为 4.71%,细砂岩为 5.67%,晚期含铁及铁方解石也多存在于粗砂岩中,平均含量为 4.51%,中砂岩为 3.50%,细砂岩为 1.00%。

### 3 成岩作用及单因素孔隙定量表征

成岩作用作为后期改造砂体的主要方式影响着砂体的储集性能,通过对研究区下石盒子组砂岩的薄片观察,认为主要的破坏性成岩作用有压实作用、胶结作用,建设性成岩作用主要为溶蚀作用,在此基础上结合前人对于孔隙度定量计算公式<sup>[14-16]</sup>对不同粒级砂岩成岩作用进行定量计算,以期更直观的体现成岩作用对不同粒级砂岩储集性能的影响。

#### 3.1 压实作用

压实作用作为主要的破坏性成岩作用受到众多学者的广泛关注<sup>[17-19]</sup>。郭本广等<sup>[20]</sup>对研究区埋藏史的研究,认为临兴地区在中侏罗纪达到最大埋深,深度可达 4 000 m 左右,可见在埋藏过程中地层经历的压实作用较强(图 3a)。从物质组成来看,由于三种

不同粒级砂岩初始组分不同,压实作用对其的影响也不相同,根据计算,压实作用对粗砂岩孔隙度影响相对最低,减孔量为 15.14%,中砂岩为 17.99%,细砂岩相对最高,为 19.42%。而造成这种相对高塑性岩屑的根本原因是受到了物源的控制作用,研究区处于盆地东北缘,区块范围较小,根据重矿物、微量元素、阴极发光等资料,并结合前人对鄂尔多斯盆地北部物源的分析<sup>[21-24]</sup>认为,该区下石盒子组物源指向单一,岩屑组分含量相对较高,塑性岩屑如千枚岩,泥板岩,云母以及火山物质等常在强烈压实作用下发生变形充填孔隙(图 3b);另外,海西期构造活动频繁,鄂尔多斯盆地周缘火山活动频发<sup>[25-28]</sup>,大量火山物质以碎屑颗粒和填隙物形式存在于储层中,使得储层压实作用更加明显。

#### 3.2 胶结作用

##### 3.2.1 硅质胶结

研究区下石盒子组砂岩中硅质胶结物的存在形式有石英加大边(图 3c)、孔隙式充填以及石英微晶和隐晶质充填等,孔隙式充填分为两种存在形式,一种为单晶充填,另一种为多晶(嵌晶式)充填(图 3d),后者常存在于凝灰质较多的砂岩中,这种嵌晶式充填类似于燧石的生长方式,在凝灰质溶洞的中心部位晶形较大,而沿边部较为细小,为竞争生长关系(图 3e),这可能是由于硅质的多期充填造成,而微晶及隐晶质石英(图 3f)则由成岩早期凝灰质蚀变而来<sup>[18,29]</sup>。硅质胶结物尽管在一定程度上增加了储层的抗压实能力,但主要还是以胶结并占据孔隙为主要特征。由于细砂岩储集性能已遭到早期压实作用的强烈破坏,因此流体在其内部运移较难,导致硅质胶结物在细砂岩中含量较低,而粗砂岩则由于流体运移较为通畅,经过沉淀形成较多的硅质胶结物。通过计算,硅质胶结物在粗、中、细砂岩中平均减孔量分别为 3.05%、2.30%和 1.50%。

##### 3.2.2 碳酸盐胶结

碳酸盐岩胶结物存在形式有菱铁矿、方解石、含铁方解石及铁方解石,从形成时期上可分为早期、中期和晚期三类胶结物。早期碳酸盐主要为菱铁矿,多呈暗色泥晶、粉晶集合体充填在粒间孔中,通常不交代骨架颗粒,为同生沉积时期由还原性水介质中沉淀产物,随着成岩环境的温压增高,菱铁矿可部分发生重结晶作用,并轻微交代石英等颗粒;其成岩效应表现在成岩早期可增强砂岩的抗压实能力,但含量较低,中期的碳酸盐岩为泥晶和微晶碳酸盐将向粉晶和

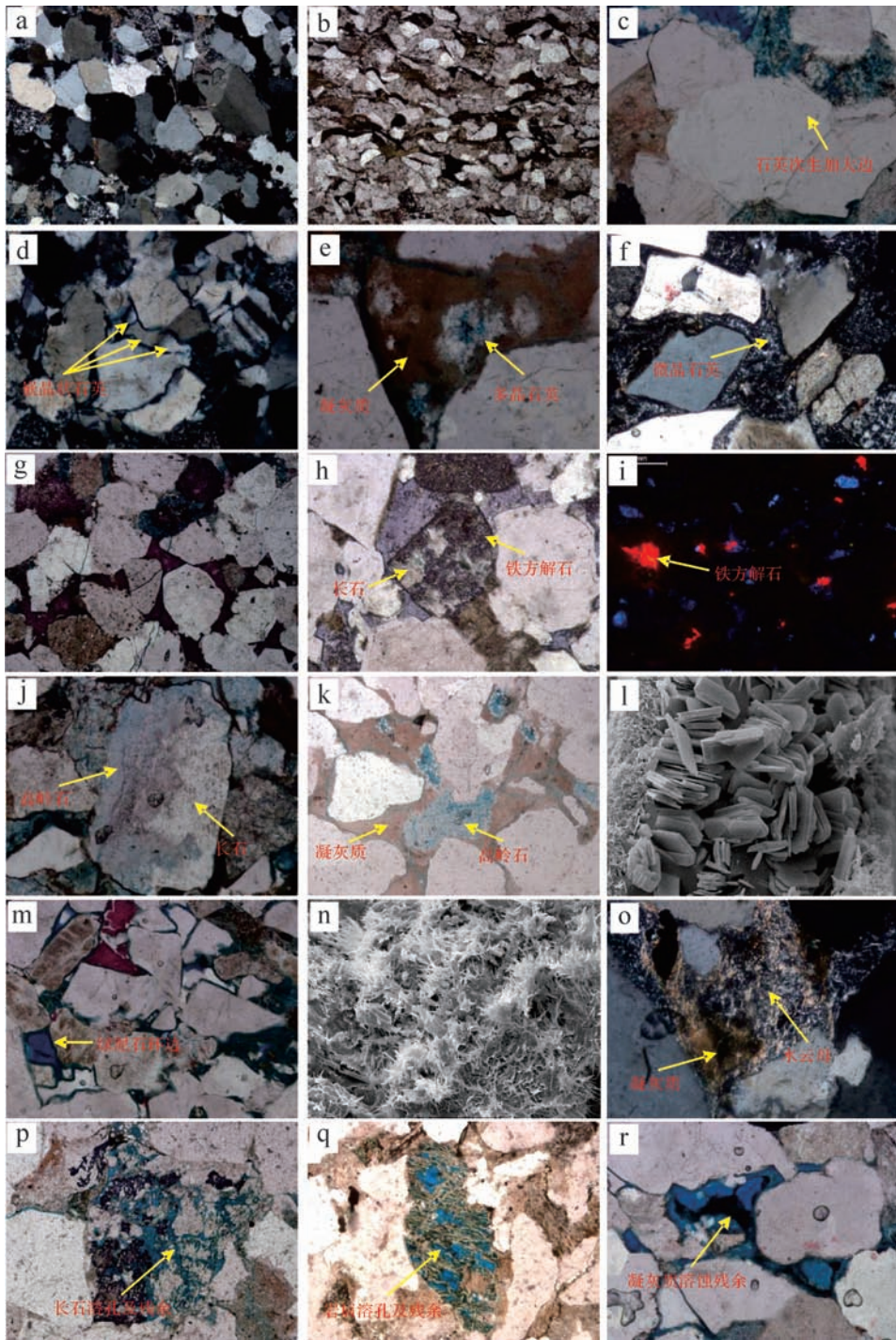


图3 研究区下石盒子组储层特征照片

a.粗砂岩颗粒线—凹凸状接触,LX-8井,1 786.70 m,×50(+);b.细砂岩中大量塑性岩屑被压呈定向性,LX-10井,1 483.06 m,×25(-);c.石英颗粒多级次生加大边,LX-16井,1 839.04 m,×100(-);d.粒间嵌晶状他型硅质充填,LX-8井,1 714.30 m,×100(+);e.凝灰质溶孔充填微晶石英,LX-28井,1 764.11 m,×100(-);f.凝灰质原地蚀变形成的微晶石英,LX-8井,1 639.40 m,×100(+);g.含铁方解石胶结孔隙,LX-8井,1 819.00 m,×25(-);h.铁方解石胶结孔隙并交代长石颗粒,LX-10井,1 477.80 m,×25(-);i.铁方解石在阴极发光下为暗红色,LX-6井,1 647.01 m,阴极发光;j.长石溶蚀后原地生成的高岭石,LX-26井,1 730.5 m,×100(-);k.凝灰质溶蚀后形成的高岭石,LX-28井,1 764.11 m,×25(-);l.鳞片状高岭石充填粒间孔隙,LX-21井,1 756.47 m,×1 500,SEM,m.围绕颗粒表面的绿泥石膜,LX-8井,1 681.70 m,×25(-);n.丝絮状伊利石充填粒间孔隙,LX-7井,1 688.7 m,×700,SEM,o.水云母及凝灰质蚀变残余呈渐变关系,LX-10井,1 714.50 m,×200(+);p.长石溶蚀后被硅质及方解石等胶结,LX-26井,1 758.61 m,×50(-);q.岩屑溶孔及溶蚀残余,LX-26井,1 783.24 m,×50(-);r.凝灰质溶孔及溶蚀残余,LX-8井,1 684.7 m,×100(-)。

Fig.3 The characteristics of photographs of the Lower Shihezi Formation in the study area

细晶碳酸盐转化而成,含量也相对较少,晚期碳酸盐岩最为常见,以含铁及铁方解石为主(图 3g,h),其多呈连晶状充填在各类残留粒间孔、次生溶孔中,在胶结物内部常见交代石英及长石的残骸,在阴极发光下由于方解石中铁/锰比相对较高,通常只发暗红色光(图 3i),这类胶结物晚于早期各类成岩作用,是碱性环境的特征自生成因标志矿物,属于破坏性成岩作用。与硅质胶结物相类似,由于流体在不同粒级砂岩中运移的差异性,导致碳酸盐胶结物多发育在粗砂岩中,细砂岩含量相对最低。通过计算可得,碳酸盐胶结物使得粗砂岩孔隙度降低 5.28%,中砂岩为 2.65%,细砂岩为 1.80%。

### 3.2.3 黏土矿物胶结

黏土矿物在本区下石盒子组也较发育,其中包括高岭石、绿泥石、伊利石以及伊蒙混层等。高岭石含量相对最高,主要由火山物质及长石的蚀变及溶蚀后异地沉淀形成,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 3j,k,l)。作为胶结物形式存在的绿泥石和伊利石发育较少,其以黏土包膜以及自生充填方式为主(图 3m,n),凝灰质蚀变形成的绿泥石和胶状水云母占到了一定比重,而水云母含量也相对较高,其具有可溶、成岩收缩缝、石英晶屑以及凝灰质渐变的特点(图 3o),因此认为其也是由凝灰质蚀变形成。由于同沉积凝灰质及其蚀变产物在各类粒级砂岩中普遍存在,加之自生绿泥石、伊利石含量较低,黏土矿物中高岭石含量的差异性在不同粒级砂岩中表现最为明显,由于其沉淀环境的相对封闭性,多集中于中砂岩中,细砂岩由于流体运移较为困难,水—岩反应程度较低,其含量相对次之,且由于细砂岩经历了强烈的压实作用,早期酸性环境中形成的高岭石晶间孔被压实破坏,使得储层基本不发育晶间孔,粗砂岩中高岭石含量则相对最低。高岭石胶结使得粗砂岩降低 5.78% 的孔隙,而中砂岩为 8.06%,细砂岩为 6.60%,粗砂岩中高岭石晶间孔提供 0.46% 孔隙度,中砂岩则为 1.21%。

### 3.3 溶蚀作用

溶蚀作用形成的次生孔隙是研究区下石盒子组主要的储集空间,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,溶蚀物质总体为长石(图 3p)以及火山物质(图 3q,r)。研究区下石盒子组长石含量较低,其主要受控于母岩性质<sup>[30]</sup>,前人研究认为,长石

主要来自岩浆岩、火山碎屑岩<sup>[31-32]</sup>,这与母岩区相对较少的侵入岩和火山碎屑岩不无关系。因此,火山物质的溶蚀也为次生孔隙的形成起到了至关重要的作用,其以火山碎屑颗粒及凝灰质两种形式存在,在酸性流体的作用下发生溶蚀以及蚀变等成岩作用。从大量镜下观察也可看出,粒内溶蚀孔隙主要由岩屑以及长石提供,而颗粒之间由于充填凝灰质,在酸性溶蚀后往往形成杂基溶蚀孔。另外,由于酸性流体在不同粒级砂岩中运移的难易程度不同,往往会形成溶蚀的差异性,刚性颗粒含量较高的粗砂岩中溶蚀较为充分,而细砂岩由于大量塑性物质的存在,基本不产生溶蚀,根据计算,粗砂岩中溶蚀作用提供孔隙度可达 8.21%,中砂岩为 5.91%,细砂岩仅为 2.34%。

## 4 不同粒级砂岩的成岩演化过程

研究区下石盒子组有机质的镜质体反射率( $R_o$ )测定值为 0.90%~1.83%,平均值为 1.28%,属于成熟—高成熟阶段,且包裹体均一温度集中在 71.5℃~144.7℃,个别样品达到了 172.7℃,说明成岩作用已经达到了中成岩阶段;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 0~38% 之间,平均值为 12.12%,为中成岩 B 期;另外,从大量镜下观察可以看出,大部分石英颗粒具有 II~III 级的次生加大边,碳酸盐胶结物以含铁方解石及铁方解石为主,部分凝灰质也在中成岩 B 期碱性环境中蚀变形成(胶状)绿泥石及胶状水云母等。综上所述,研究区下石盒子组地层整体为中成岩阶段,大部分已经达到了中成岩 B 期。

粗砂岩及含砾粗砂岩由于刚性颗粒含量较高,起到了很好的支撑作用,在成岩过程中流体运移较为通畅,经历的成岩作用比较完全,其成岩反应序列为:早成岩 A 阶段,黏土膜形成→I 期机械压实→无铁泥晶方解石、菱铁矿沉淀→I 期自生石英(微晶或隐晶质);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(加大边或孔隙充填型);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(加大边或孔隙充填型)→绢云母化→I 期伊利石+绿泥石胶结交代→无铁亮晶方解石胶结;中成岩 B 阶段,IV 期自生石英(加大边或孔隙充填型)→II 期伊利石+绿泥石胶结交代→晚期亚铁方解石胶结交代。

细砂岩以含量高塑性岩屑为主要特征,在同沉积凝灰质的充填下更加剧了储层致密化,因此成岩流体运移较为困难,经历的成岩作用以压实作用为主,胶结和溶蚀作用较弱。成岩过程中,酸性流体的溶蚀主要发生在早成岩 B 及中成岩 A 期,而砂体在中成岩 A 早期砂岩就已经固结成岩,也就是说,高塑性成分含量的细砂岩在中成岩早期就已经基本致密化,酸性流体已经很难进入,而在早成岩 B 期酸性流体进入后形成的溶孔及高岭石晶间孔也会随着压实作用而减小甚至消失,使得面孔率基本为 0,直到中成岩 A 晚期及中成岩 B 期弱碱及碱性环境中发生少量绿泥石化和伊利石化以及含铁或铁方解石的交代作用。综上所述,其成岩反应序列为:早成岩 A 阶段,黏土膜形成→I 期机械压实→无铁泥晶方解石、菱铁矿沉淀→I 期自生石英(微晶或隐晶质);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(加大边或孔隙充填型);中成岩 A 阶段,绢云母化→I 期伊利石+绿泥石交代;中成岩 B 阶段,II 期伊利石+绿泥石交代→亚铁碳酸盐交代。

中砂岩粒径介于粗砂岩及细砂岩之间,由于在成分上兼有二者的特点,因此成岩作用为二者的过渡型,此处不再详尽描述(图 4)。

### 5 埋藏过程中的孔隙演化过程

由于沉积分异作用,各粒级砂岩的初始孔隙度就有所不同,细砂岩由于颗粒分选差,初始孔隙度较低,平均值为 29.58%,中砂岩为 30.47%,粗砂岩相对最高,为 31.65%。结合研究区埋藏史图可以认为,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,由于压实作用的差异性,使得粗砂岩孔隙度降低至 16.51%,中砂岩为 12.48%,细砂岩为 10.16%;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,粗砂岩溶蚀作用最强,其孔隙度升至 24.72%,中砂岩为 18.39%,细砂岩仅为 12.50%,胶结物以硅质和高岭石为主,在后期使得粗砂岩孔隙度降低至 15.89%,中砂岩为 8.03%,细砂岩为 4.40%,但由于高岭石提供少量的晶间孔,使得粗砂岩孔隙度提高至 16.35%,中砂岩为 9.24%;中侏罗世之后,成岩阶段达到了中成岩 B,以碱性环境为主,大量含铁以及铁方解石得以沉淀,尽管对于粗砂岩影响相对最大,但是粗砂岩物性依然较高。粗砂岩孔隙度最终为 11.07%,中砂岩为 6.08%,细砂岩为 2.60%(图 5)。综上所述,粗砂岩由于压实作用相对较弱,溶蚀作用相对最强,可以形成良好的储集空间,中砂岩则主要受控于由于压实和(高岭石)胶结作用的双

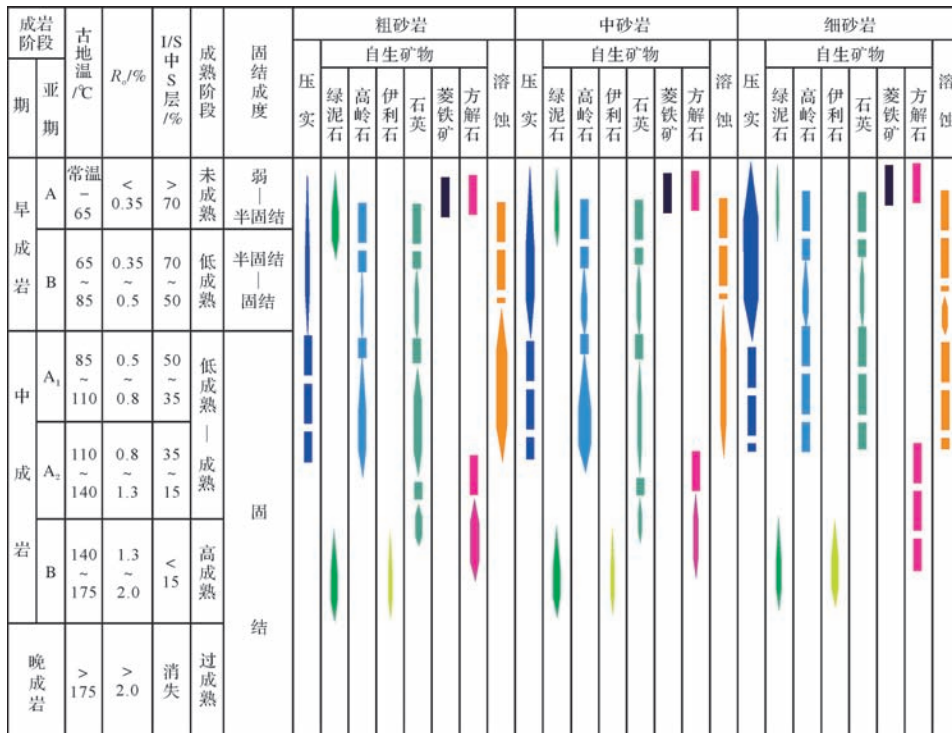


图 4 研究区下石盒子组成岩序列

Fig.4 The diagenetic sequence of the Lower Shihezi Formation in the study area

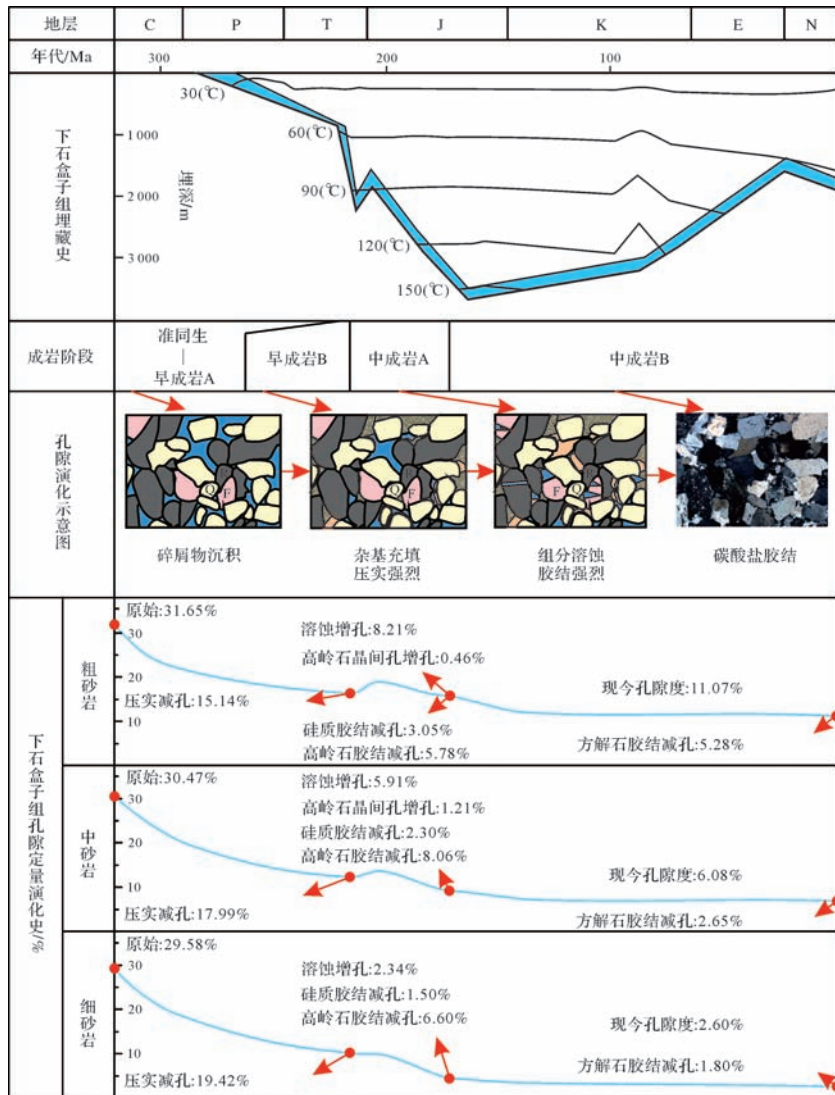


图 5 研究区下石盒子组不同粒级砂岩地质历史时期储层孔隙度演化(埋藏史图引自郭本广等<sup>[20]</sup>,略有修改)

Fig.5 Reservoir porosity evolution history of different grain size sandstone of the Lower Shihezi Formation in the study area (burial history modified after Guo *et al.*<sup>[20]</sup>)

重影响,形成次一级的储集空间,而细砂岩则以压实破坏为主,物性相对最差。

## 6 结论

(1) 水流的分异作用导致研究区下石盒子组砂岩碎屑成分在各粒级砂岩中呈现出明显的不同,刚性颗粒多集中于粗砂岩中,而细砂岩中塑性颗粒含量相对最高。酸性流体运移的差异性则导致不同粒级砂岩填隙物也不尽相同,粗砂岩以相对高硅质胶结、碳酸盐胶结为主要特征,中砂岩以相对高含量高岭石为特征,细砂岩胶结物含量较少,也以高岭石为主。

(2) 研究区下石盒子组砂岩整体处于中成岩 B

期,粗砂岩经历的成岩作用较为完全,细砂岩在中成岩 A 期的溶蚀作用基本不发育,在中成岩 A 晚期及中成岩 B 期只发生少量蚀变和交代作用,中砂岩则为上述二者的过渡型。

(3) 研究区下石盒子组砂岩在二叠世—中晚三叠世为准同生—早成岩 B 阶段,成岩作用以压实为主,其对细砂岩物性影响最大;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,粗砂岩溶蚀作用较强,具有较高的孔隙度值;中侏罗世之后,成岩阶段达到了中成岩 B,以亚铁碳酸盐胶结为主,其对粗砂岩影响较大,但物性依然较高,粗砂岩最终孔隙度为 11.07%,中砂岩为 6.08%,细砂岩为

2.60%。粗砂岩由于压实作用相对较弱,溶蚀作用相对最强,物性相对最好,中砂岩次之,而细砂岩则以压实破坏为主,物性相对最差。

### 参考文献 (References)

- [1] 付金华,魏新善,南珺祥,等.鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气田储集层特征与成因[J]. 古地理学报,2013,15(4):529-538. [Fu Jinhua, Wei Xinshan, Nan Junxiang, et al. Characteristics and origin of reservoirs of gas fields in the Upper Paleozoic tight sandstone, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(4): 529-538.]
- [2] 杨华,付金华,刘新社,等.鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J]. 石油勘探与开发,2012,39(3):295-303. [Yang Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshe, et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 295-303.]
- [3] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报,2012,33(2):173-187. [Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.]
- [4] 廖朋,王琪,唐俊,等.鄂尔多斯盆地环县—华池地区长8砂岩储层成岩作用及孔隙演化[J]. 中南大学学报:自然科学版,2014,45(9):3200-3210. [Liao Peng, Wang Qi, Tang Jun, et al. Diagenesis and porosity evolution of sandstone reservoir from Chang 8 of Yanchang Formation in Huanxian-Huachi region of Ordos Basin[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(9): 3200-3210.]
- [5] 梁建设,王琪,郝乐伟,等.西湖凹陷渐新统花港组储层砂岩成岩环境演化探讨[J]. 天然气地球科学,2012,23(4):673-680. [Liang Jianshe, Wang Qi, Hao Lewei, et al. Evolution of diagenetic environments for Oligocene Huagang Formation sandstone in Xihu sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 673-680.]
- [6] 廖朋,唐俊,庞国印,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长8<sub>1</sub>段储层特征及控制因素分析[J]. 矿物岩石,2012,32(2):97-104. [Liao Peng, Tang Jun, Pang Guoyin, et al. Reservoir characteristics and control factors of Chang 8<sub>1</sub> of Yanchang Formation of Triassic in Juyuan region of Ordos Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2012, 32(2): 97-104.]
- [7] 朱宏权,张哨楠.鄂尔多斯盆地北部上古生界储层成岩作用[J]. 天然气工业,2004,24(2):29-32. [Zhu Hongquan, Zhang Shaonan. Diageneses of Upper Paleozoic reservoirs in North Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(2): 29-32.]
- [8] 刘岩,张哨楠,丁晓琪,等.鄂尔多斯盆地定边北部石盒子组—山西组储层成岩作用[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2009,36(1):29-34. [Liu Yan, Zhang Shaonan, Ding Xiaoqi, et al. Reservoir diagenesis of Shihezi Formation and Shanxi Formation in the north of Dingbian, Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2009, 36(1): 29-34.]
- [9] 林春明,张霞,周健,等.鄂尔多斯盆地大牛地气田下石盒子组储层成岩作用特征[J]. 地球科学进展,2011,26(2):212-223. [Lin Chunming, Zhang Xia, Zhou Jian, et al. Diagenesis characteristics of the reservoir sandstones in lower Shihezi Formation from Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(2): 212-223.]
- [10] 张明松,雷卞军,黄有根,等.鄂尔多斯盆地余兴庄—子洲地区上古生界山<sub>23</sub>储层砂岩成岩作用与成岩相[J]. 沉积学报,2011,29(6):1031-1040. [Zhang Mingsong, Lei Bianjun, Huang Yougen, et al. Diagenesis and diagenetic facies of sandstones reservoir in the Upper Paleozoic Shan<sub>23</sub> of Yuxingzhuang-Zizhou area, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(6): 1031-1040.]
- [11] 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.]
- [12] 李杪,罗静兰,赵会涛,等.不同岩性的成岩演化对致密砂岩储层储集性能的影响——以鄂尔多斯盆地东部上古生界盒8段天然气储层为例[J]. 西北大学学报:自然科学版,2015,45(1):97-106. [Li Miao, Luo Jinglan, Zhao Huitao, et al. Impact of the diagenetic evolution of different lithology on tight sandstone reservoir performance: A case study from He 8 natural gas reservoir of the Upper Paleozoic in eastern Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2015, 45(1): 97-106.]
- [13] 刘占良,樊爱萍,李义军,等.碎屑组分差异对成岩作用的约束——以苏里格气田东二区砂岩储层为例[J]. 天然气工业,2015,35(8):30-38. [Liu Zhanliang, Fan Aiping, Li Yijun, et al. Constraints of clastic component difference on diagenesis: A case study of sandstone reservoirs in Dong-2 Block of the Sulige gasfield, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(8): 30-38.]
- [14] 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.]
- [15] 宋子齐,王瑞飞,孙颖,等.基于成岩储集相定量分类模式确定特低渗透相对优质储层——以AS油田长6<sub>1</sub>特低渗透储层成岩储集相定量评价为例[J]. 沉积学报,2011,29(1):88-96. [Song Ziqi, Wang Ruifei, Sun Ying, et al. Based on the quantita-



- tive classification mode of diagenetic reservoir facies to filter relatively excellent quality: Taking the quantitative assessment of diagenetic facies of Chang 6<sub>1</sub> reservoir of AS oilfield hyposmosis reservoirs for an example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 88-96.]
- [16] 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.]
- [17] 张兴良,田景春,王峰,等. 致密砂岩储层成岩作用特征与孔隙演化定量评价——以鄂尔多斯盆地高桥地区二叠系下石盒子组盒8段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 212-217. [Zhang Xingliang, Tian Jingchun, Wang Feng, et al. Diagenetic characteristics and quantitative porosity estimation of tight sandstone reservoirs: a case from the 8<sup>th</sup> Member of Permian Xiashihezi Formation in the Gaoqiao region, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 212-217.]
- [18] 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.]
- [19] 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.]
- [20] 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, 18(5): 110-112. [Guo Benguang, 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, 18(5): 110-112.]
- [21] 陈全红,李文厚,胡孝林,等. 鄂尔多斯盆地晚古生代沉积岩源区构造背景及物源分析[J]. *地质学报*, 2012, 86(7): 1150-1162. [Chen Quanhong, Li Wenhong, Hu Xiaolin, et al. Tectonic setting and provenance analysis of Late Paleozoic sedimentary rocks in the Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(7): 1150-1162.]
- [22] 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.]
- [23] 窦伟坦,侯明才,董桂玉. 鄂尔多斯盆地北部山西组一下石盒子组物源分析[J]. *天然气工业*, 2009, 29(3): 25-28. [Dou Weitan, Hou Mingcai, Dong Guiyu. Provenance analysis of the Upper Paleozoic Shanxi to Lower Shihezi Formations in north Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(3): 25-28.]
- [24] 席胜利,王怀厂,秦伯平. 鄂尔多斯盆地北部山西组、下石盒子组物源分析[J]. *天然气工业*, 2002, 22(2): 21-24. [Xi Shengli, Wang Huaichang, Qin Boping. Analysis of the material sources of Shanxi Formation and Shihezi Formation in North Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(2): 21-24.]
- [25] 李向博,王建伟. 煤系地层中砂岩火山尘填隙物的成岩作用特征——以鄂尔多斯盆地天然气储层为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1): 42-48. [Li Xiangbo, Wang Jianwei. The formation and evolution of volcanic dust fillings of sandstone in coal measures strata of Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(1): 42-48.]
- [26] 陈冬霞,王兴志,李凌,等. 鄂尔多斯盆地佳县—子洲地区上古生界储层特征[J]. *古地理学报*, 2002, 4(3): 93-100. [Chen Dongxia, Wang Xingzhi, Li Ling, et al. Reservoir characteristics of the Upper Palaeozoic in the Jiaxian-Zizhou area of Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(3): 93-100.]
- [27] 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(增刊1): 22-25. [Li Guidong, Wen Xianduan. The characteristics of volcanic ash in the mid-northern area, eastern Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(Suppl.1): 22-25.]
- [28] 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 north margin of North China block and the coupling relationship between basin and range[D]. Xi'an: Northwestern University, 2000.]
- [29] 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.]
- [30] 沈玉林. 鄂尔多斯中东部晚古生代古地理及高效储层控制因素研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2009. [Shen Yulin. Study on palaeogeography and controlling factor analysis of efficient reservoir development in Late Paleozoic in the middle-eastern Ordos[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.]
- [31] 杨斌虎. 鄂尔多斯盆地上古生界盒8、山1段物源与沉积相及其对优质天然气储层的影响[D]. 西安:西北大学, 2009. [Yang Binhu. Discussion on provenance and depositional facies and their impact on prospecting natural reservoirs of He 8 and Shan 1 group in the Upper Paleozoic, Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2009.]
- [32] 刘小洪. 鄂尔多斯盆地上古生界砂岩储层的成岩作用研究与孔隙成岩演化分析[D]. 西安:西北大学, 2008. [Liu Xiaohong. Research on diagenesis and analysis on pores diagenetic evolution of sandstone reservoirs of the Upper Paleozoic, Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University, 2008.]

# The Diagenetic Evolution and Quantitative Research of Porosity in Different Grain Size Sandstones of the Lower Shihezi Formation in Linxing Area, Ordos Basin

WANG Qi<sup>1,2</sup>, MA DongXu<sup>2,3</sup>, YU Fang<sup>4</sup>, JI HongJie<sup>2,3</sup>, SU XuLiang<sup>5</sup>, LI XiaoYan<sup>6</sup>, HAO LeWei<sup>2</sup>, WEI ZhongHeng<sup>7</sup>

1. National Engineering Laboratory of Exploration and Development on Low Permeability Oil & Gas Field, Xi'an 710018, China

2. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, 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

4. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

5. Qingdao Geo-engineering Exploration Institute, Qingdao, Shandong 266071, China

6. Lanzhou Library of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

7. Shandong branch of Zhengyuan Geographic Information Co., Ltd., Jinan 250101, China

**Abstract:** Based on analysis on casting thin sections, SEM, cathodeluminescence, inclusion, and geochemical data, and combining with the method of statistics and calculation, we have discussed the petrologic feature, diagenetic sequence, and quantitative evolution of porosity from the different grain-sized sandstone of the Lower Shihezi Formation in the study area. This research shows that the coarse sandstone has the characteristic with high rigidity particle and the plastic debris is enriched in fine-grained sandstone. silicic cementation and carbonate cementation are enriched in coarse sandstone, medium and fine sandstone has the high content of kaolinite. On the diagenetic evolution process, the experience of diagenesis is more completely in coarse sandstone, but the fine sandstone had already become densification in period B of early diagenetic stage. The medium sandstone is the transition between the two types. The period of Permian to middle Triassic is penecontemporaneous to period B of early diagenetic stage, the dominant diagenesis is compaction, which has the greatest influence on the porosity of fine sandstone. In the late Triassic to Jurassic is the period A of middle diagenetic stage, the dominant diagenesis are corrosion and cementation. The coarse sandstone dissolution is strong, so has a higher porosity. Fine sandstone is not developed in dissolution and cementation by and large. The period B of middle diagenetic stage is developed after middle Jurassic, the dominant diagenesis is ferrous carbonate cementation. Coarse sandstone has strong cementation to reduce the porosity, but the property is still good. The final porosity is 11.07%, 6.08% and 2.60%. In conclusion, coarse sandstone has better properties because lower compaction and higher corrosion, medium sandstone is secondary formation because compaction and cementation, fine sandstone is the worst formation because of higher compaction.

**Key words:** Ordos; Upper Paleozoic; different grain-sized sandstone; diagenetic evolution; quantitative research of porosity