

鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系下石盒子组岩屑发育特征及其对储层物性的影响

邱隆伟^{1,2}, 穆相骥¹, 李浩³, 张军³, 葛君⁴, 徐爽¹, 周士博¹

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石化胜利油田鲁胜石油开发有限责任公司, 山东 东营 257077]

摘要:鄂尔多斯盆地杭锦旗地区具有良好的致密气勘探潜力,下石盒子组是杭锦旗地区的主力产气层段。储层岩石类型以岩屑砂岩和岩屑质石英砂岩为主。根据偏光显微镜下铸体薄片观察以及扫描电镜、高压压汞、粘土矿物X-衍射、阴极发光等分析测试手段的应用,结合相关孔渗数据对鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区下石盒子组储层的岩石学特征及储层物性特征进行了研究,明确了岩屑颗粒的发育特征及其对储层物性的影响。结果表明:下石盒子组储层粒度较粗,主要为粗粒及中-粗粒砂岩;岩屑平均含量高达40%。研究区储层埋藏较深,成岩作用改造强烈,压实作用强,原生孔隙绝大部分被改造充填,次生孔隙为主要的储集空间。储层岩屑类型发育多样,根据岩屑对储层物性的影响,将其整体划分为减孔型岩屑、增孔型岩屑、保孔型岩屑3类。减孔型岩屑较发育会使粒间次生溶孔大量减少且自身难以溶蚀,因而破坏储层的物性,其中以高含量的千枚岩岩屑对储层物性影响最为显著;增孔型岩屑的发育则对储层物性有着明显的改善效应,其可以保存部分粒间孔,还易发生内部溶蚀,改善储层物性,其中以高含量的变质石英岩屑对储层物性影响最为显著;保孔型岩屑本身抗压实能力较强且多数较难溶蚀,可以保护原有孔隙却不能通过自身溶蚀改善储层物性,通常与增孔类岩屑同时发育,该类岩屑与物性呈间接性正相关关系。

关键词:岩屑类型;成孔机制;储层物性;致密砂岩;下石盒子组;杭锦旗地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics of detritus development in the Permian lower Shihezi Formation in Hangjinqi area and its influence on reservoir physical properties

Qiu Longwei^{1,2}, Mu Xiangji¹, Li Hao³, Zhang Jun³, Ge Jun⁴, Xu Shuang¹, Zhou Shibao¹

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 4. Lusheng Petroleum Development Company Ltd. of Shengli Oilfield Branch Company Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong 257077]

Abstract: Hangjinqi area has great potential for tight gas exploration in Ordos Basin and the Lower Shihezi Formation is the major gas pay zone in the area. The reservoir rocks are mainly composed of lithic sandstones and lithic quartz sandstones. Based on the observation of cast thin section and the analyses of the SEM images, high pressure mercury injection, X-ray diffraction of clay minerals and cathodoluminescence, and combining with the relevant porosity and permeability data, we studied the petrological characteristics and physical properties of reservoirs in the Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area of northern Ordos Basin and identified the developmental features of detrital grains and their influence on reservoir physical properties. The following results were obtained. The Lower Shihezi Formation reservoir is mainly composed of medium-coarse sandstones characterized by coarse grain size, with an average content of detritus as high as 40%. The reservoir of the study area is deeply buried, and experienced strong diagenesis and compaction later, leading to the filling of most primary pores and the secondary pores acting as the main reservoir space. The reservoir de-

收稿日期:2018-09-13;修订日期:2018-10-10。

第一作者简介:邱隆伟(1967—),男,教授、博士生导师,沉积学及储层地质学工作。E-mail:qiuwlsd@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05009-002)。

tritus is diversified in types. According to the influence of detritus on reservoir physical properties, the detritus as a whole can be divided into three types, namely pore reducing, pore increasing and pore retaining. The growth of pore reducing detritus leads to massive reduction of intergranular secondary solution pores and it is uneasy for these detritus to dissolve, resulting in the destruction of reservoir physical properties. Among other, a high content of phyllite detritus plays the most significant role in destroying the reservoir quality. While the growth of pore increasing detritus can function to reserve part of the intergranular pores and it is easy for the detritus to dissolve inside, so being of great help for improving the reservoir physical properties. A high content of metaquartzites is the most important factor for this improvement. Besides, the pore retaining detritus usually develops synchronously with the pore increasing one; it's strong in nature in resisting compaction and most of them is difficult to dissolve. Therefore, this detritus can protect the original pores, but could not improve the reservoir physical properties by self-dissolution, and is in indirect positive correlation with physical properties.

Key words: category of detritus, pore-forming mechanism, physical property, tight sandstone, Lower Shihezi Formation, Hangjinqi area, Ordos Basin

致密砂岩油气是目前非常规油气勘探的重要研究对象。尽管致密砂岩孔渗性相比常规油气储层较差,但仍然可在一定条件下成为相对优质的储层,具有良好的勘探开发潜力^[1-3]。目前,普遍认为骨架颗粒粒度、岩石组分和后期成岩作用等因素是影响致密砂岩储层物性的最主要因素^[4-5]。前人对储层物性特征影响因素也做过相应的一些研究,如刘喜杰,马遵敬等研究认为鄂尔多斯盆地东缘临兴区块致密砂岩中长石颗粒溶蚀是优质储层发育的基础^[6];邱隆伟,徐宁宁等认为鄂尔多斯盆地大牛地地区致密砂岩中石英颗粒溶蚀的强弱决定了储集层物性的最终发育程度^[7];罗静兰,刘新社等认为岩石学组分以及源区母岩性质决定了鄂尔多斯盆地北部上古生界下石盒子组8段储集性能的优劣和产能的大小^[8]。事实上,杭锦旗地区致密砂岩气资源量较为丰富,但因研究起步较晚,勘探程度较低,阻碍了对于储层物性影响因素和机制的认识,也给天然气藏有利储层评价预测造成一定障碍。

前人对低孔、低渗储层物性控制因素的研究已经较为成熟,但仅有少数学者去探讨致密砂岩中岩屑的发育会对储层物性造成的影响以及其与优质储层间存在的相关关系,而这些都是研究区在下一步勘探中需要重点解决的问题。本文在岩心观察的基础上,通过20余口取心并铸体薄片的镜下观察鉴定与定量统计,结合粒度分析、物性分析、扫描电镜、压汞测试等手段,对杭锦旗地区下石盒子组的岩屑发育特征进行了分类总结并据此研究了它们对于储层物性的影响,以达到对研究区储层物性控制因素更深入的了解,以进一步探讨优质储层形成和演变的机制,为下一步勘探部署提供启示和依据。

1 区域地质概况

研究区位于鄂尔多斯盆地北部伊盟隆起构造带,这里是杭锦旗断阶和伊陕斜坡的过渡地区,属于杭锦旗地区一部分^[9];发育北东-南西向倾斜平滑斜坡,大型断裂较少,有两条近东西走向次级断裂,分别为泊尔江海子断裂和乌兰吉林庙断裂^[10]。其中,泊尔江海子断裂南部以及乌兰吉林庙断裂东部区域属于十里加汗区块。区块内上古生界分布范围较广,长期以来处于相对隆起状态,具有较好的油气勘探潜力,也是致密气开发的重点研究区域(图1)。

上古生界主要包括太原组、山西组和下石盒子组。其中,下石盒子组沉积厚度相对较大,厚约100~150 m,平面展布相对稳定,岩石粒度整体较粗,主要发育有低孔低渗-特低孔特低渗的致密砂岩储层,构成区域内主力勘探目的层系。

2 岩石学特征

薄片镜下鉴定结果表明,杭锦旗地区下石盒子组致密砂岩储层岩石类型以岩屑砂岩和岩屑质石英砂岩为主(图2a)。目的层段整体表现为长石含量极低、岩屑含量较高的特点,其中石英含量48%~82%,平均约62%;长石含量0~5.6%,平均约1.2%;岩屑含量18%~52%,平均约40%。粒度整体差异不大,主要发育中粒-粗粒砂岩(图2b)。孔隙中的填隙物含量3%~29%,平均10%。其中,碳酸盐胶结和粘土矿物胶结相对发育,石英次生加大边相对不发育;部分样品杂基含量较高。储层结构成熟度较低,磨圆相对较差,

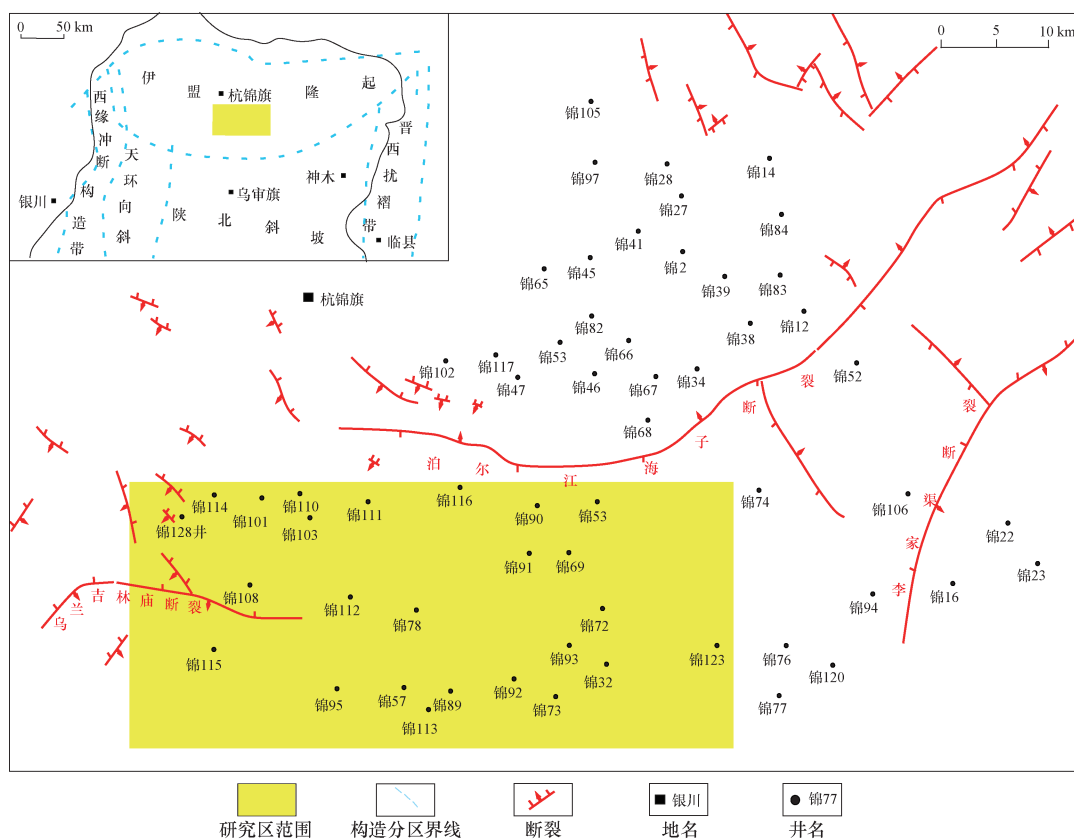


图1 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区构造位置及井位分布

Fig. 1 Structure location of and well distribution in Hangjinqi area, Ordos Basin

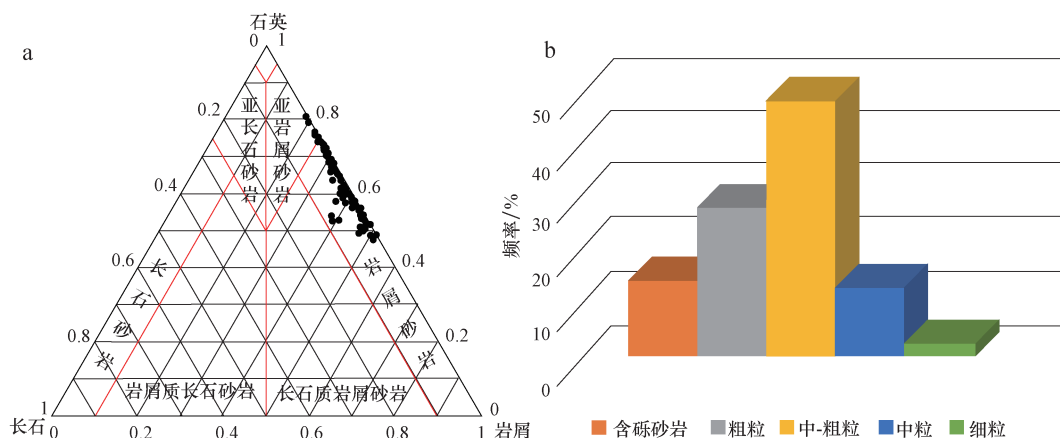


图2 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区下石盒子组砂岩成分分类(a)及粒度分布直方图(b)

Fig. 2 Classification of sandstone composition(a) and histogram of grain size distribution(b) of the Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, Ordos Basin

颗粒圆度次棱角—次圆状,以次棱角状为主;分选差—中等;颗粒间接触关系多为线接触和凹凸接触;胶结类型以颗粒支撑的孔隙式胶结和杂基支撑的基底胶结为主。

3 岩屑类型及发育特征

整体来看,研究区下石盒子组几乎不含长石,岩屑

含量高,储层岩屑类型多样且相对复杂,包括火成岩岩屑、沉积岩岩屑、变质岩岩屑3大类型;其中,变质岩岩屑及火成岩岩屑是最主要的岩屑类型(图3a)。

为了明确不同岩屑对储层的影响,本文将其细分为碳酸盐岩屑、脉石英、花岗岩岩屑、泥岩岩屑、砂岩岩屑、变质石英砂岩岩屑、燧石岩屑、板岩岩屑、片岩岩屑、千枚岩岩屑、变质石英岩屑等11个小类(表1);岩屑类型的定量统计(图3b)表明,各类岩屑类型及含量

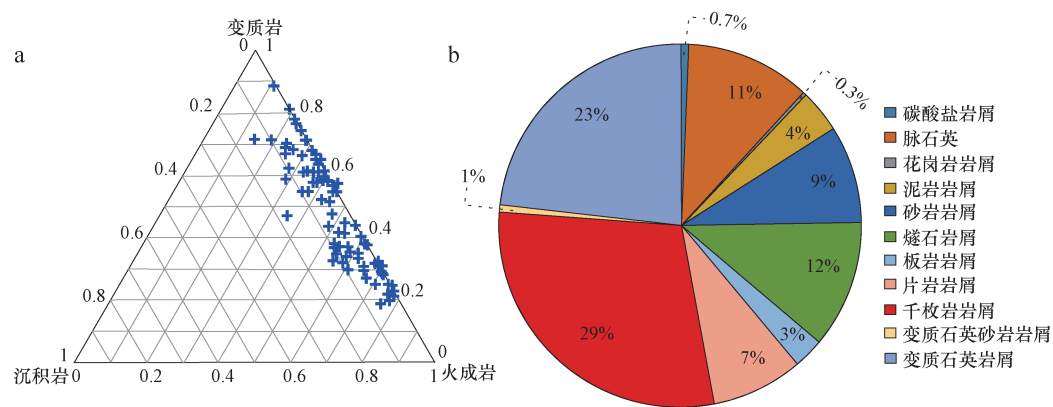


图3 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区下石盒子组砂岩岩屑分类(a)及不同岩屑类型分布占比(b)
Fig. 3 Classification of sandstone detritus(a) and proportion of different types of detritus(b)
of the Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区下石盒子组岩屑类型划分及岩屑特征与分类
Table 1 Categorization of the detritus of the Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, Ordos Basin,
and its characteristics and classification

类型划分	岩屑类型	岩屑特征	岩屑分类
减孔型岩屑 (A类)	板岩岩屑	基本无法看到片状矿物的晶形,矿物的质点都非常细小,但有定向构造	变质岩岩屑
	片岩岩屑	云母片结晶相对粗大,片理明显,有定向构造,粒状矿物含量相对偏高	变质岩岩屑
	千枚岩岩屑	片状矿物分布相对密集,有定向构造,粒状矿物含量相对较少	变质岩岩屑
	泥岩岩屑	表面污浊,呈土褐色,常有黑色,炭质混入物	沉积岩岩屑
增孔型岩屑 (B类)	变质石英岩屑	各晶粒间普遍表现为缝合接触,缝合线弯曲复杂,石英晶体多为扁平伸长形,各晶粒伸长方向相互平行	变质岩岩屑
	变质石英砂岩岩屑	已经过变质的石英砂岩岩屑,晶粒伸长方向相互平行,具砂状结构	变质岩岩屑
	石英砂岩岩屑	未经变质,碎屑及填隙物清晰可辨,具砂状结构	沉积岩岩屑
	碳酸盐岩屑	区别于碳酸盐胶结物的是其具明显的碎屑颗粒外形,常保留原岩的组构特征	沉积岩岩屑
保孔型岩屑 (C类)	花岗岩岩屑	通常由数量不多的石英、长石及个别暗色矿物晶粒构成	火成岩岩屑
	脉石英岩屑	脉石英中的晶粒常显定向伸长形,粒间界限呈细小弯曲线状	火成岩岩屑
	燧石岩屑	非常细粒的微晶质或隐晶质石英集合体,单偏光与石英颗粒相似	沉积岩岩屑

分别为千枚岩岩屑(含量约29%)、变质石英岩屑(含量约23%)、燧石岩屑(含量约12%)、脉石英岩屑(含量约11%)、砂岩岩屑(含量约9%)、片岩岩屑(含量约7%)、泥岩岩屑(含量约4%)、板岩岩屑(含量约3%)、变质石英砂岩岩屑(含量约1%)、碳酸盐岩屑(含量约0.7%)、花岗岩岩屑(含量约0.3%)。

通过各类岩屑的鉴定特征的分类统计为依据,建立了岩屑鉴定图版(图4)。其中,变质岩岩屑中的千枚岩岩屑和变质石英岩屑含量最高,两者可占岩屑整体含量的50%以上。前者属于塑形岩屑,抗压能力较差,难以溶蚀;后者属于刚性岩屑,抗压能力较强,且有大量粒内溶孔发育^[11-12]。泥岩岩屑、板岩岩屑和片岩岩屑特征与千枚岩岩屑类似,容易发生塑性弯曲

变形,因而极易被挤进孔隙之中而假杂基化。砂岩岩屑、变质石英砂岩岩屑虽然含量不高,但往往在高物性的储层中发育,且自身极易发生溶蚀。燧石岩屑、脉石英岩屑含量也相对较高,同样可为刚性岩屑,颗粒形态在强压实作用下大多依然可以保持原有的形态,但这几类岩屑内部的矿物颗粒几乎不发生溶蚀作用。

4 岩屑对储层物性的影响

在碎屑岩中最常见的造岩矿物石英和长石在稳定条件下有着明显的差别,总体来看碱性地层水的背景更有利于石英的溶蚀和长石的自生加大,而酸性的流

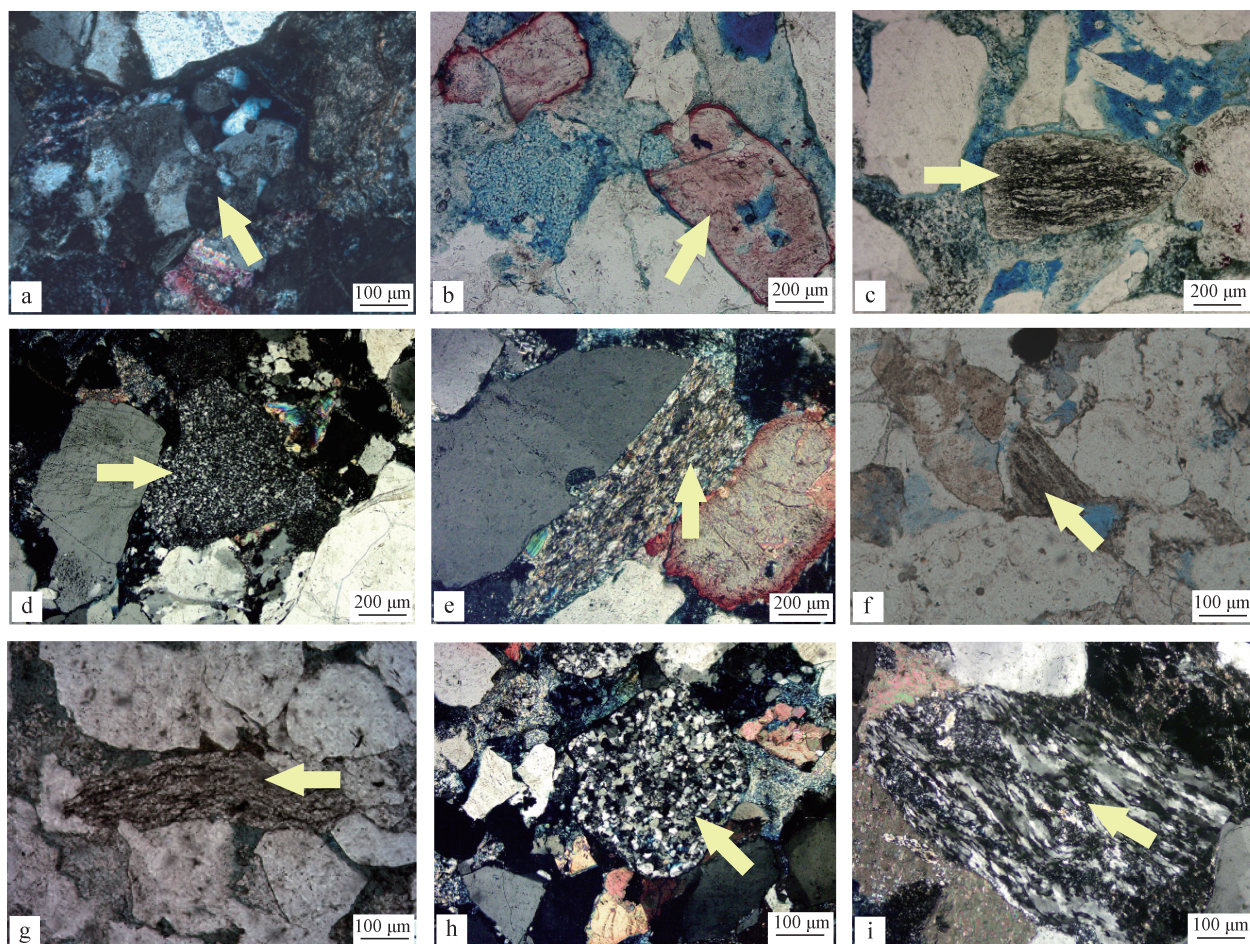


图4 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区下石盒子组储层岩屑镜下特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of the detritus of the Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, Ordos Basin

a. 花岗岩岩屑, 锦51井, 埋深2 733.44 m, 铸体薄片(+); b. 碳酸盐岩屑, 锦122井, 埋深2 710.22 m, 铸体薄片(-); c. 泥岩岩屑, 锦122井, 埋深2 709.4 m, 铸体薄片(-); d. 燧石岩屑, 锦95井, 埋深3 087.78 m, 铸体薄片(+); e. 片岩岩屑, 锦103井, 埋深3 090.67 m, 铸体薄片(+); f. 板岩岩屑, 锦51井, 埋深2 721.84 m, 铸体薄片(-); g. 千枚岩岩屑, 锦112井, 埋深3 029 m, 铸体薄片(-); h. 变质石英砂岩岩屑, 锦116井, 埋深2 972.96 m, 铸体薄片(+); i. 变质石英岩屑, 锦103井, 埋深3 095.72 m, 铸体薄片(+)

体更易使长石发生溶蚀以及石英自生加大, 这些成岩现象对储层的物性有着较为深远的影响^[13-15]。由于不同岩屑类型在矿物成分上的差异性, 以及在内部结构上的多颗粒属性, 在孔隙水作用下的活跃程度(变形、溶解)也会存在很大的差异性, 从而都对储层物性造成较明显的影响。

研究区储层中岩屑种类复杂且多样, 成分成熟度低, 对储层的物性影响不可忽视。下石盒子组岩屑发育对储层物性的影响是多方面的, 既有破坏储层物性的岩屑类型, 也有改善储层物性的岩屑类型^[16]。确定岩屑类型及其对物性的影响, 有助于我们对储层的孔隙发育类型和分布规律有着更清晰的认识, 也能够为优质储层的评价和预测提供新的研究思路。

根据各类岩屑的发育特征以及对储层物性的影响, 将其划分为A、B、C三类。其中A类岩屑为减孔型岩屑; B类为增孔型岩屑; C类为保孔型岩屑(表1)。

4.1 减孔型岩屑

主要由浅变质岩岩屑如板岩岩屑、片岩岩屑、千枚岩岩屑和泥岩岩屑(图5a—c)等组成, 平均含量约37%。

4.1.1 减孔型岩屑特征及机制

该类岩屑成分主要为粘土矿物、长英质矿物及绢云母、云母等层状构造硅酸盐矿物, 岩屑组构细密, 岩屑本身难以溶蚀, 但是在压实作用的改造下极易发生变形甚至假杂基化充填骨架颗粒之间。该类岩屑的减孔机制为岩屑的压实变形, 其含量与储层物性呈明显负相关关系(图6)。

4.1.2 减孔型岩屑对储层物性的影响

减孔型岩屑是研究区中最主要的岩屑类型之一。

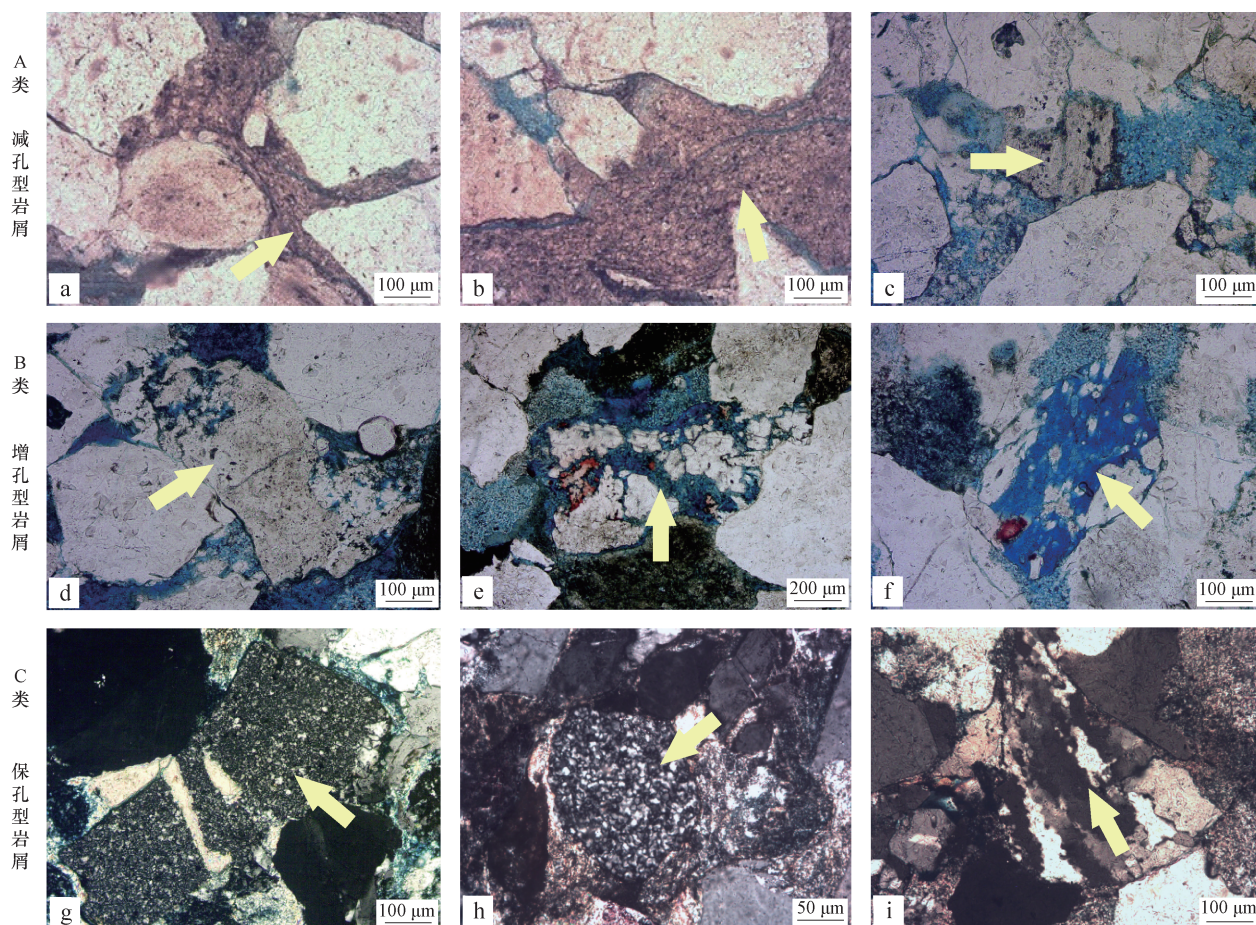


图5 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区下石盒子组 A,B,C 三类岩屑特征

Fig. 5 Characteristics of the three types of detritus of the Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, Ordos Basin

a. 千枚岩岩屑假杂基化, 锦53井, 埋深2 903.08 m, 铸体薄片(-); b. 板岩岩屑挤压变形, 锦53井, 埋深2 908.49 m, 铸体薄片(-); c. 泥岩岩屑挤压变形, 锦103井, 埋深3 095.72 m, 铸体薄片(-); d. 变质石英砂岩岩屑微弱溶蚀, 锦116井, 埋深2 972.96 m, 铸体薄片(-); e. 变质石英岩岩屑部分溶蚀, 锦116井, 埋深2 987.61 m, 铸体薄片(-); f. 变质石英岩岩屑强溶蚀, 锦122井, 埋深2 710.22 m, 铸体薄片(-); g. 燧石岩屑被方解石交代, 锦103井, 埋深3 090.87 m, 铸体薄片(+); h. 燧石岩屑表现出抗压能力较强, 锦51井, 埋深2 724.7 m, 铸体薄片(+); i. 脉石英岩屑内部无溶蚀, 锦53井, 埋深2 897.54 m, 铸体薄片(+)

该类岩屑中千枚岩岩屑含量较高, 平均含量约29%, 在减孔型岩屑中的相对含量约85%, 因此千枚岩岩屑的含量在成岩作用过程中对储层孔隙度的损害程度最大。千枚岩中的粘土矿物已经全部重结晶形成绢云母, 呈细小片状定向排列, 片状矿物分布相对密集, 粒状矿物较少, 具显微鳞片变晶结构或显微粒状鳞片变晶结构。其往往与储层物性呈负相关关系, 且抗压能力较差, 在强压实作用下易受周围刚性颗粒挤压而变形, 直至完全被挤压至周围多个颗粒间的缝隙中从而形成假杂基化现象, 占据了颗粒间大量空间且自身的组分难以直接溶解, 使得成岩过程中溶解作用难以进行, 粒间次生孔隙大量减少, 因而破坏储层的物性(图7)。

4.2 增孔型岩屑

增孔型岩屑主要由变质石英岩、变质石英砂岩岩

屑、石英砂岩岩屑(图5d—f), 以及碳酸盐岩屑, 少量花岗岩岩屑和酸性喷出岩等岩性组成。

4.2.1 增孔型岩屑特征及机制

岩屑在矿物成分上主要包括石英、长石; 矿物颗粒间接触较为紧密, 但由于颗粒间的接触缝并没有完全闭合, 这种接触缝在一定程度上有利于孔隙水活动, 易发生内部溶蚀现象。岩屑的成孔机制主要表现为岩屑内部沿接触缝的溶解, 有时可形成岩屑颗粒内部的蜂窝状溶孔(图5d)或因岩屑的广泛溶解后形成残余岩屑(图5f)。此外, 岩屑颗粒边部也能发生一定的溶解现象; 含量与储层物性呈明显正相关关系(图6)。

石英质岩屑的内部都存在颗粒与颗粒之间的接触缝, 在碱性流体的作用下, 这些接触缝比颗粒更容易

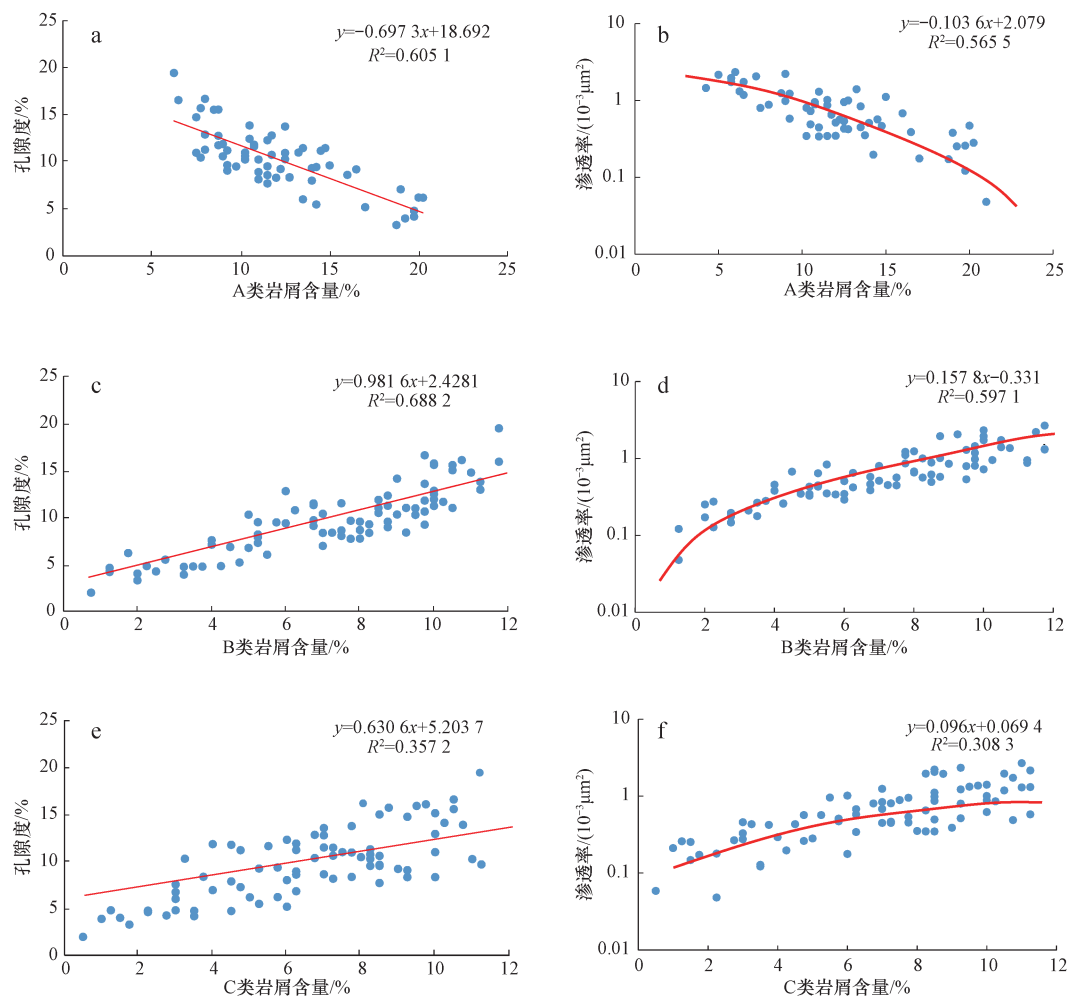


图6 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区下石盒子组 A,B,C 三类岩屑含量与物性关系交汇图

Fig. 6 Crossplot of the content of the three detritus types vs. the physical properties of the Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, Ordos Basin

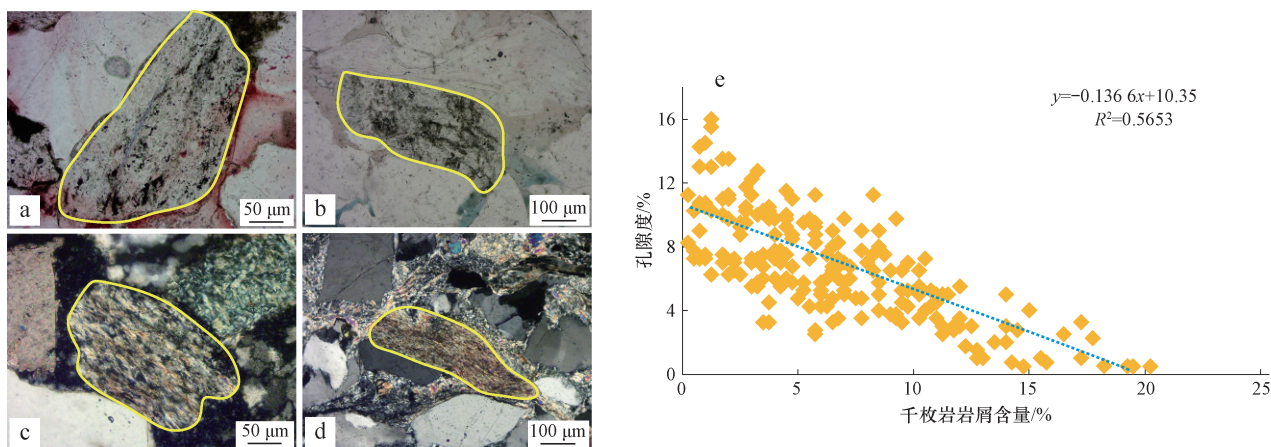


图7 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区下石盒子组千枚岩岩屑镜下特征及千枚岩岩屑含量与孔隙度交汇图

Fig. 7 Microscopic characteristics of phyllite detritus (a) and crossplot of the content of phyllite detritus vs. porosity (b) in the Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, Ordos Basin

a. 千枚岩岩屑中的粘土矿物, 锦95井, 埋深3208.48m, 铸体薄片(-); b. 千枚岩岩屑受挤压变形, 锦116井, 埋深2982.26m, 铸体薄片(-); c. 千枚岩岩屑中含量高片状矿物, 锦93井, 埋深3022.65m, 铸体薄片(+); d. 千枚岩岩屑绢云母定向排列, 锦110井, 埋深3015.74m, 铸体薄片(+); e. 千枚岩岩屑含量与孔隙度交汇图

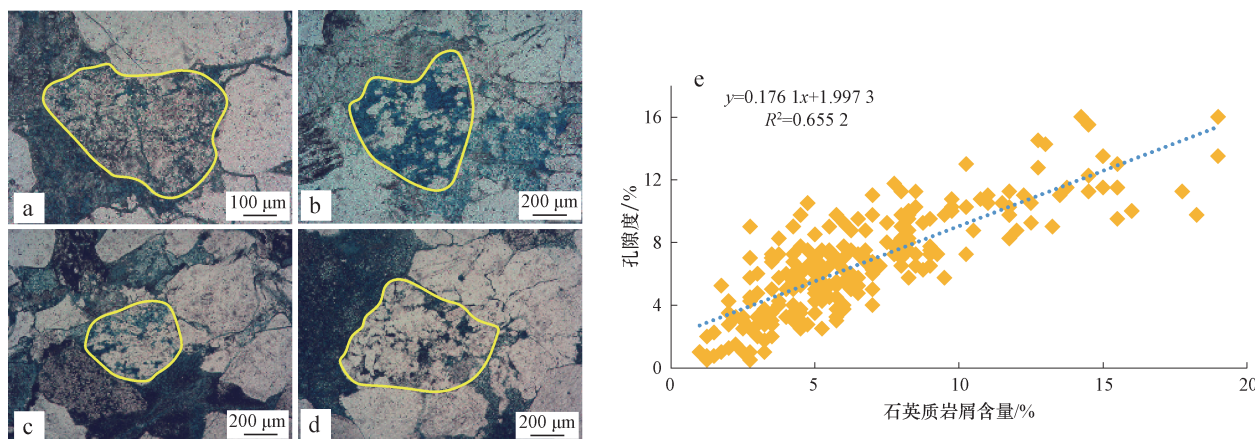


图8 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区下石盒子组石英质岩屑镜下特征及石英质岩屑含量与孔隙度交汇图

Fig. 8 Microscopic characteristics of quartzite detritus (a) and crossplot of the content of quartzite detritus vs. porosity (b) of the Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, Ordos Basin

- a. 变质石英砂岩沿裂缝溶蚀, 锦108井, 埋深3 087.2 m, 铸体薄片(-); b. 变质石英岩内部强烈溶蚀, 锦110井, 埋深3 026.6 m, 铸体薄片(-); c. 变质石英岩内部弱溶蚀, 锦116井, 埋深2 990.09 m, 铸体薄片(-); d. 变质石英砂岩内部溶蚀, 锦116井, 埋深2 987.61 m, 铸体薄片(-); e. 石英质岩屑含量与孔隙度交汇图

被溶解而开启,从而在颗粒间形成蜂窝状的内部溶蚀孔(图8a)。对于研究区来说,增孔型岩屑的成孔机制主要为碱性溶解作用下,石英质岩屑的部分溶解。溶解特征表明该类岩屑内部的溶蚀不是由于碳酸盐矿物对石英质岩屑的先交代后溶解作用,即便有部分接触缝被碳酸盐矿物交代,也不可能出现如此之多的接触缝同时发生这样的交代作用,甚至形成蜂窝状的溶蚀结构,更不可能再经过后期的溶解作用将这些细微的交代成因的空间完全溶解释放,因而由于碱性流体直接溶解颗粒与颗粒之间的接触缝从而形成这种比较特殊的溶解孔形态是最合理的解释。

4.2.2 增孔型岩屑对储层物性的影响

从含量及其实际贡献看,石英质岩屑是增孔型岩屑中最为主要的岩屑类型。研究区中石英质岩屑(包括变质石英岩屑、变质石英砂岩岩屑和砂岩岩屑)含量很高,其对储层物性影响最为关键且对溶液环境有着重要的指示意义^[17]。石英质岩屑在碱性地层水的作用常不稳定,容易发生溶解作用而形成次生孔。

石英质岩屑的发育对储层物性有着明显的改善(图8b),它们不仅有着较强的抗压实能力,而且也能保存部分粒间孔,还能在成岩过程中通过内部的溶蚀作用来改善储层的物性。

4.3 保孔型岩屑

保孔型岩屑也以石英质岩屑为主,主要为燧石、脉石英两大类。

4.3.1 保孔型岩屑特征及机制

这些岩屑本身抗压实能力较强,尽管组成岩屑的颗粒可以很细(燧石),也可以较粗(脉石英),但由于颗粒间镶嵌紧密,不利于孔隙流体的渗流,因此一般较难溶蚀。偏光显微镜下的观察表明,这类岩屑的溶蚀特征多数较弱,甚至不明显(图5g—i),这表明其发育对孔隙本身贡献不大,但同时石英质岩屑属于刚型岩屑,抗压实能力较强,对原有孔隙又有一定的保护作用。

4.3.2 保孔型岩屑对储层物性的影响

统计结果表明,保孔型岩屑的含量与物性呈正相关关系(图6),由于该类岩屑通常与增孔类岩屑同时发育且二者在岩屑矿物成分上也近似一致,因此该类岩屑和孔隙度之间的正相关关系实际上属于间接性正相关。但此类岩屑自身难以溶蚀,因而无法改善储层的物性,以此区别于增孔类岩屑。

4.4 讨论

对于致密砂岩储层,原生孔隙在强烈的成岩改造作用下已经基本消失殆尽,因而在成岩过程中的溶蚀作用是决定储层物性的决定性因素^[18-19]。通常认为,致密砂岩储层中岩屑的存在尤其是塑性岩屑的大量发育,将会导致岩石抗压性和抗热性减弱,不利于后期地下成岩流体对储集层的溶蚀改造,使得总岩屑含量与物性呈负相关关系^[20-21]。实际上,储层中岩屑的存在

对储层物性的影响可以是多方面的,既有因压实变形而造成的负面影响,也有因溶蚀作用的发育而造成的正面影响。

研究区的储层中由于岩屑含量较高,且岩屑类型多,不同类型的岩屑由于组构上的差异性,在储层形成过程中的成岩响应特征也存在较大的差异,有的岩屑非常容易溶解,并形成大量的次生孔隙;有些则因为压实变形而对孔隙和储层物性造成损害。因此,详细探究其差异性,是把握储层成孔机制的关键因素之一。

研究区储层中所发育了减孔型、增孔型和保孔型3类岩屑。减孔型岩屑因其成岩压实变形而使孔隙空间变小,孔隙度降低。增孔型岩屑除碳酸盐岩屑之外,多数和保孔型岩屑在成分上是一致的,但是由于其在成岩作用过程中的溶解能力并不相同,前者较强,而后者基本溶蚀特征不明显,因此对于储层物性发育的贡献是不同的。增孔型岩屑和孔隙度之间存在的是直接的正相关关系,而保孔型岩屑和孔隙度之间存在间接正相关关系。如前所述,这种正相关关系是该类岩屑和增孔型岩屑在储层中相伴出现的,且在含量上也具有正相关关系。但由于这两类岩屑对于储层物性的贡献实际上存在非常大的区别,因此在储层发育控制因素的研究以及优质储层预测中,需要把它们区分开来,进行统计与研究,这样才能真正从实质上把握储层的成孔机制,为储层发育主控因素的研究提供有益的参考,进而为深层致密砂岩储层的研究与油气勘探开发提供借鉴意义。

5 结论

1) 杭锦旗地区下石盒子组致密砂岩储层岩石类型以岩屑砂岩和岩屑质石英砂岩为主,在岩石组分中石英及岩屑含量高,几乎不含长石。岩屑含量18%~52%,平均约40%,岩屑类型发育多样且相对复杂,具体分为碳酸盐岩屑、脉石英、花岗岩岩屑、泥岩岩屑、砂岩岩屑、变质石英砂岩岩屑、燧石岩屑、板岩岩屑、片岩岩屑、千枚岩岩屑、变质石英岩屑等11小类。

2) 下石盒子组岩屑发育对储层物性的影响是多方面的,既有破坏储层物性的岩屑类型,也有改善储层物性的岩屑类型。根据岩屑的发育对储层物性的影响,将岩屑分为减孔型岩屑、增孔型岩屑、保孔型岩屑3类。减孔型岩屑主要由板岩岩屑、片岩岩屑和千枚岩岩屑和泥岩岩屑所组成;增孔型岩屑主要有变质石英岩、变质石英砂岩岩屑、石英砂岩岩屑,以及碳酸盐

岩屑,少量花岗岩岩屑和酸性喷出岩等;保孔型岩屑主要为燧石及脉石英。

3) 保孔型岩屑尽管和许多增孔型岩屑一样,主要由石英矿物组成,但由于存在结构上的差异,两类岩屑对于储层物性的贡献并不相同。增孔型岩屑和储层物性之间存在正相关关系,保孔型岩屑和储层物性之间存在的正相关关系属于间接性正相关。

4) 由于保孔型岩屑和增孔型岩屑在溶蚀孔隙形成中的贡献度存在差异,在储层精细研究中,有必要把这两类岩屑分开来进行研究和统计。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质[M].北京:地质出版社,2011:50-93.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional oil and gas geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 50-93.
- [2] 于波.鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩储层微观孔隙特征[J].西安科技大学学报,2018,38(1):150-155.
Yu Bo. Micro-characteristics of Upper Paleozoic tight reservoir of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science And Technology, 2018, 38(1): 150-155.
- [3] 赵桂萍.鄂尔多斯杭锦旗地区上古生界储层流体包裹体特征与天然气成藏时期[J].石油与天然气地质,2017,38(5):905-912.
Zhao Guiping. Characterization of fluid inclusions and timing of gas accumulation in Upper Paleozoic reservoirs of Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 905-912.
- [4] 梁承春,郭景祥.鄂尔多斯盆地红河油田延长组长₈₁小层致密砂岩成岩作用与储层特征[J].油气地质与采收率,2017,24(1):57-63.
Liang Chengchun, Guo Jingxiang. Diagenesis and reservoir characteristics of tight sandstones of Chang₈¹ member of Yanchang Formation in Honghe oilfield, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 57-63.
- [5] 于炳松,林畅松.油气储层埋藏成岩过程中的地球化学热力学[J].沉积学报,2009,27(5):896-903.
Yu Bingsong, Lin Changsong. Geochemical thermodynamics of diagenesis in reservoirs for Oil and Gas[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 896-903.
- [6] 刘喜杰,马遵敬,韩冬,等.鄂尔多斯盆地东缘临兴区块致密砂岩优质储层形成的主控因素[J].天然气地球科学,2018,29(04):481-490.
Liu Xijie, Ma Zunjing, Han Dong, et al. Research on the main factors of high quality tight sandstone reservoir in LinXing block, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(04): 481-490.
- [7] 邱隆伟,徐宁宁,周涌沂,等.鄂尔多斯盆地大牛地地区致密砂岩石英溶解作用及其对优质储集层的影响[J].矿物岩石地球化学通报,2015,34(1):38-44,2.
Qiu Longwei, Xu Ningning, Zhou Yongyi et al. Dissolution of quartz

- in tight sandstones of the Daniudi Area, Ordos Basin, and its influence to high quality reservoirs[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(1): 38–44, 2.
- [8] 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(中国地质大学学报)*, 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]. *Geoscience (Journal of China University of Geosciences)*, 2014, 39(5): 537–545.
- [9] 宋凯. 鄂尔多斯盆地杭锦旗探区成藏条件分析与区带评价[J]. *石油地质与工程*, 2013, 27(5): 10–13, 17, 145–146.
- Song Kai. Analysis of reservoir forming conditions and regional zone assessment in Hang jinqi i exploration area, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2013, 27(5): 10–13, 17, 145–146.
- [10] 郑喜强, 严岗. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区油气圈闭类型研究[J]. *勘探地球物理进展*, 2006, (4): 279–284, 12.
- Zheng Xiqiang, Yan Gang. Types of hydrocarbon traps types in Hangjinqi area of northern Ordos Basin[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2006, (4): 279–284, 12.
- [11] 田景春, 刘伟伟, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界致密砂岩储层非均质性特征[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 183–189.
- Tian Jingchun, Liu weiwei, Wang feng, et al. Heterogeneity of the Paleozoic tight sandstone reservoirs in Gaoqiao Area of Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 183–189.
- [12] 杨杰. 鄂尔多斯盆地延安地区长4+5油层组致密砂岩储层特征[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(6): 25–29.
- Yang Jie. Characteristics of tight sandstone reservoir of Chang 4 + 5 oil reservoir set in Yan' an area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(6): 25–29.
- [13] 王维斌, 朱静, 马文忠, 等. 鄂尔多斯盆地周家湾地区长8致密砂岩储层特征及影响因素[J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(1): 51–58.
- Wang Weibin, Zhu Jing, Ma Wenzhong, et al. Characteristics and influencing factors of Chang 8 tight sandstone reservoir of Triassic Yanchang Formation in Zhoujiawan area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(1): 51–58.
- [14] 徐梦龙, 何治亮, 尹伟, 等. 鄂尔多斯盆地镇泾地区延长组8段致密砂岩储层特征及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 240–247.
- Xu Menglong, He Zhiliang, Yinwei, et al. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoirs in the 8th member of the Yanchang Formation in Zhenjing area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 240–247.
- [15] 李玲玲. 满加尔凹陷东部志留系致密砂岩储层特征[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(2): 47–51 + 75.
- Li Lingling. Reservoir characteristics of Silurian tight sandstone in the eastern Manjiaer sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(2): 47–51, 75.
- [16] 林小兵, 刘莉萍, 田景春, 等. 川西坳陷中部须家河组五段致密砂岩储层特征及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 224–230.
- Lin Xiaobing, Liu Liping, Tian Jingchun, et al. Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoirs in the 5th member of Xujiahe Formation in the central of western Sichuan Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 224–230.
- [17] 李光云, 赖富强, 何加成, 等. 吐哈盆地丘东洼陷下侏罗统致密砂岩储层特征及物性主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(2): 310–319.
- Li Guangyun, Lai Fuqiang, He Jiacheng, et al. Reservoir characteristics and controlling factors on physical properties of Lower Jurassic tight sandstone in the QiuDong sub-sag, Turpan-Hami Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(2): 310–319.
- [18] 操应长, 惠克来, 刘可禹, 等. 陆相湖盆致密砂岩油气储层储集性能表征与成储机制——以松辽盆地南部下白垩统泉头组四段为例[J]. *石油学报*, 2018, 39(3): 247–265.
- Cao Yingchang, Xi Kelai, Liu Keyu, et al. Reservoir properties characterization and its genetic mechanism for tight sandstone oil and gas reservoir in lacustrine basin: the case of the fourth member of lower Cretaceous Quantou Formation in the southern Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(3): 247–265.
- [19] 周磊, 操应长, 惠克来, 等. 廊固凹陷河西务构造带沙四段低渗储层特征及其成因机制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(3): 8–16.
- Zhou Lei, Cao Yingchang, Xi Kelai, et al. Characteristics and genetic mechanism of low-permeability reservoirs of the 4th member of Shahejie formation in Hexiwu structural zone of Langgu sag[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(3): 8–16.
- [20] 陈晓智, 庞雄奇, 邵新荷, 等. 鄂尔多斯盆地临兴A地区下石盒子组致密砂岩气成藏条件[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(1): 169–176.
- Chen Xiaozhi, Pang Xiongqi, Shao Xinhe, et al. Accumulation conditions of tight sandstone gas in the Lower Shihezi Formation in LinXing A area, Ordos Basin[J]. *Geological science and Technology Information*, 2018, 37(1): 169–176.
- [21] 周林, 陈波, 凡睿, 等. 川北地区须四段致密砂岩储层特征及成岩演化[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(3): 543–550, 560.
- Zhou Lin, Chen Bo, Fan Rui, et al. Characteristics and diagenesis of tight sandstone reservoirs in the 4th member of Xujiahe Formation, northern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(3): 543–550, 560.

(编辑 张亚雄)