



引文格式: 郭恒玮, 宋荣彩, 刘金库, 等. 致密砂岩岩相组合对储层物性的控制: 以苏 59 区块上古生界石盒子组和山西组为例[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 106–117. DOI: 10.12401/j.nwg.2023156

Citation: GUO Hengwei, SONG Rongcai, LIU Jinku, et al. Control of Sandstone Reservoir Physical Properties by Petrographic Assemblages: A Case Study from the Upper Palaeozoic Shibox and Shanxi Formation in the Su59 Block Area[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 106–117. DOI: 10.12401/j.nwg.2023156

致密砂岩岩相组合对储层物性的控制: 以苏 59 区块上古生界石盒子组和山西组为例

郭恒玮¹, 宋荣彩^{2,*}, 刘金库³, 伏美燕¹, 王长城¹, 李可赛¹

(1. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学教务处, 四川 成都 610059; 3. 中国石油川庆钻探工程公司地质勘探开发研究院, 四川 成都 610059)

摘要: 河流三角洲发育多种类型岩相和岩相组合, 不同岩相的砂岩物性有明显差异, 但目前尚不明确岩相组合对储层物性的控制作用。笔者以苏 59 区块上古生界石盒子组和山西组为例, 通过岩心观察、图像分析和薄片鉴定等实验方法, 划分了研究区岩相类型和岩相组合, 并明确了岩相组合的韵律结构, 从岩石组成、成岩改造的差异上探讨了岩相组合对储层物性的控制作用。根据岩石粒度和沉积构造的研究, 发现研究区苏 59 区块石盒子组和山西组砂岩来自北部多个物源, 碎屑成分复杂、变化大。石盒子组和山西组发育 5 类岩相, 粒序层理砾质粗砂岩、块状层理含砾粗砂岩、板状交错层理粗砂岩和块状层理粗砂岩为渗透率可达 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上, 为有利岩相类型。根据岩相类型和韵律结构将岩相组合划分为复合韵律组合、正韵律组合和反韵律组合。其中, 正韵律组合发育的有利岩相所占比例最高, 为有利岩相组合。通过对 3 类分流河道岩相组合的岩石组成、压实和溶蚀作用程度差异对比研究, 认为盒 8 段主要成岩作用为压实作用、硅质胶结、黏土矿物胶结、碳酸盐胶结和溶蚀作用。岩屑砂岩主要的成岩作用为压实作用和黏土胶结; 岩屑石英砂岩的主要成岩作用为硅质胶结和溶蚀作用。其中正韵律组合中砂岩的杂基含量较低, 压实作用相对较弱, 溶蚀作用较强, 是造成物性较好的主要原因。由于这类岩相组合中的砂岩具有粒度较粗且刚性碎屑颗粒含量较高的原始物质基础, 导致原生孔得以保存, 且为后期成岩流体提供了通道而发育较多铸模孔, 因此粗-中粒砂岩正韵律组合是最有利的岩相组合类型。通过笔者的研究明确了研究区致密砂岩岩相组合对储层物性的控制作用, 为河道相优质砂岩储层的勘探提供了重要依据。

关键词: 鄂尔多斯盆地苏里格气田; 石盒子组; 山西组; 岩相组合; 压实作用; 储层物性

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)01-0106-12

Control of Sandstone Reservoir Physical Properties by Petrographic Assemblages: A Case Study from the Upper Palaeozoic Shibox and Shanxi Formation in the Su59 Block Area

GUO Hengwei¹, SONG Rongcai^{2,*}, LIU Jinku³, FU Meiyang¹, WANG Changcheng¹, LI Kesai¹

(1. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Department of Academic Affairs, Chengdu

收稿日期: 2022-10-26; 修回日期: 2022-12-07; 责任编辑: 曹伯迪

基金项目: 川庆 D 类科技项目“2022 年苏 59 区块上古生界致密砂岩富集规律研究”(COCDLG-2021-01)(FL20121NY.01.001)。

作者简介: 郭恒玮(1994-), 男, 博士, 主要从事致密砂岩研究。E-mail: alvin.guo0111@foxmail.com。

* 通讯作者: 宋荣彩(1975-), 女, 教授, 博士, 主要从事油气储层地质学与地热地质学。E-mail: 417102145@qq.com。

University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Institute of Geological Exploration and Development, Chuanqing Drilling and Exploration Engineering Company of China Petroleum, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: Various types of petrographic phases and petrographic assemblages are developed in the distributary channels of delta plain, and the sandstone physical properties of different petrographic phases have obvious distinction, but the control of petrographic assemblages on reservoir physical properties is not clear yet. In this paper, taking the Upper Paleozoic Shi Box and Shanxi Formations of the Su 59 Block as an example, we delineate the petrographic types and petrographic assemblages by means of core observation, image analysis and thin section identification, clarify the rhythmic structure of petrographic assemblages, and explore the control of petrographic assemblages on reservoir physical properties in terms of the differences in rock composition and rock-forming transformation. According to the rock grain size and sedimentary structure, the sandstones of the Su 59 Block Shibox and Shanxi Formations in the study area are derived from multiple sources in the north and have a complex and highly variable clastic composition. Five types of petrographic assemblages are developed in the Shi Box Formation and Shanxi Formation. The granularly laminated conglomeratic coarse sandstone, massive laminated conglomeratic coarse sandstone, platy interlaminated coarse sandstone and massive laminated coarse sandstone are favourable petrographic types with permeability up to $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ or more. The petrographic assemblages are classified into composite rhyolite assemblages, positive rhyolite assemblages and anti-rhyolite assemblages according to the petrographic type and rhyolite structure. Among them, the proportion of favourable petrographic assemblages developed in the positive rhyme assemblage is the highest, which is a favourable petrographic assemblage. A comparative study of the differences in rock composition, compaction and degree of dissolution in the three types of divergent channel lithological assemblages concluded that the lower content of miscellaneous bases in the sandstones, the main diagenetic processes in Box 8 are compaction, siliceous cementation, clay mineral cementation, carbonate cementation and dissolution. The main diagenetic processes in the rock chip sandstone are compaction and clay cementation; the main diagenetic processes in the rock chip quartz sandstone are siliceous cementation and dissolution. Of these relatively weak compaction and strong dissolution in the positive rhythm assemblages are the main reasons for the better physical properties. The coarse-medium grain sandstone orthorhynchogenic assemblage is the most favourable type of petrographic assemblage due to its coarse grain size and high content of rigid clastic grains in the original material base, resulting in the preservation of primary pores and the development of more cast pores by providing access for later diagenetic fluids. The study in this paper clarifies the control of petrographic assemblage on reservoir properties, and provides an important basis for the exploration of high-quality sandstone reservoirs in the Delta plain divergent channel phase.

Keywords: Sulig Gas Field Ordos Basin; Shibox; Shanxi Formation; lithofacies assemblage; compaction; physical properties

以苏里格气田为代表的鄂尔多斯盆地致密砂岩气的开发目前正处于快速发展阶段。目前, 中国已有多位学者对研究区致密砂岩储层进行了深入的研究(白慧等, 2015, 2020; 董会等, 2016; 田清华等, 2022)。苏里格气田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的西北部, 苏 59 井区位于苏里格气田的西部。而河道砂体是常规油气勘探开发的主要研究对象。对于这类砂岩储层的评价通常以单一岩性为主, 岩相组合分析较少。岩相组合指的是沉积序列的垂向构成, 包括岩石的岩性、

成分、结构、构造、亚相(微相)等, 例如, 可以按照粒度特征分为向上变粗、向上变细和复合 3 种类型(邱隆伟等, 2012; 胡一然, 2015; 张荣, 2016; 孟德伟等, 2016; 张洪洁, 2020)。岩相组合分析能够反映一段沉积期内的沉积水动力条件、沉积原始物质组成, 甚至后期成岩改造的程度(雷开强, 2003; 陈俊亮等, 2004; 陈克勇, 2006; 白涛, 2008; 张延庆, 2008; 张广权等, 2011; 李晓慧, 2020)。不同的岩相组合具有特殊的测井曲线形态, 分布在特定的沉积微相中, 具有“易识

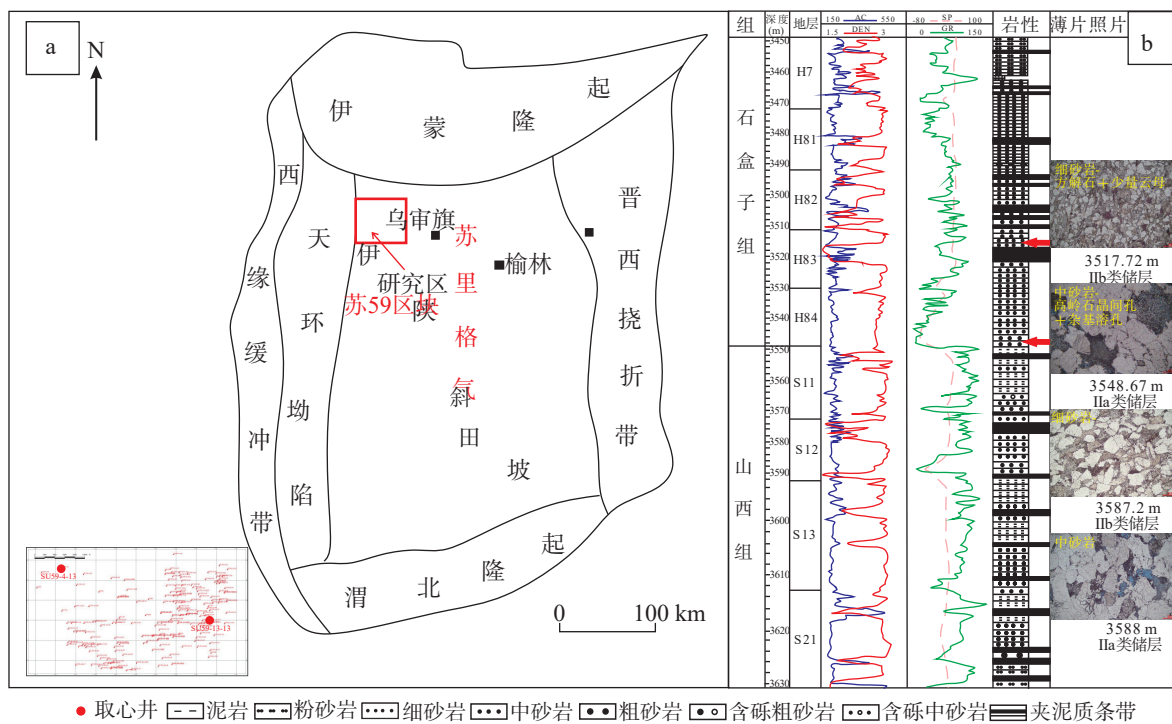
别、可预测”的典型特征。然而,前人已经开展过单一岩相类型及其储层物性特征等方面研究(覃伟, 2011; 叶爽清, 2015; 印森林等, 2016; 张荣, 2016; 魏修平等, 2019; 林建力等, 2019; Zhang et al., 2020), 但岩相组合对储层物性的影响尚不明确。

鄂尔多斯盆地苏里格气田上古生界石盒子组和山西组具有良好的开发前景。苏里格气田石盒子组和山西组沉积在海陆过渡沉积环境, 广泛发育三角洲分流河道和水下分流河道砂体, 以中-粗粒的岩屑砂岩以及岩屑石英砂岩为主。笔者拟通过岩心观察分析、薄片鉴定、图像分析对苏里格气田石盒子组和山西组开展岩石学特征研究, 划分岩相类型和岩相组合,

并从岩性、粒度、压实强度、溶蚀程度等特征进行分析, 明确岩相组合对砂岩储层物性的控制作用。

1 地质背景

苏里格气田是中国陆上发现的最大的天然气田, 位于长庆靖边气田西北侧的苏里格庙地区(图 1a)。区域构造属于鄂尔多斯盆地陕北斜坡北部中带(图 1), 行政区属内蒙古自治区鄂尔多斯市的乌审旗和鄂托克旗所辖, 勘探范围西起内蒙古鄂托克前旗、北抵鄂托克后旗的敖包加汗, 勘探面积约 20 000 km²(汪正江等, 2002; 王光强, 2010)。



a. 区域构造位置图; b. SU59-13-51B 井地层综合柱状图

图1 研究区位置及地层综合柱状图

Fig. 1 Comprehensive histogram of the location and stratigraphy of the study area

苏里格气田上古生界自下而上发育石炭系本溪组、二叠系山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组, 总厚度 700 m 左右。中二叠世下石盒子组初期伴随区域构造活动继续加剧, 北部物源区持续抬升, 丰富的物源碎屑导致河流沉积体系快速向南推移, 致使冲积平原向南增大, 湖泊相区缩小。该期岩相古地理面貌特征与山西期有一定的继承性, 也发生了较大的变化, 以多河道的辫状河与曲流河交替发育为主要特征, 多心滩、边滩沉积, 河道相互

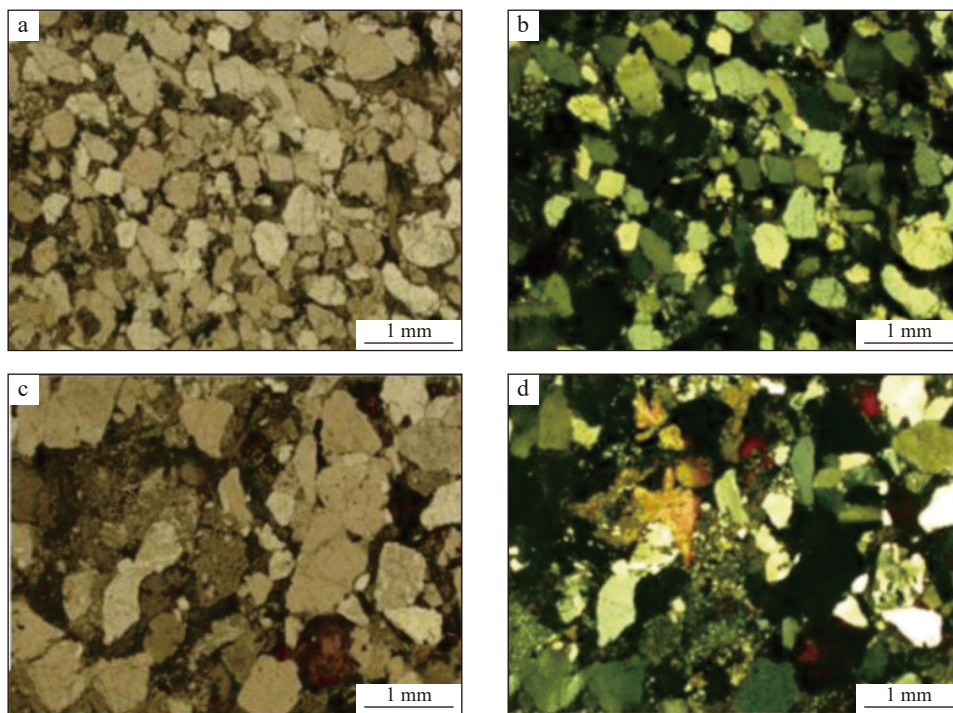
叠置, 砂体厚度较山西组有较大增加。在山西组, 早期的时候, 发生强烈的构造活动, 北部物源区迅速上升(汪正江等, 2002; 陈昭佑等, 2010; 谭晨曦, 2010), 使研究区在该时期形成大面积的砂体发育区。受古气候影响, 山西组沉积期沼泽普遍发育, 发育多套煤层。早二叠世山西期沉积在海陆过渡的三角洲环境, 山西组下部发育三角洲前缘相, 上部发育三角洲平原相(袁芳政, 2008; 陈洪德, 2011; 张广权, 2011)。石盒子组和山西组三角洲平原相发育分流

河道、分流间湾、天然堤、决口扇、泛滥洼地和泥炭沼泽微相;三角洲前缘发育水下分流河道、水下分流间湾和河口坝微相(王少鹏, 2006; 郑婷, 2015)。依据沉积旋回, 研究区石盒子组由上而下分为盒8-3至盒8-4两个小层, 盒8段上段以暗紫红色、紫红色泥岩、粉砂岩、泥岩为主, 夹薄~中厚层状棕红色、浅棕红色细砂岩、中砂岩; 中段以暗紫色、暗紫红色、深灰色、灰绿色泥岩为主夹浅灰色细砂岩; 下段为中厚~厚层状浅灰色、灰白色细砂岩、中砂岩、含砾粗砂岩为主、薄层深灰色泥岩、粉砂质泥岩; 底部为厚层状灰白色小砾岩; 而山西组由下而上分为山1和山2段, 并可进一步细分为S1-1至S2-2五个小层(图1)。山1段岩性为砾质砂岩、含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩、泥岩和煤层, 且煤层在山1

段最为发育; 山2段岩性与山1段基本一致, 但煤层厚度较薄(罗东明等, 2008; 万旸璐, 2016)。

2 岩相类型

通过苏里格气田西部的SU59-4-13、SU59-13-51B的岩心观察和薄片分析, 石盒子组盒8和山西组12主要发育石英砂岩和岩屑石英砂岩, 含少量岩屑砂岩。通过镜下对100余个薄片鉴定结果进行统计, 储集层碎屑主要成分为石英, 碎屑颗粒中石英含量为69%~88%, 石英颗粒平均含量为80.3%; 储集层碎屑次要为变质岩岩屑, 变质砂岩含量较少, 长石含量极低, 胶结物以硅质胶结和铁方解石胶结为主, 杂基以云母和高岭石为主, 少见绿泥石(图2、图3)。



a、b 岩屑石英砂岩 SU59-4-13 井 2 695.07 m S1-2; c、d 岩屑砂岩 SU59-13-51B 井 2 695.07 m S1-2

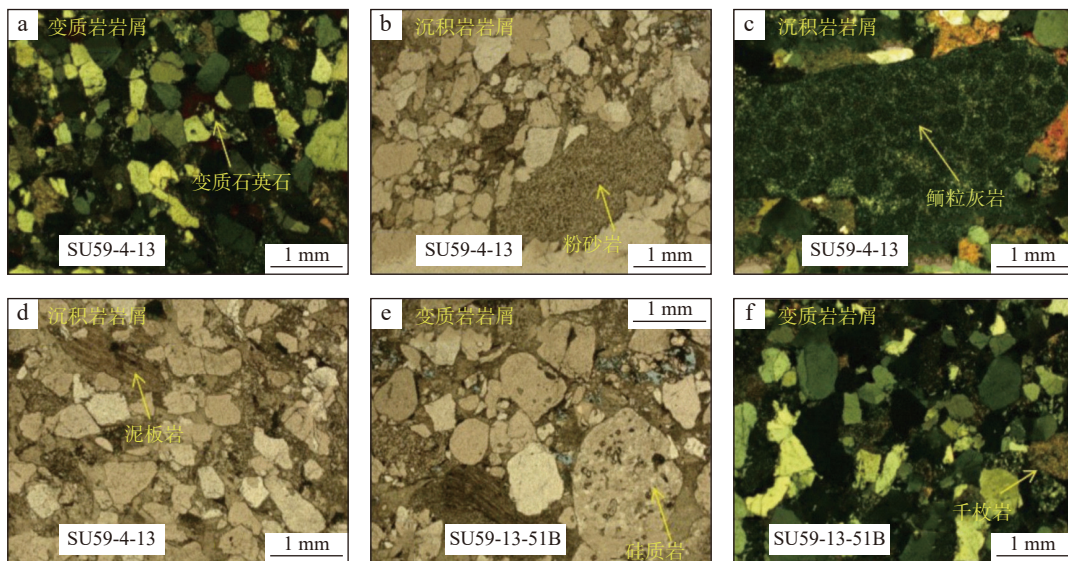
图2 苏59井区石盒子组和山西组岩石中主要岩屑类型

Fig. 2 Major rock chip types in rocks of the Shibox Formation and Shanxi Formation in the Su59 well area

苏里格气田西区储集层物性总体表现为低孔隙度、低渗透率的特征。根据岩心物性资料统计, 孔隙度范围4%~12%, 平均为7.24%; 渗透率范围 $0.01 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 孔隙度与渗透率之间具有明显的正相关关系, 表明渗透率的变化主要受控于孔隙度的发育程度(张春英等, 1995)。其中渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩可视为良好的储层, 渗

透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩物性较差(赵靖舟, 2012; 王少飞, 2013)。

石盒子组和山西组三角洲平原分流河道以及辫状河心滩微相砂岩的粒度普遍较粗, 根据取心段岩心描述与统计的结果, 中粒以上的砂岩占总砂岩厚度90%以上, 平均厚度在2~5 m之间。根据粒度分析结果, 山西组砂岩的粒度中值 Φ 为-1.08~3.98, 平均



a. 变质岩岩屑 变质石英岩 SU59-4-13 井 2 660.33 m S2-1; b. 沉积岩岩屑 粉砂岩 SU59-4-13 井 2 600.76 m S1-2; c. 沉积岩岩屑 鲕粒灰岩 SU59-4-13 井 2 660.33 m S2-1; d. 沉积岩岩屑 泥板岩 SU59-4-13 井 2 597.27 m S1-2; e. 变质岩岩屑 SU59-13-51B 井 2 621.82 m S1-1; f. 变质岩岩屑 SU59-13-51B 井 2 551.12 m S2-2

图3 苏59井区山西组岩石中主要岩屑类型

Fig. 3 Main rock chip types in the rocks of Shanxi Formation in Su59 well area

为 0.64, 粒度较粗; 标准偏差为 0.28~1.05, 分选好至中等; 偏度普遍大于 0, 具有明显的正偏态。砂岩结构普遍具有颗粒支撑特征, 局部含泥中砂岩具有杂基支撑结构。颗粒支撑砂岩的碎屑颗粒之间普遍呈线接触, 仅部分样品可见点接触特征, 指示了较强的压实作用。

研究区三角洲平原分流河道和心滩微相砂岩的沉积构造特征明显, 主要发育粒序层理、纹层层理、槽状交错层理、板状交错层理、和平行层理。根据研究区沉积构造和岩石粒度差异, 可将盒 8 段主要划分为 5 类岩相(图 4、表 1)。

3 岩相组合

层理类型和粒度是沉积水动力条件的直接反映(刘忠群, 2008; 李成等, 2015), 岩相类型能够反映一段时期内的水动力条件, 而岩相组合能够反映河道沉积期内的水动力条件的变化特征。本研究根据纵向上岩石粒度变化, 将岩相组合分为向上变细的正韵律组合和向上变粗的反韵律组合以及先变细再变粗的复合韵律组合(图 5)。复合韵律组合为由多个正/反韵律相互叠置构成, 表现为上部与下部粗-中砂岩与煤层互层, 中部夹杂含泥中砂岩的复合韵律特征; 复合韵律组合指示了河道水动力条件较强但不稳定, 组合



a. 含砾粗砂岩相, 发育交错层理, 3 528.2 m, 苏 59 井; b. 灰黑色泥岩相, 见碳质纹层, 3 608.4 m, 苏 59-13-51B 井; c. 沙纹层泥质粉砂岩相, 可见明显的沙纹层理构造, 3 532.6 m, 苏 59 井; d. 含砾粗砂岩相, 3 531.05 m, 苏 59-13-51B 井; e. 细-中砂岩相, 断面可见碳质, 3 548.74 m, 苏 59-13-51B 井

图4 山西组不同粒度砂岩类型

Fig. 4 Types of sandstones with different grain sizes in the Shanxi Formation

中部发育的含泥中砂岩具有密度流的特点。正韵律组合具有下粗上细的结构, 下部发育中-粗砂岩, 中部

表 1 鄂尔多斯气田研究区主要岩相类型

Tab. 1 Main lithological types in the Ordos gas field study area

粒度分级	沉积构造	岩相类型
(含砾)粗砂岩	板状交错层理	板状交错层理粗砂岩
	块状层理	块状层理中砂岩
中砂岩	平行层理	平行层理中砂岩
	小型交错层理	小型交错层理中砂岩
细-中砂岩	平行层理	平行层理细-中砂岩
细砂岩	平行层理	平行层理细砂岩
粉砂岩	小型交错层理	小型交错层理细砂岩

发育中砂岩、上部发育粉-细砂岩,具有河道沉积充填的典型特征;反韵律组合砂体垂向粒度变化表现为下细上粗的渐变,上部发育粗-中砂岩,下部发育粉-细砂岩,具有河口坝沉积充填的特征。

根据对研究区对两口井取心井的分析,石盒子组砂体垂向上主要以正韵律、反韵律和符合韵律为主而山西组砂体垂向上主要以正韵律和复合韵律为主,粒度向上逐渐变细的正韵律最常见。通过对取心段的统计,3类岩相组合所发育的岩相类型存在较大差异(图6)。岩相组合和岩相组合Ⅱ的岩相类型中粒度整体较粗,粗砂岩/中-粗砂岩所占比例较高,且以块状层

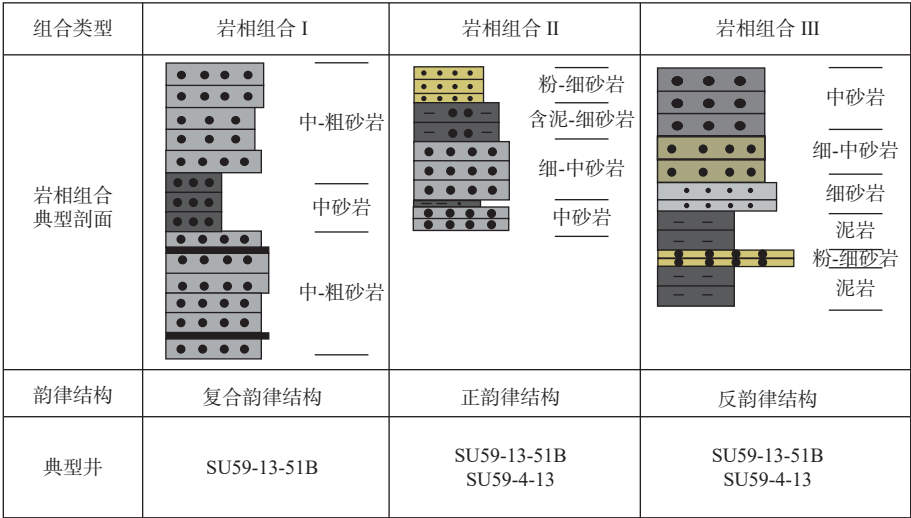


图5 研究区发育的岩相组合类型

Fig. 5 The lithofacies assemblies of Formation in the study area

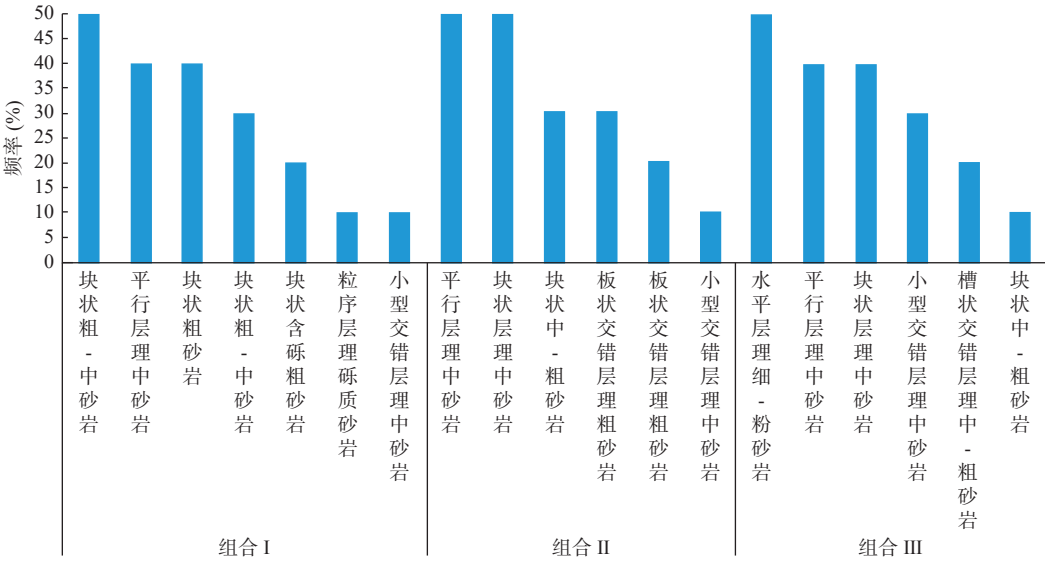


图6 研究区不同岩相组合所发育的单一岩相类型

Fig. 6 The lithofacies type in the different lithofacies assemblies of Study area

理为主。岩相组合 III 的岩相类型的粒度偏细。

4 讨论

4.1 不同岩相和岩相组合储层的孔渗特征

苏 59 井区山西组为海相-陆相沉积体系。在砂体垂向相主要以正韵律和复合韵律为主,从整体来看表现为粒度向上变细的正韵律。且正韵律往往在砂体下部分布于高孔渗的物性值,向上逐步过渡减小;复合韵律在单砂体内部渗透率变化规律并不显著,垂向表现出高低渗透率交替出现。

通过对取心井 76 个柱塞样品孔渗数据分析,相比石盒子组山西组含砾粗砂岩、粗砂岩、中-粗砂岩的物性相对较好,孔隙度普遍大于 4%,渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。含泥中砂岩和中砂岩物性较差,排除微裂缝的样品,渗透率普遍低于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。山西组主要岩相类型的孔渗差异明显。据前人研究,苏里格气田低渗透致密砂岩储层可分为 4 种类型:①渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩储层。②渗透率介于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩储层。③渗透率在 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的砂岩储层。④渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩储层。其中渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩储层可视为良好储层,渗透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩储层物性较差,在勘探开发过程中通常只将前两种砂岩储层作为开发对象(赵靖舟, 2012; 王少飞, 2013)。

通过对平均孔隙度和平均渗透率的统计,物性最

好的岩相为粒序层理含砾中砂岩、块状含砾粗砂岩、板状交错层理粗砂岩和块状粗砂岩,平均孔隙度大于 8%,平均渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 7、图 8)。根据不同岩相组合中这 4 类相对高孔渗岩相发育程度的统计,在复合韵律组合 I 和正韵律组合 II 中相对高孔渗岩相更加发育,且组合 II 中最发育(图 9)。由此可见,岩相组合之间存在物性差异主要与所发育的岩相类型有关。

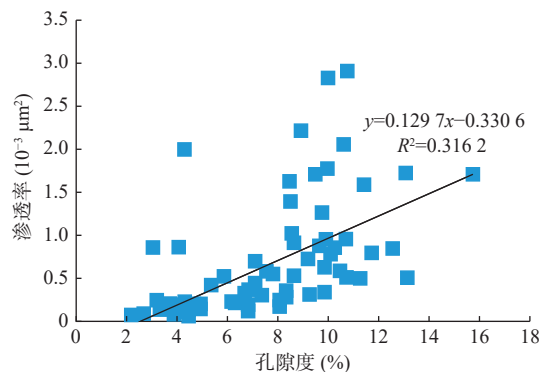


图7 苏 59 井区组孔隙度与渗透率相关图

Fig. 7 Porosity versus permeability correlation plot for the Su 59 well formation

4.2 不同岩相组合和杂基含量

研究区山西组砂岩段岩石组合 I 杂基含量较低且黏土以伊利石为主,石英含量高,胶结物含量较少; II 类岩石组合杂基含量较高,压实程度相对较高,高岭石含量较高,石英含量较低,溶蚀程度较强; III 类岩

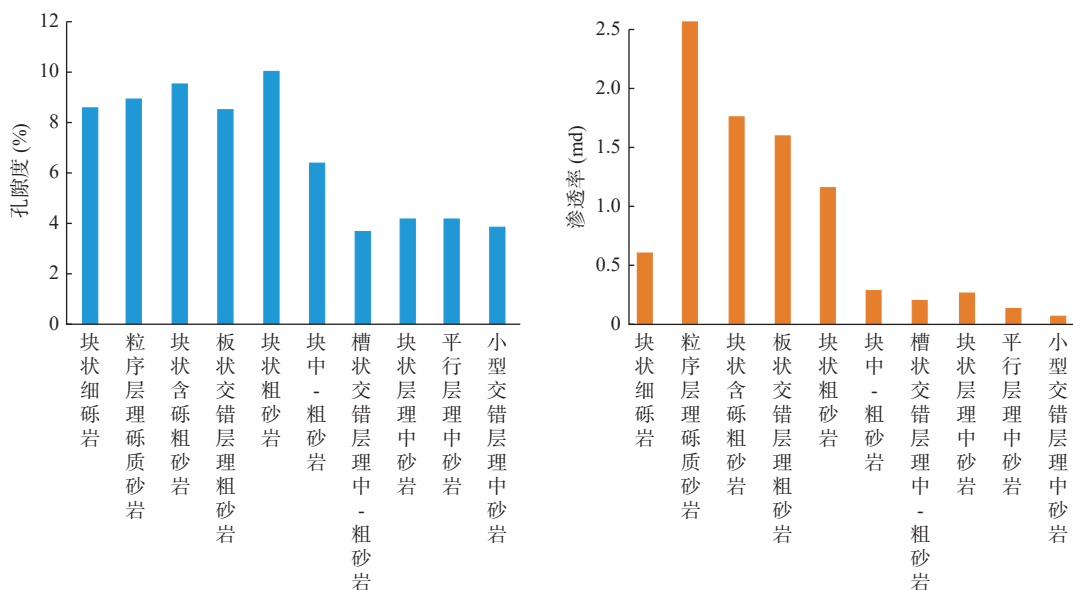


图8 苏 59 井区不同岩相类型的平均孔隙度和渗透率

Fig. 8 The average porosity and permeability of different lithofacies from the Study area

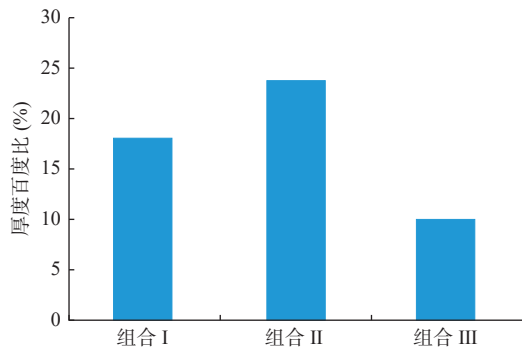


图9 苏59井区不同岩相组合中相对高孔渗岩相类型厚度百分比

Fig. 9 Comparison of development frequency of relatively high porosity and permeability facies types in different lithofacies assemblages of Study area

石组合, 杂基含量高, 压实程度高, 高岭石含量低, 溶蚀程度低(图10)。

4.3 不同岩相组合砂岩的岩石成分差异

由于不同岩相组合形成的沉积水动力条件不同, 会导致岩石组成的不同, 对储层物性产生明显影响。通过XRD全岩分析表明, 研究区砂岩的碎屑颗粒都以石英为主, 其次为岩屑, 几乎未见长石。岩屑组分包括沉积岩岩屑、变质岩岩屑、火山岩岩屑、云母以及少量燧石, 且以沉积岩岩屑为主。通过对研究区体薄片进行统计分析可知, 在岩相组合I和II中石英含量高于组合III, 但岩屑含量低于组合III, 而在岩石组合III中石英含量相对较低而岩屑含量较高, 特别是沉积岩岩屑分布较多(图11)。不同类型的岩屑的抗压能力差异较大, 沉积岩岩屑中碳酸盐岩岩屑抗压能力最强, 其次为粉砂岩岩屑, 泥岩岩屑最易于压实。

通过对杂基含量与物性关系的分析, 表明研究区山西组颗粒支撑的砂岩中杂基的含量与孔隙度和渗

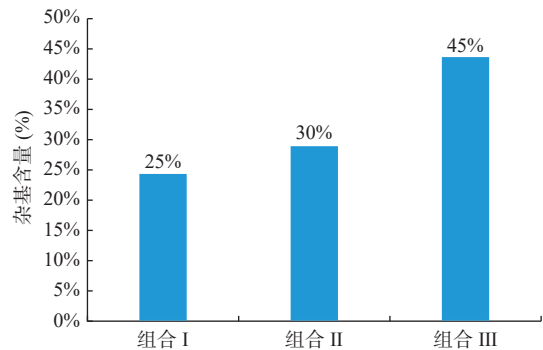


图10 研究区山西组地区杂基含量直方图

Fig. 10 Histogram of heterogeneous group content in Group area of Su59 well area

透率均存在明显的正相关性(图12)。通过对不同岩相组合中所发育砂岩的杂基含量的统计对比, 发现组合III中的杂基含量明显高于组合I和组合II, 是造成岩相组合III物性相对较差的主要原因。

4.4 不同岩相组合的溶蚀程度差异

根据对研究区山西组成岩作用类型的分析, 溶蚀作用的结果导致了砂岩中次生孔隙的形成。压实作用和溶蚀作用对储层的发育具有明显影响。压实作用的强度与颗粒粒径、塑性颗粒含量、埋藏深度等因素有关。压实相对较弱的砂岩能够保留较多连通性好的原生孔隙, 形成相对高渗的储层。反之, 在胶结作用较弱的砂岩中, 原生孔较发育指示所经历的压实作用相对较弱。通过统计3类岩相组合的原生孔发育程度, 岩相组合I和岩相组合II中的原生孔所占比例明显高于组合III(图13、图14), 表明在较高的石英含量和相对较少的沉积岩岩屑的岩石组成背景下岩相组合I和II砂岩所经历的岩石作用程度相对于组合III低。

研究区山西组颗粒支撑结构的砂岩中溶蚀作用

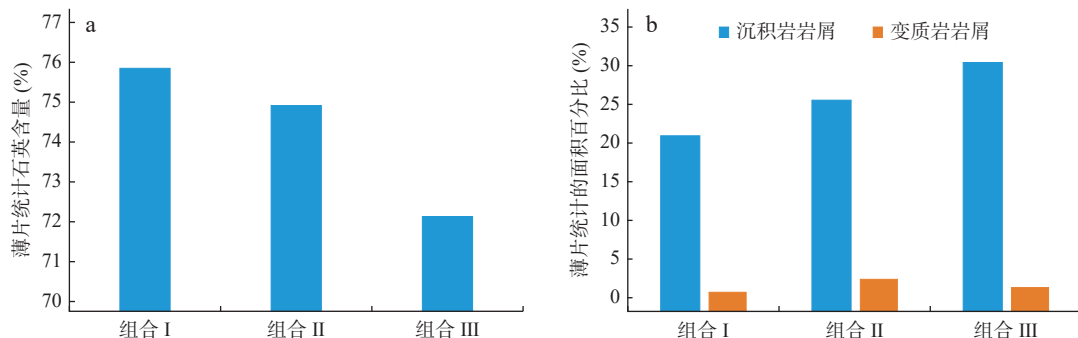
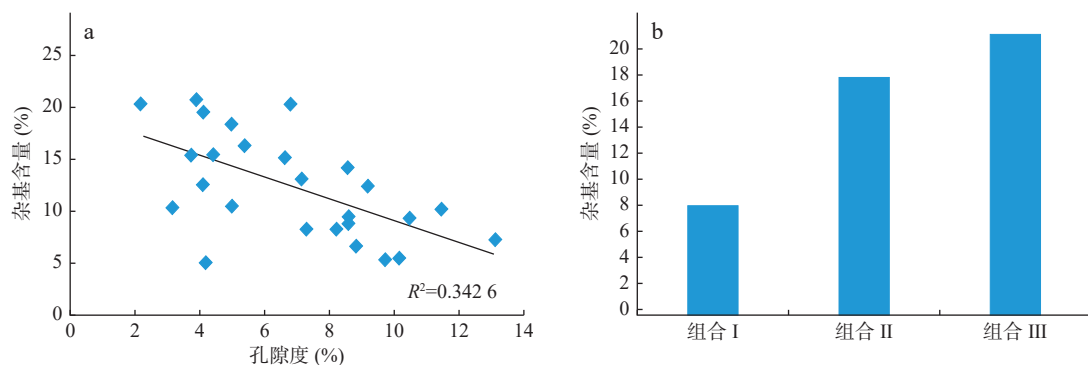


图11 研究区不同岩相组合的砂岩岩石组成特征

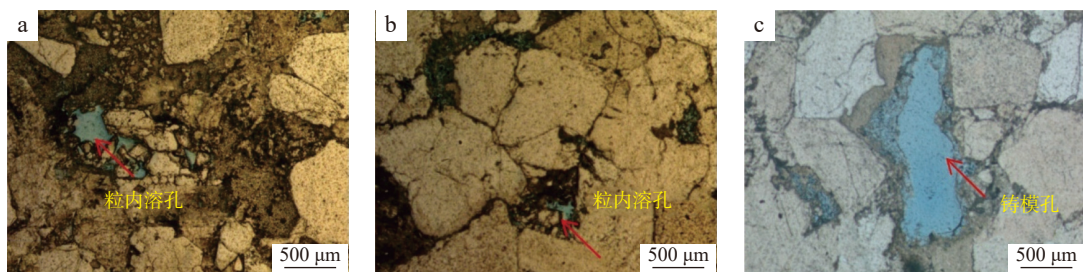
Fig. 11 Petrographic composition of sandstones developed in different lithofacies assemblages of the Study area



a. 杂基含量与孔隙度相关性图; b. 不同岩相组合中所发育的砂岩的平均杂基含量对比图

图12 研究区砂岩中的杂基含量及其对储层物性的影响

Fig. 12 The matrix content of sandstone in the Study area and its influence on reservoir physical properties



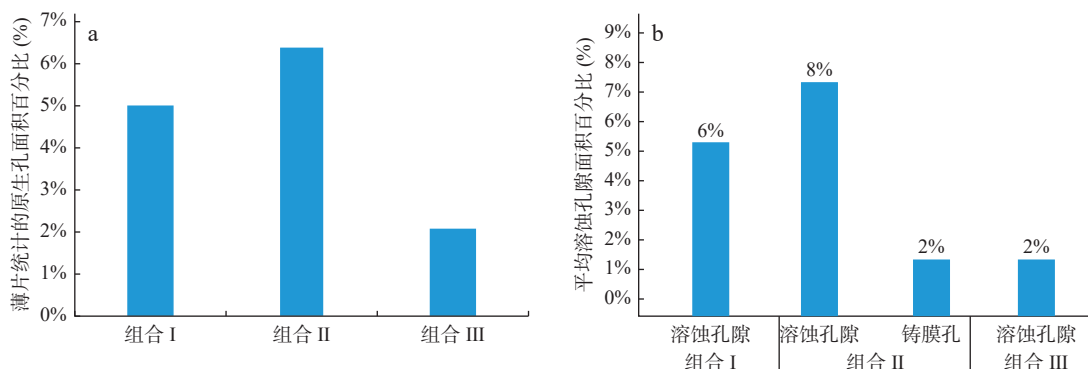
a. 粒内溶孔 SU59-4-13 井 2 668.9 m S2-1; b. 粒内溶孔 SU59-4-13 井 2 705.01 m S1-3; c. 铸模孔 SU59-4-13 井 2 702.7 m S1-3

图13 研究区储集空间类型

Fig. 13 Types of reservoir space in the study area

普遍发育,但发育程度差异较大,局部甚至可见强烈溶蚀形成的矿物铸模孔。通过对研究区砂岩铸体薄片和扫描电镜观察,山西组砂岩溶孔大部分为岩屑溶蚀后形成,部分为长石溶蚀后形成,并在溶孔中残留较多蠕虫状自生高岭石(图15)。溶蚀作用的程度与压实程度密切相关,在压实相对较弱的砂岩中后期有

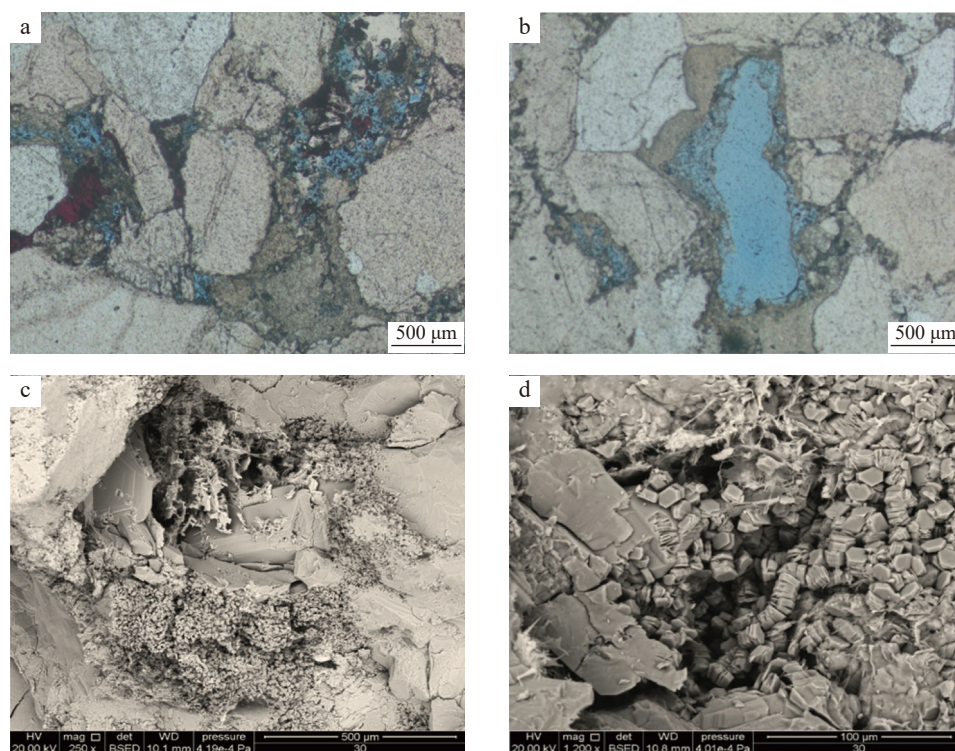
机酸易于流动循环,促使溶蚀作用的进行。不同岩相组合的次生溶蚀孔隙的发育程度存在明显差异。岩相组合 I 和组合 II 溶蚀孔较为发育,并且在岩相组合 II 砂岩中发育一定铸模孔(图4~图9)。这种溶蚀差异是由岩相组合的原始物质组成而产生的,由岩相组合 I 和组合 II 的较高的石英含量和较低的沉积岩岩屑



a. 不同岩相组合的原生孔发育程度对比; b. 不同岩相组合的溶蚀孔发育程度对比

图14 山西组不同岩相组合的砂岩中原生孔和溶蚀孔发育程度对比图

Fig. 14 Comparison of the degree of development of primary and dissolution pores in sandstones of different lithological assemblages of the Shanxi Formation



a.粒内溶孔和残余粒间孔, SU59-13-51B井, H83; b.铸模孔, SU59-4-13B井, S1-2; c.岩屑溶蚀孔, SU59-4-13B井, S2-1;
d.长石溶蚀孔被自生高岭石充填, SU59-13-51B井, S2-1

图15 研究区砂岩溶蚀孔发育特征

Fig. 15 Characteristics of dissolved pores in sandstones of the Study area

含量导致在压实过程中仍然能够保留一定数量的原生孔,从而使溶蚀作用较强。

5 结论

(1)苏里格气田盒8段岩屑石英砂岩和岩屑砂岩为主;山西组主要以石英砂岩和岩屑石英砂岩为主,分选程度中等至好,颗粒间以线接触为主。根据岩石粒度和沉积构造,研究区主要岩相类型可划分为5种。根据岩性的韵律变化特征,可将岩相组合划分为3种类型,分别为复合韵律组合、正韵律组合和反韵律组合,其中反韵律组合砂岩粒度偏细。

(2)研究区不同岩相的物性差异明显,相对高孔渗岩相为粒序层理砾质砂岩、块状含砾粗砂岩、板状交错层理粗砂岩和块状粗砂岩,平均孔隙度大于8%,平均渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。复合韵律和正韵律岩相组合中相对高孔渗岩相所占比例较高,是两类有利的岩相组合。

(3)原始物质组成导致了不同岩相组合的物性差异。复合韵律和正韵律岩相组合相对于反韵律组合

的石英含量较高,沉积岩岩屑含量较低,杂基含量较低,导致在压实过程中保留了一定原生孔,并且形成较多的溶蚀孔隙,使其孔隙度和渗透率相对较高。

参考文献(References):

- 白慧,杨国平,杨特波,等.致密碳酸盐岩气藏井位优选技术及其应用——以苏里格气田东区为例[J].西北地质,2020,53(3): 264-272.
- BAI Hui, YANG Guoping, YANG Tebo, et al. Research and Application of Well Location Optimization Technique in Tight Carbonate Gas Reservoir: A Case Study of the Eastern Part of Sulige Gas Field[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(3): 264-272.
- 白慧,颜学成,王龙,等.苏里格气田东区奥陶系马家沟上组合储层特征及主控因素分析[J].西北地质,2015,48(1): 221-228.
- BAI Hui, YAN Xuecheng, WANG Long, et al. Analysis on the Main Controlling Factors and Characteristics of the Upper Combination of Ordovician Majiagou Formation in the Eastern Part of Sulige Gasfield[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(1): 221-228.
- 白涛.鄂尔多斯盆地大牛地气田储层评价与产能主控因素分析[D].成都:成都理工大学,2008.

- Bai Tao. Reservoir evaluation and analysis of production capacity controlling factors of Da Niu Di gas field in Ordos Basin[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology, 2008.
- 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 on the depositional environment of the Shanxi Formation in the Ordos Basin and its geological revelation[J]. Journal of Petrology, 2011, 27(8): 2213-2229.
- 陈俊亮, 吴亮, 崔建军. 大牛地气田沉积相特征[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2004, 28(2): 89-94.
- CHEN Junliang, WU Liang, CUI Jianjun. Characteristics of sedimentary phases in the Da Niu Di gas field[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science Edition), 2004, 28(2): 89-94.
- 陈克勇, 张峭楠, 丁晓琪, 等. 致密砂岩储层的含气性评价[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2006, (4): 65-68.
- CHEN Keyong, ZHANG Shaonan, DING Xiaoqi, et al. Evaluation of gas content in tight sandstone reservoirs[J]. Journal of Petroleum and Natural Gas (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2006, (4): 65-68.
- 陈昭佑, 王光强. 鄂尔多斯盆地大牛地气田山西组砂体组合类型及成因模式[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 632-639.
- CHEN Zhaoyou, WANG Guangqiang. Sand body assemblage type and genesis mode of Shanxi Formation in Danyudi Gas Field, Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2010, 31(5): 632-639.
- 董会, 李宏, 王志海, 等. 应用有机包裹体研究天然气成藏特征——以鄂尔多斯盆地苏里格气田西部山 1 段为例[J]. 西北地质, 2016, 49(2): 248-256.
- DONG Hui, LI Hong, WANG Zhihai, et al. Application of Organic Fluid Inclusion to Study the Characteristics of Gas Reservoir Formation: Example from the Sulige Gas Field in Western Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2016, 49(2): 248-256.
- 胡一然. 大牛地气田山西组岩相及沉积相平面分布研究[D]. 成都:成都理工大学, 2015.
- HU Yiran. Study on petrographic and sedimentary phase plane distribution of Shanxi Formation in Da Niu Di gas field[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology, 2015.
- 李成, 邱琼, 梁宇晨, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田山 1 段沉积微相研究[J]. 河南科技, 2015, (4): 103-104.
- LI Cheng, QIU Qiong, LIANG Yuchen, et al. Study on sedimentary microphase of Shan 1 section of Da Niu Di gas field in Ordos Basin[J]. Henan Science and Technology, 2015, (4): 103-104.
- 罗东明, 谭学群, 游瑜春, 等. 沉积环境复杂地区地层划分对比方法——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 38-44.
- LUO Dongming, TAN Xuequn, YOU Yuchun, et al. Comparative methods of stratigraphic delineation in areas with complex depositional environments-A case study of the Da Niu Di gas field in the Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2008, 29(1): 38-44.
- 林建力, 张宪国, 林承焰, 等. 岩相约束下的深层致密砂岩气藏储层演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 886-899.
- LIN Jianli, ZHANG Xinguo, LIN Chengyan, et al. Reservoir evolution characteristics of deep tight sandstone gas reservoirs under petrographic constraints[J]. Oil and Gas Geology, 2019, 40(4): 886-899.
- 雷开强. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上古生界储层特征及分布规律研究[D]. 成都:成都理工大学, 2003.
- LEI Kaiqiang. Characteristics and distribution law of upper Paleozoic reservoirs in Tabamiao area, Ordos Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2003.
- 李晓慧. 主流线叠合法在分流河道演化特征分析中的应用[J]. 特种油气藏, 2020, 27(2): 22-29.
- LI Xiaohui. Application of the mainstream line stacking method in the characterisation of diversion channel evolution[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2020, 27(2): 22-29.
- 刘忠群, 胡杨. 大牛地气田山西组山 1 段储层孔隙结构特征[J]. 断块油气田, 2008, (5): 37-39.
- LIU Zhongqun, HU Yang. Characteristics of pore structure of reservoir in Shan 1 section of Shanxi Formation in Da Niu Di gas field[J]. Broken Block Oil and Gas Field, 2008, (5): 37-39.
- 孟德伟, 贾爱林, 冀光, 等. 大型致密砂岩气田气水分布规律及控制因素——以鄂尔多斯盆地苏里格气田西区为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 607-614+635.
- MENG Dewei, JIA Ailin, JI Guang, et al. Gas-water distribution law and controlling factors of large-scale tight sandstone gas field-taking the western part of Surig gas field in Ordos Basin as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 607-614+635.
- 邱隆伟, 陈昭佑, 黎成银, 等. 大牛地气田致密砂岩气藏储层物性的控制因素研究[A]. 中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会, 中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会, 中国地质学会沉积地质专业委员会, 等. 第十二届全国古地理学及沉积学学术会议论文摘要集[C]. 2012, 3.
- 魏修平, 胡向阳, 李浩, 等. 致密砂岩气藏水平井测井评价——以鄂尔多斯盆地大牛地气田 X 井区为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 1084-1094.
- WEI Xiuping, HU Xiangyang, LI Hao, et al. Evaluation of horizontal well logging in tight sandstone gas reservoirs-taking the example of X-well area of Da Niu Di gas field in Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2019, 40(5): 1084-1094.
- 覃伟. 大牛地气田上古生界流体特征与天然气运移规律研究[D]. 成都:成都理工大学, 2011.
- QIN Wei. Research on fluid characteristics and natural gas transport law in the upper Paleozoic of Da Niu Di gas field[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology, 2011.
- 谭晨曦. 大牛地气田上古生界沉积相及储层研究[D]. 西安:西北大学, 2010.
- TAN Chenxi. Sedimentary phases and reservoirs in the Upper Paleozoic of Da Niu Di gas field[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.

- 田清华, 刘俊, 李浮萍, 等. 苏里格气田奥陶系马家沟组马五段碳酸盐岩(准)同生期岩溶作用特征[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 146–156.
- TIAN Qinghua, LIU Jun, LI Fuping, et al. Characteristics of Penecontemporaneous Karstification in Ordovician Majiagou Formation, Sulige Gas Field, Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 146–156.
- 王光强. 大牛地气田致密砂岩储层成因及评价研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2010.
- WANG Guangqiang. Study on the genesis and evaluation of dense sandstone reservoirs in Da Niu Di gas field[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010.
- 汪正江, 陈洪德, 张锦泉. 鄂尔多斯盆地晚古生代沉积体系演化与煤成气藏[J]. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(2): 18–23.
- WANG Zhengjiang, CHEN Hongde, ZHANG Jinquan. Evolution of the Late Paleozoic sedimentary system and coal gas deposits in the Ordos Basin[J]. *Sedimentary and Tethys Geology*, 2002, 22(2): 18–23.
- 王少飞, 安文宏, 陈鹏, 等. 苏里格气田致密气藏特征与开发技术[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 138–145.
- WANG Shaofei, AN Wenhong, CHEN Peng, et al. Characteristics and development technology of tight gas reservoirs in Surig gas field[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(1): 138–145.
- 王少鹏. 塔巴庙地区太原组砂体展布研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- WANG Shaopeng. Study on the spreading of sand bodies of the Taiyuan Formation in the Tabamiao area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- 王旻璐, 李仲东, 彭超, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田山二段致密砂岩储层特征及评价[J]. 矿物岩石, 2016, 36(3): 106–114.
- WAN Yanglu, LI Zhongdong, PENG Chao, et al. Characteristics and evaluation of dense sandstone reservoirs in the Shan II section of the Da Niu Di gas field in the Ordos Basin[J]. *Mineral Rocks*, 2016, 36(3): 106–114.
- 袁芳政. 大牛地气田盒3段沉积环境及高产气层储集特征[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(2): 18–20+10.
- YUAN Fangzheng. Sedimentary environment and reservoir characteristics of high-yielding gas reservoirs in Box 3 section of Da Niu Di gas field[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2008, 22(2): 18–20+10.
- 印森林, 陈恭洋, 张玲, 等. 岩相构型对致密砂岩优质储层的控制作用—以川西坳陷须二段为例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(7): 1179–1189.
- YIN Senlin, CHEN Gongyang, ZHANG Ling, et al. The controlling role of petrographic configuration on the quality reservoirs in dense sandstone—The case of Shu II section in the West Sichuan depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(7): 1179–1189.
- 叶爽清, 胡望水, 王闯, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地大47-大70井区岩相组合[A]. 中国地质学会沉积地质专业委员会, 中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会. 2015年全国沉积学大会沉积学与非常规资源论文摘要集[C]. 2015, 2.
- 张春英, 孟凡儒, 石梅, 等. 大庆油田微生物提高采收率的矿场试验[J]. 石油学报, 1995, 16(1): 88–95.
- ZHANG Chunying, MENG Fanru, SHI Mei, et al. Mining test of microbial enhanced recovery in Daqing oilfield[J]. *Journal of Petroleum*, 1995, 16(1): 88–95.
- 张广权, 陈舒薇, 郭书元. 鄂尔多斯地区东北部大牛地气田山西组沉积相[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 388–396+403.
- ZHANG Guangquan, CHEN Shuwei, GUO Shuyuan. Sedimentary phases of the Shanxi Formation in the Daniudi gas field, north-eastern Ordos area[J]. *Oil and Gas Geology*, 2011, 32(3): 388–396+403.
- 张洪洁. 大牛地气田中部山西组砂体成因及对油气分布的控制作用[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- ZHANG Hongjie. Genesis of the sand body of Shanxi Formation in the central part of Da Niu Di gas field and its control on hydrocarbon distribution[D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, 2020.
- 赵靖舟, 白玉彬, 曹青, 等. 鄂尔多斯盆地准连续型低渗透-致密砂岩大油田成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 811–827.
- ZHAO Jingzhou, BAI Yubin, CAO Qing, et al. Reservoir formation model of quasi-continuous low-permeability tight sandstone oilfield in Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2012, 33(6): 811–827.
- 张荣. 大牛地地区低孔渗储层评价及产能预测[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- ZHANG Rong. Evaluation and capacity prediction of low porosity permeable reservoirs in Da Niu Di area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- 郑婷. 大牛地气田山2段致密砂岩气层评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- ZHENG Ting. Evaluation of dense sandstone gas layer in Shan 2 section of Da Niu Di gas field[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- 张延庆. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区低孔渗砂岩中优质储层预测技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- ZHANG Yanqing. Research on the prediction technology of high quality reservoir in low porosity sandstone in Tabamiao area of Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.
- Zhang Xiaojun, Fu Meiyan, Deng Hucheng, et al. The differential diagenesis controls on the physical properties of lithofacies in sandstone reservoirs from the Jurassic Shaximiao Formation, western Sichuan depression, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 193: 107413.