



引文格式:高雅宁,张少华,姜志豪,等.延安气田延川东区山西组致密砂岩储层特征及有利区预测[J].西北地质, 2026, 59(1): 244–257. DOI: 10.12401/j.nwg.2025116

Citation: GAO Yaning, ZHANG Shaohua, JIANG Zhihao, et al. Characteristics of Shanxi Formation Tight Sandstone Reservoir in Yanchuan East Area of Yan'an Gas Field and Prediction of Favorable Areas[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 244–257. DOI: 10.12401/j.nwg.2025116

延安气田延川东区山西组致密砂岩 储层特征及有利区预测

高雅宁^{1,2,*}, 张少华^{1,2,*}, 姜志豪^{1,2}, 张龙^{1,2}

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学,
陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要:延安气田延川东区山西组致密砂岩储层具有复杂的岩石学特征与非均质性,明确其储层特征及有利区分布对天然气勘探开发具有重要意义。笔者通过岩石薄片鉴定、高压压汞实验、物性分析等手段,系统研究了山西组储层的岩石组分、孔隙结构、物性特征及成岩演化过程。结果表明:山西组储层以岩屑石英砂岩为主,石英平均含量为 67.1%~71.8%,发育残余粒间孔、岩屑溶孔及微裂缝,孔喉结构以微细喉型为主,储层整体为特低孔、致密特征。山 2 段储集性能优于山 1 段,其孔隙度平均为 4.74%,渗透率平均为 0.764 mD。储层物性受粒度、塑性岩屑含量及碳酸盐胶结作用控制,粗粒砂岩及低塑性岩屑含量区域物性更优。结合沉积微相、砂体展布及构造特征,预测山 1 段有利区位于研究区中南部,山 2 段有利区呈条带状分布于中部及北部。本研究为鄂尔多斯盆地山西组致密气藏高效勘探提供了重要地质依据。

关键词:山西组;致密砂岩储层;孔隙结构;有利区预测

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)01-0244-14

Characteristics of Shanxi Formation Tight Sandstone Reservoir in Yanchuan East Area of Yan'an Gas Field and Prediction of Favorable Areas

GAO Yaning^{1,2,*}, ZHANG Shaohua^{1,2,*}, JIANG Zhihao^{1,2}, ZHANG Long^{1,2}

(1. School of Earth Science and Engineering, Xi'an University of Petroleum, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology, Shaanxi Province, Xi'an University of Petroleum, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: The tight sandstone reservoir of Shanxi Formation in Yanchuan East Area of Yan'an Gas Field has complex petrological characteristics and heterogeneity. Clarifying its reservoir characteristics and favorable area distribution is of great significance for natural gas exploration and development. This article systematically studied the rock composition, pore structure, physical properties, and diagenetic evolution process of the Shanxi Formation reservoir through methods such as rock thin section identification, high-pressure mercury injection ex-

收稿日期: 2025-05-26; 修回日期: 2025-08-07; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金(42302176), 陕西省自然科学基金基础研究计划“面上项目”(2025JC-YBMS-281)联合资助。

作者简介: 高雅宁(1984–), 男, 讲师, 主要从事矿产资源勘查与评价研究。E-mail: gaoyaning2000@163.com。

* 通讯作者: 张少华(1990–), 男, 副教授, 主要从事油气地质与勘探等方面教学与研究工作。E-mail: zhangshh@xsyu.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

periments, and physical property analysis. The results show that the Shanxi Formation reservoir is mainly composed of lithic quartz sandstone, with an average quartz content of 67.1%~71.8%. Residual intergranular pores, lithic dissolution pores, and microcracks are developed, and the pore throat structure is mainly micro throat type. The overall reservoir is characterized by ultra-low porosity and compactness. The reservoir performance of Shan 2 section is better than that of Shan 1 section, with an average porosity of 4.74% and an average permeability of 0.764 mD. The physical properties of the reservoir are controlled by particle size, plastic rock fragment content, and carbonate cementation, and the physical properties of coarse-grained sandstone and areas with low plastic rock fragment content are better. Based on sedimentary microfacies, sand body distribution, and structural characteristics, it is predicted that the favorable area of Shan 1 is located in the central southern part of the study area, while the favorable area of Shan 2 is distributed in a strip like pattern in the central and northern parts. This study provides geological basis for efficient exploration of tight gas reservoirs in the Shanxi Formation of the Ordos Basin.

Keywords: Shanxi group; tight sandstone reservoir; pore structure; prediction of favorable areas

鄂尔多斯盆地是中国重要的天然气富集区(杨华等, 2012; 孙龙德等, 2019; 田清华等, 2022; 王香增等, 2022), 山西组是上古生界主力产气层系之一(侯晓伟等, 2023; 牛艳伟等, 2023)。近年来, 随着水平井钻探与压裂技术的突破, 鄂尔多斯盆地山西组气藏已实现规模开发, 并展现出良好的潜力, 成为研究热点(Xiong et al., 2019; 单俊峰等, 2022; 段逸飞等, 2024)。

由于致密砂岩储层非均质性较强, 孔隙结构复杂, 物性较差, 致使勘探有利区预测及气藏开采难度较大, 制约了天然气的高效开发(Zhao et al., 2023; 雷涛等, 2023)。前人从不同的角度对致密砂岩储层发育特征与主控因素进行大量的研究, 表明母岩性质、岩石矿物组分、孔隙结构、成岩作用及沉积环境等是导致储层储集性能差异大的主要因素。目前, 山西组储层特征研究多聚焦于盆地北部和延川南部(于兴河等, 2017; 付玉通等, 2018; 陈刚等, 2018; Shao et al., 2019; 黄有根等, 2024), 尤其是针对延川东区山西组储层的矿物组成、成岩作用对孔隙结构的控制机制仍有待进一步研究。

笔者以延川东区山西组为研究对象, 基于岩心观察、薄片鉴定、压汞实验及物性测试数据, 精细刻画储层岩石组分、孔隙类型及孔喉结构特征, 探讨粒度、成岩作用对储层物性的影响, 并结合沉积微相与构造特征预测有利区分布。研究成果不仅深化了对鄂尔多斯盆地致密砂岩储层形成机理的认识, 也为研究区天然气勘探靶区优选提供了科学依据。

1 地质概况

研究区位于鄂尔多斯盆地中部延安气田延川东

区山西组致密砂岩储层(图1)。山西组自上而下可以划分为山1、山2两段(董大忠等, 2021; 赵龙梅等, 2023; 师学耀等, 2025)。山1及山2时期整体位于水下的三角洲前缘亚相带内(Gu et al., 2022; Zhang et al., 2022), 山2时期水体相对较深; 研究区三角洲水下分流河道微相较为发育, 横向连通性较好(李亚龙等, 2017; 曹军等, 2024)。山2段是研究区的主要气层段, 岩性以灰白色细砂岩、石英砂岩为主, 夹黑色-灰黑色泥岩、碳质泥岩和具较好连续性的煤层(4#、5#煤), 地层厚度为50~75 m。山1时期水体进一步降低, 三角洲建设作用得到增强, 水下分流河道发育程度进一步增强, 厚度及横向连通性均变好。山1段地层岩性为灰色、深灰色细-中粒岩屑砂岩、岩屑质石英砂岩为主, 部分地区有薄煤层发育(1#、2#、3#煤), 地层总体厚度为40~60 m。

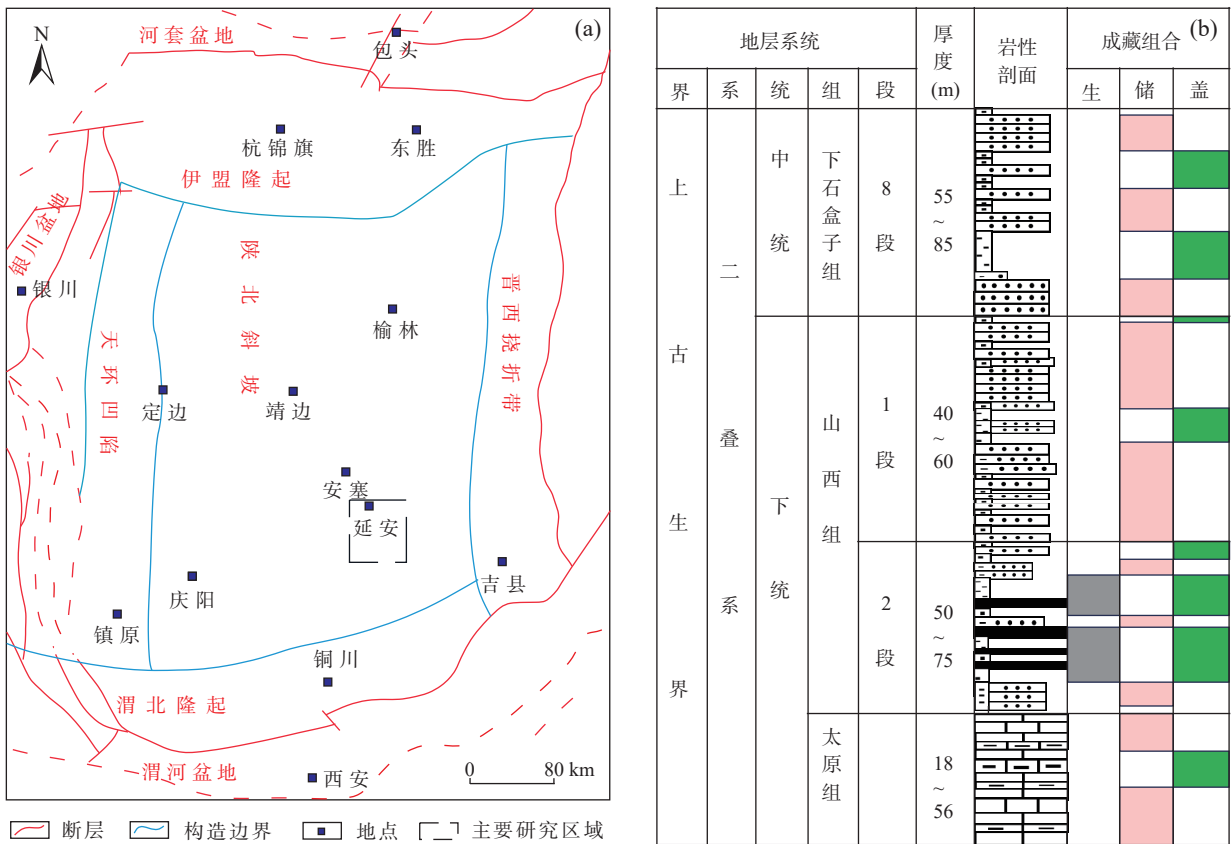
2 岩石学特征

2.1 碎屑成分及含量

延川东区山西组储层碎屑成分以石英为主, 其次为各类岩屑、黏土矿物、云母及少量重矿物(谢梦雨等, 2023; 郭顺等, 2024)。山1段: 石英含量平均为67.1%, 岩屑为31.6%(变质岩屑为主, 占比为22.9%)。山2段: 石英含量平均为71.8%, 岩屑为28.1%(火成岩屑显著增至11.9%, 变质岩屑降至13.1%)。两段砂岩类型相似, 均以岩屑石英砂岩、岩屑砂岩及石英砂岩为主, 但山2段火成岩屑比例更高(图2、图3, 表1)。

2.2 胶结物特征

取心井山1段储层以中-粗粒为主(粒径为0.4~



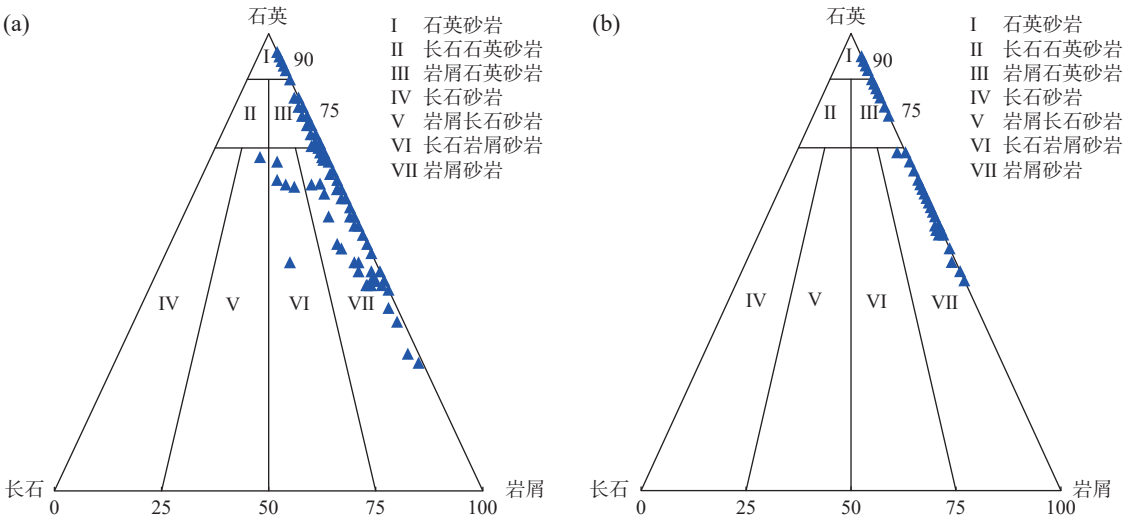
a. 鄂尔多斯盆地构造单元; b. 山西组综合柱状图

图1 鄂尔多斯盆地构造单元及山西组综合柱状图 (Jiang et al., 2021; 郭兰等, 2025)

Fig. 1 The structural units of the Ordos Basin and comprehensive column chart of Shanxi Formation strata

0.7 mm), 颗粒分选中等-好, 磨圆度以次棱角状主导, 颗粒接触多为凹凸-点线接触, 胶结类型以孔隙式为主。山 2 段粒度范围更宽(0.2~1.1 mm), 分选

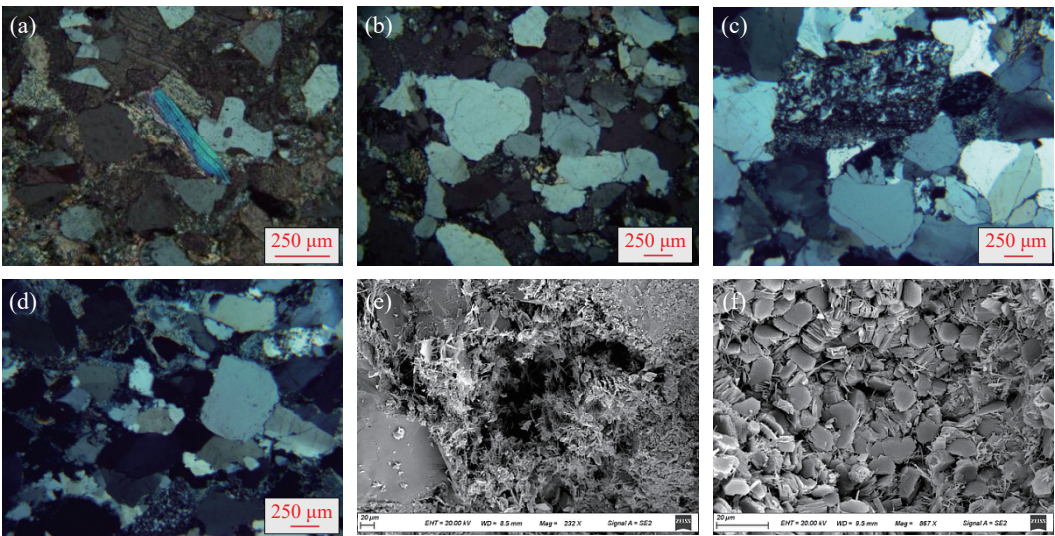
中等-好, 磨圆度以次棱角状为主, 颗粒接触以凹凸-点线接触为主, 胶结类型同样以孔隙式胶结为特征 (图 4)。



a. 山 1 段砂岩三角分类图; b. 山 2 段砂岩三角分类图

图2 延川东区砂岩三角分类图

Fig. 2 Sandstone Triangular Classification Map of Yanchuan East District



a. 延 2065 井, 山 1, 细粒岩屑石英砂岩, 云母碎屑变形, 早期方解石胶结; b. 延 2065 井, 山 2, 中粒岩屑石英砂岩, 石英次生加大边, 见少量方解石; c. 延 343 井, 山 1, 岩屑石英砂岩, 强烈压实, 变质岩屑含量高, 火山岩屑强烈变形; d. 延 343 井, 山 1, 粗粒岩屑石英砂岩, 石英次生加大, 岩屑高岭土化和绢云母化; e. 延 343 井, 山 1, 浅灰色中砂岩, 丝状伊利石、叶片状绿泥石、高岭石及粒间孔隙; f. 延 343 井, 山 1, 浅灰色含气粗砂岩, 高岭石填隙物充填粒间孔隙, 岩屑石英砂岩, 强烈压实, 变质岩屑含量高, 火山岩屑强烈变形

图3 山西组碎屑砂岩镜下特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of Shanxi Formation detrital sandstone

表 1 延川东区域山西组储层岩石碎屑成分含量数据表

Tab. 1 Data on the content of rock debris components in the Shanxi Formation reservoir in Yanchuan east area

层位	样品数	石英 (%)	长石 (%)	岩屑 (%)	填隙物成分 (%)						
					方解石	白云石	铁白云石	菱铁矿	粘土矿物	硬石膏	其它
山 1 段	45	67.11	1.27	31.62	1.81	0.40	4.18	0.98	1.95	1.15	1.13
山 2 段	20	71.77	0.01	28.14	2.96	2.04	2.23	0.47	1.94	1.04	1.42

山 1、山 2 段胶结物含量有一定差异, 研究区填隙物以黏土矿物(水云母、高岭石、绿泥石)及硅质、碳酸盐胶结物为主(表 2)。山 2 段铁方解石含量显著较高, 平均为 2.96%; 山 1 段为 1.81%, 且水云母更富集, 山 1 段绿泥石和高岭石略占优势(图 4)。硅质胶结普遍存在(含量为 1.03%~2.40%), 其孔隙充填与环边加大结构物性受难溶性严重制约; 碳酸盐胶结物(铁方解石、铁白云石等)在山 2 段相对富集, 其含量差异可能指示差异化成岩路径, 如溶蚀孔隙发育关联性。

表 2 延川东区域山西组储层砂岩胶结物成分表

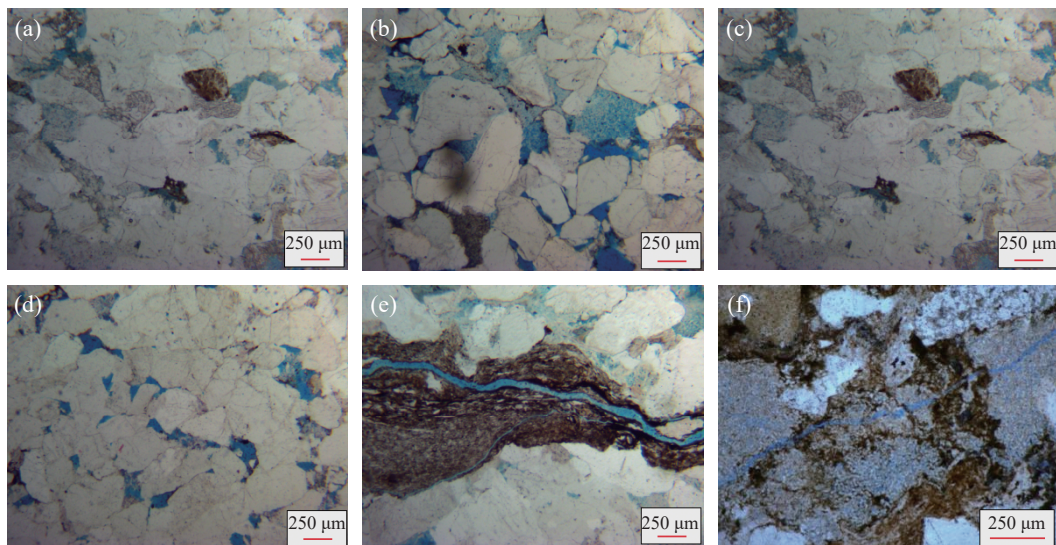
Tab. 2 Composition of sandstone cement in Shanxi Formation reservoir in Yanchuan east area

层位	高岭石 (%)	水云母 (%)	绿泥石 (%)	凝灰质 (%)	铁方解石 (%)	铁白云石 (%)	硅质 (%)
山 1 段	0.49	4.18	1.15	0.56	1.81	0.4	1.95
山 2 段	1.27	2.23	1.04	0.15	2.96	2.04	1.94

3 孔隙类型及孔隙结构特征

3.1 孔隙类型

延川东区域山西组主要发育残余粒间孔、次生溶孔和微裂缝 3 种孔隙(图 5)。山 1 段储层砂岩经历了较强的机械压实作用, 残余粒间孔广泛发育于石英及少量长石等刚性颗粒间, 但含量相对、较低。常见残余粒间孔被绿泥石黏土膜包裹、被伊利石、高岭石等黏土矿物或泥质杂基、次生石英加大等填隙物部分充填。次生溶孔主要包括岩屑溶孔及长石溶孔两类粒内溶蚀孔隙, 以岩屑溶孔为主, 亦见少量长石溶孔。颗粒内部溶孔可呈孤立状、蜂窝状等样式产出, 溶蚀作用亦可沿颗粒的解理缝溶蚀(图 5)。研究区局部微裂缝发育。岩心观察表明, 多口井山西组油层发育多条高角度裂缝。铸体薄片观察同样证实微裂缝的存



a. 延 155 井, 山 1, 火山岩屑溶孔及少量粒间孔, 面孔率 6%; b. 延 250 井, 山 2, 粒间孔及岩屑溶孔, 面孔率 7%; c. 延 155 井, 山 1, 火山岩屑溶孔及少量粒间孔, 面孔率 6%; d. 延 338 井, 山 2, 粒间孔及少量长石与岩屑溶蚀孔, 面孔率 5.0%; e. 延 343 井, 山 1, 少量微裂缝, 面孔率 1%; f. 延 347 井, 山 2, 少量微裂缝, 面孔率 1%

图4 延川东区域山西组砂岩铸体薄片孔隙类型及发育特征

Fig. 4 Pore types and development characteristics of Shanxi Formation sandstone casting thin sections in the eastern Yanchuan area

在。裂缝的发育对于储层砂岩中的孔隙连通, 作为油气运移的通道是起重要作用的。总体来看研究区山西组裂缝发育密度不大(赵帮胜等, 2019)。

统计结果表明, 山 2 段面孔率为 1.3%~5.6%, 平均为 3.55%, 孔隙类型以火山岩屑溶孔(含量为 0.5%~5.0%, 平均为 2.78%)和残余粒间孔(含量为 0.5%~6.3%, 平均为 0.75%)为主; 以及少量微裂缝及晶间微孔等。微裂缝及晶间孔面孔率平均为 0.3%。山 1 段面孔率为 1.5%~6.5%, 平均为 3.80%, 以火山岩屑溶孔(含量为 0.3%~5.2%, 平均为 2.95%)和粒间孔(含量为 0.5%~5.4%, 平均为 0.85%)为主。微裂缝及晶间孔面孔率平均为 0.35%(表 3)。延 2065 井、延 155 井、延 250 井、延 338 井、延 343 井、延 347 井均为延川东区研究区油井。

3.2 孔喉结构特征

高压压汞法测定孔隙结构常用的参数包括评价孔喉大小的参数: 排驱压力及最大孔喉半径, 中值压力及中值半径和平均孔喉体积比; 评价孔喉分布特征的参数: 分选系数、变异系数、歪度系数; 评价孔喉连通性的参数: 最大进汞饱和度和退汞效率等(闫高原等, 2021)。根据研究区内砂岩样品压汞参数统计结果对山西组砂岩孔喉结构进行分析(表 4)。

山西组山 1 段砂岩的排驱压力为 0.01~4.10 MPa 不等, 平均为 1.15 MPa; 中值压力分布区间广, 为 1.77~

88.72 MPa 不等, 平均为 30.51 MPa(表 4)。中值半径为 0.01~0.9 μm , 平均为 0.13 μm , 反映砂岩孔喉非均质性强。喉道分选系数为 0.02~5.10, 平均为 2.47, 分选系数较高。变异系数为 0.15~1.87, 平均为 0.83, 孔喉分选较差。最大进汞饱和度为 44.66%~99.04%, 平均为 72.79%, 说明孔喉的连通性较差。整体看来, 山 1 段砂岩孔喉偏小, 分选差, 孔喉连通性较差。

山 2 段砂岩的排驱压力为 0.01~3.57 MPa 不等, 平均为 0.63 MPa; 中值压力分布区间广, 为 4.66~70.32 MPa 不等, 平均为 40.01 MPa(表 4)。中值半径为 0.01~0.16 μm , 平均为 0.05 μm , 反映砂岩孔喉整体偏小。喉道分选系数为 1.38~4.22, 平均为 2.19, 分选系数中等。变异系数为 0.11~0.24, 平均为 0.16, 说明相较于山 1 段, 孔喉分选较好。最大进汞饱和度为 36.42%~94.50%, 平均为 70.72%。整体看来, 山 2 段砂岩孔喉整体偏小, 分选一般, 孔喉连通性一般。

参照油气储层评价方法(SY/T 6285—2011)碎屑岩储层孔隙结构类型划分标准, 对各项高压压汞参数特征值进行分析, 并结合物性特征和毛管压力曲线特征, 将川东区块山西组砂岩孔隙划分为 4 种结构类型(图 6, 表 5)。统计结果显示, 山 1 段以Ⅲ类和Ⅳ类曲线为主, 储集性能较差; 山 2 段以Ⅱ类、Ⅲ类曲线为主, 储集性能较好。

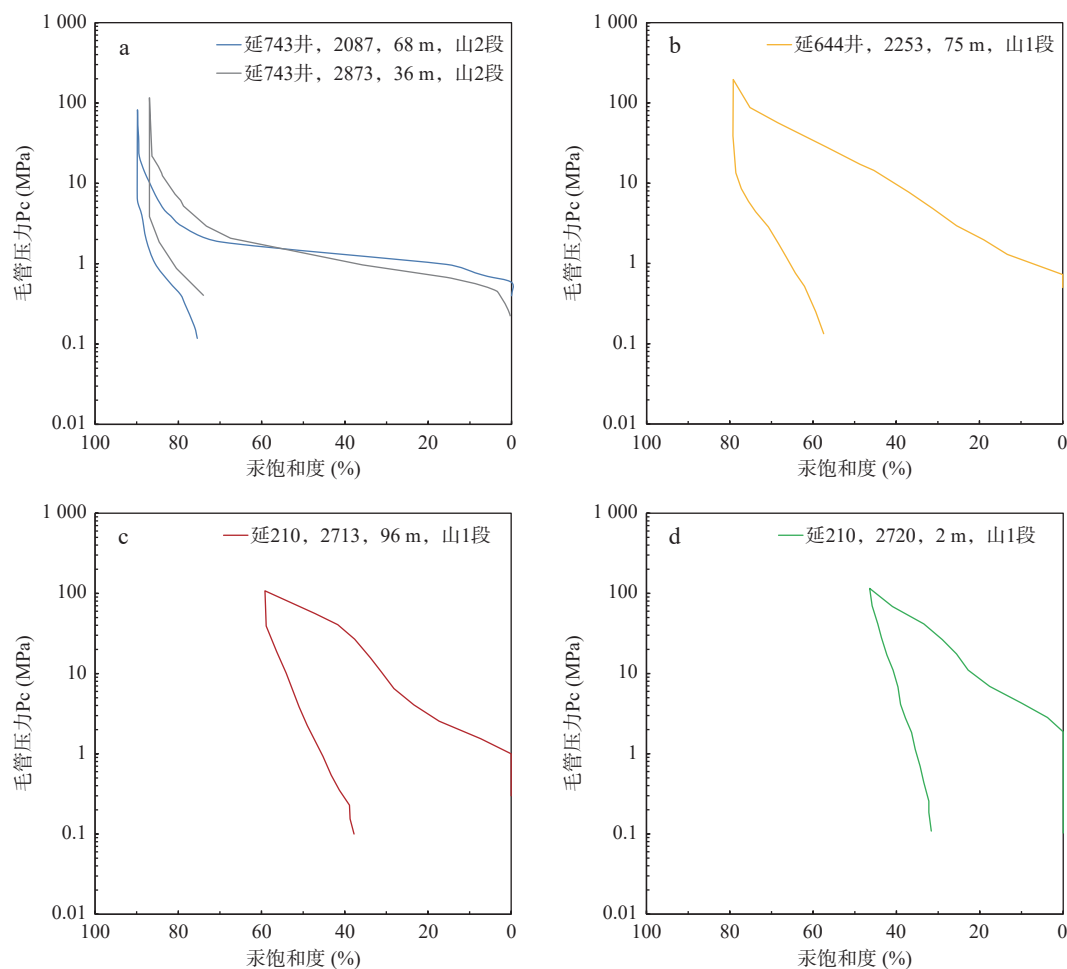


图5 延川东区山西组储层砂岩典型毛管压力曲线图

Fig. 5 Typical capillary pressure curve of Shanxi Formation reservoir sandstone in Yanchuan east district

表 3 延川东区域山西组孔隙类型统计表

Tab. 3 Statistical table of pore types in Shanxi Formation of Yanchuan east area

层位	残余 粒间孔 (%)	长石 溶孔 (%)	岩屑 溶孔 (%)	晶间孔 (%)	微裂隙 (%)	面孔率 (%)
山1段	0.85	0.15	2.95	0.10	0.10	3.80
山2段	0.75	0.12	2.78	0.15	0.15	3.55

4 物性特征及影响因素分析

4.1 孔渗特征

延川东区域山1段整体属于特低孔、致密储层。山1段储集层分析孔隙度为0.38%~13.30%，平均为4.09%，中值为3.81%。砂岩储集层孔隙度主体为2%~8%，约占93.10%；孔隙度大于8%的储集层约占4.36%，孔隙度小于2%的储集层约占2.5%。渗透率

为0.01~1.6 mD，渗透率几何平均值为0.61 mD，中值为0.04 mD。渗透率大多为0.01~0.2 mD，约占92.28%，约7.72%的渗透率大于0.2 mD(图7)。

延川东区域山2段储集层的孔隙度为0.38%~13.63%，平均值为4.74%，中值为4.33%。砂岩储集层的孔隙度主体为2%~8%，约占86.59%，孔隙度大于8%的储集层约占9.60%，孔隙度小于2%的储集层约占3.8%。渗透率为0.01~4.08 mD，平均值为0.14 mD，中值为0.05 mD。渗透率大多为0.01~0.2 mD，约占87.78%，约12.22%的渗透率大于0.2 mD(图8)。

4.2 粒度对储层物性的影响

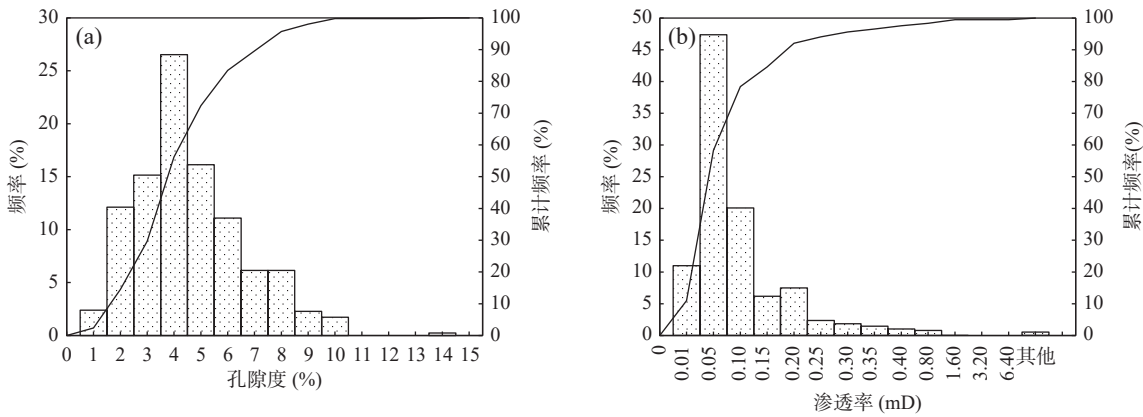
鉴于山1、山2段受同一成岩系统控制，主控因素分析聚焦共性规律。研究区山西组水下分流河道储层砂岩主要包括灰色含砾粗砂岩、灰色中砂岩、浅灰色含气含砾细砂岩及浅灰色细砂岩。统计结果表明，粒度粗细对储层物性影响较大。含砾粗砂岩或粗砂岩孔隙度为1%~9.52%，平均为6.66%；渗透率

表 4 延川东区域山西组砂岩高压压汞参数统计表

Tab. 4 Statistical table of high pressure mercury injection parameters for Shanxi Formation sandstone in Yanchuan east area

层位	样品数	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	排驱压力 (MPa)	中值压力 (MPa)	中值半径 (μm)	孔喉分选系数	变异系数	歪度系数	最大进汞饱和度 (%)	退出效率 (%)
山1段	29	最小值	1.79	0.012	0.01	1.77	0.01	0.15	-2.08	44.66	13.38
		最大值	11.57	0.747	4.10	88.72	0.90	1.87	1.93	99.04	49.98
		平均值	4.02	0.111	1.15	30.51	0.13	0.83	1.00	72.79	38.04
山2段	48	最小值	1.80	0.001	0.01	4.66	0.01	0.11	-1.44	36.42	8.26
		最大值	9.10	3.795	3.57	70.32	0.16	0.24	2.49	94.50	45.51
		平均值	6.51	0.764	0.63	40.01	0.05	0.16	1.30	70.72	21.81

注：中值压力指进汞饱和度为50%时对应的毛细管压力，该压力下对应的喉道半径称为中值半径。



a. 孔隙度分布直方图；b. 渗透率分布直方图

图6 延川东区山西组山1段岩心物性分布直方图

Fig. 6 Histogram of physical property distribution of core samples from Shan 1 member of Shanxi Formation in Yanchuan east district

为 $0.0041 \times 10^{-3} \sim 2.29 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为 $0.09 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度主要为 6%~10%；渗透率值主要为 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。中砂岩储层孔隙度为 1.24%~9.39%，平均为 4.54%；渗透率为 $0.0044 \times 10^{-3} \sim 1.89 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度主要为 2%~6%；渗透率值主要为 $0.02 \times 10^{-3} \sim 0.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。细砂岩储层孔隙度为 0.4%~13.63%，平均为 4.48%；渗透率为 $0.0033 \times 10^{-3} \sim 182.79 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度主要为 1%~5%；渗透率值主要为 $0.005 \times 10^{-3} \sim 0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。结果表明，粗砂岩样品储层物性相对更好，中砂岩储层物性次之，细粒砂岩储层物性相对最差(图 9)。

4.3 岩石组成对储层物性的影响

依据砂岩成因分类标准及山西组储层砂岩岩石学特征，基于薄片镜下鉴定结果，山西组储层砂岩主要可划分为石英砂岩、岩屑石英砂岩、岩屑砂岩及钙

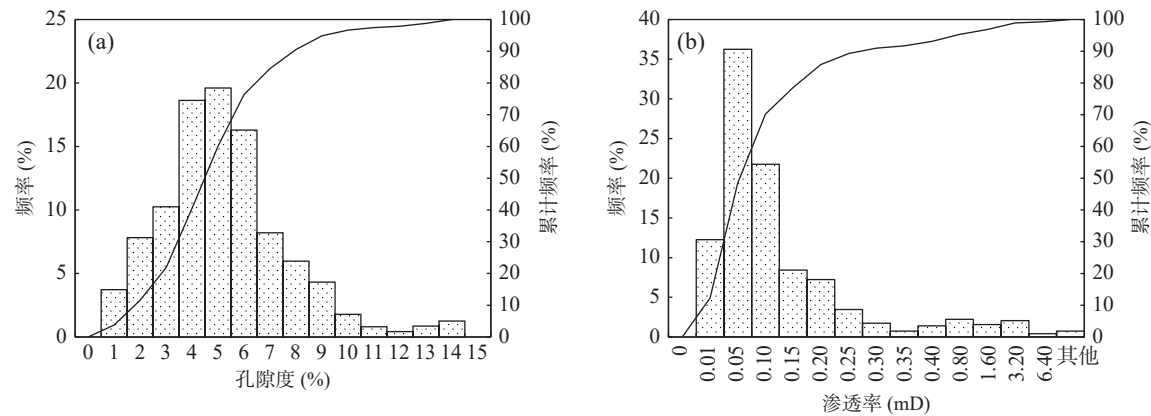
质胶结砂岩 4 种主要类型。石英砂岩储层石英含量大于 80%，长石含量小于 10%，岩屑含量小于 10%；岩屑石英砂岩储层石英含量为 65%~90%，长石含量小于 10%，岩屑含量为 10%~25%；岩屑砂岩储层石英含量小于 75%，长石含量小于 10%，岩屑含量为 10%~25%。由于山西组储层砂岩由于富含碳酸盐胶结物，且对储层物性有重要影响作用，将碳酸盐胶结物含量大于 10% 定义为钙质胶结砂岩。压实、压溶作用下使得储层原生孔隙大量减少，造成储层物性变差；岩石组成的不同是影响物性重要因素。

结果统计表明，山西组岩屑石英砂岩储层占比为 59.6%、塑性岩屑砂岩储层占比为 23.2%、石英砂岩储层占比为 6.1%、钙质胶结砂岩储层占比为 11.0%。岩屑石英砂岩储层孔隙度为 2.37%~9.39%，平均为 6.64%；渗透率为 $0.022 \times 10^{-3} \sim 1.89 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均为 $0.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度主要为 6%~8%；渗透率值主要

表 5 延川东区山西组储层砂岩样品孔隙结构类型分类统计表

Tab. 5 Classification and statistics of pore structure types of reservoir sandstone from Shanxi Formation in Yanchuan east area

储层参数	孔隙结构类型			
	I	II	III	IV
	较细喉型	细喉型	微细喉型	微细喉型
孔隙度	2.10%~9.00%	1.82%~11.57%	0.80%~1.63%	1.79~5.30%
	6.33%	6.27%	1.07%	3.19%
渗透率	0.057~4.723 mD	0.016~4.143 mD	0.012~1.681 mD	0.003~0.131 mD
	0.836 mD	0.688 mD	0.257 mD	0.024 mD
排驱压力	0.01~1.74 MPa	0.01~6.32 MPa	0.02~1.82 MPa	0.13~7.61 MPa
	0.52 MPa	0.60 MPa	0.70 MPa	1.53 MPa
中值压力	0.33~21.21 MPa	0.27~36.15 MPa	3.26~88.72 MPa	50 MPa以上
	3.08 MPa	4.66 MPa	43.96 MPa	—
平均喉道半径	0.09~11.26 μm	0.02~6.66 μm	0.14~0.62 μm	0.02~0.20 μm
	1.73 μm	1.29 μm	0.34 μm	0.13 μm
歪度系数	-0.22~2.49	-0.28~2.11	0.90~2.69	-2.08~2.23
歪度类型	粗歪度	粗歪度	细-粗歪度	细歪度
变异系数	0.14~0.33	0.11~1.04	0.12~0.51	—
	0.18	0.30	0.27	—
最大进汞饱和度	83.65%~99.04%	72.90%~95.80%	63.40%~91.26%	—
	92.22%	83.29%	78.22%	—
储层特征	溶蚀作用强烈, 大孔隙和小孔隙共存, 喉道粗, 连通性好, 优质储层	溶蚀作用强烈, 连通性中等, 是较好的储层	孔隙较小, 分选一般, 连通性中等	以微孔为主, 孔隙小, 孔隙连通性差, 非有效储层



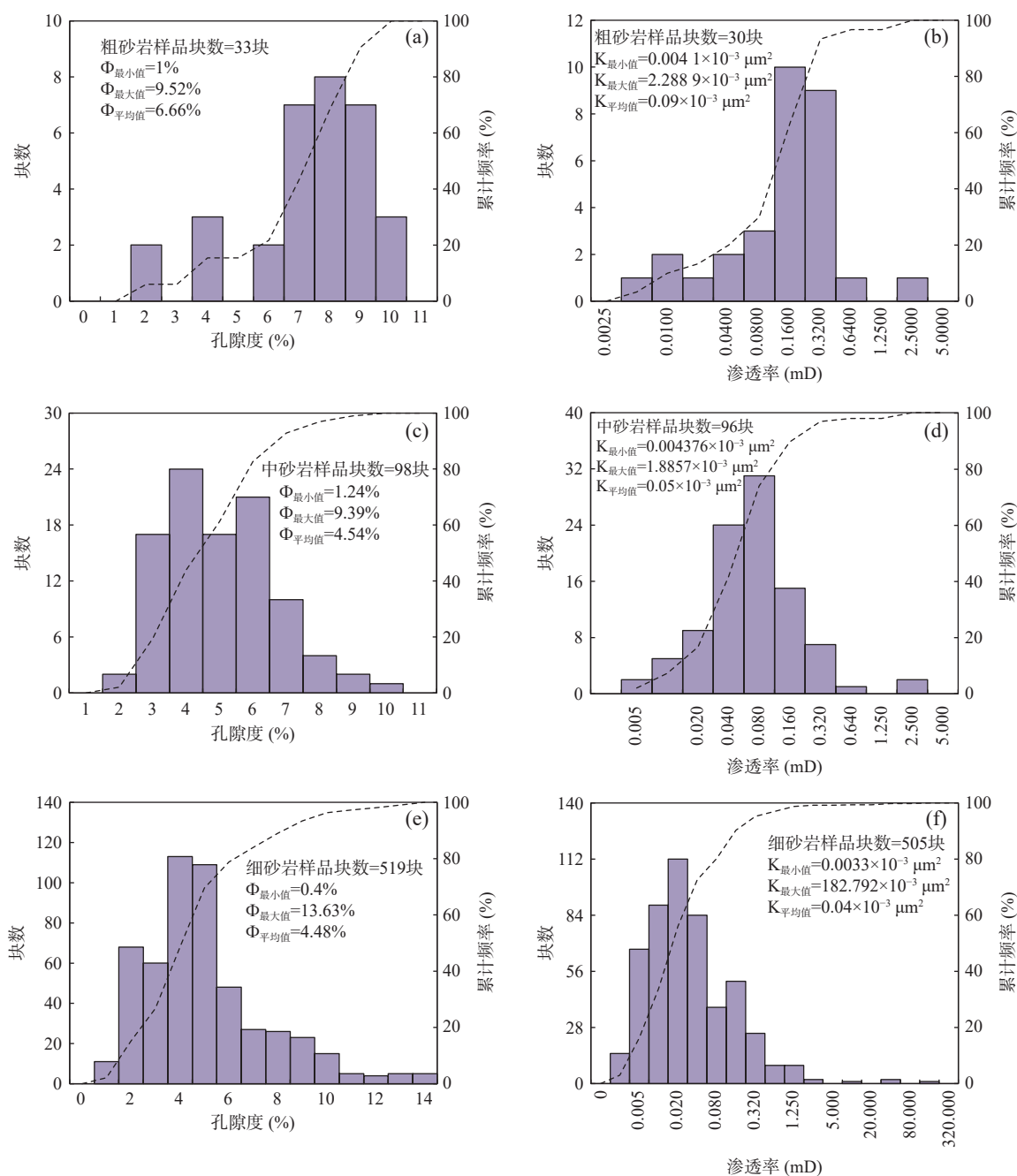
a. 孔隙度分布直方图; b. 渗透率分布直方图

图7 延川东区山西组山 2 段岩心物性分布直方图

Fig. 7 Histogram of physical property distribution of core samples from Shan 2 member of Shanxi Formation in Yanchuan east district

为 $0.08 \times 10^{-3} \sim 0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。石英砂岩储层孔隙度为 3.06%~8.67%, 平均为 5.63%; 渗透率为 $0.033 \times 10^{-3} \sim 0.395 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度主要为 5%~7%; 渗透率值主要为 $0.04 \times 10^{-3} \sim 0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。岩屑砂岩储层孔隙度为 1.44%~13.3%, 平均为 4.51%;

渗透率为 $0.007 \times 10^{-3} \sim 0.491 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度主要为 3%~6%; 渗透率值主要为 $0.02 \times 10^{-3} \sim 0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。物性统计结果表明, 岩屑石英砂岩储层物性最好, 石英砂岩储层物性次之, 再次为岩屑砂岩储层, 钙质胶结岩储层物性最差(图 10)。



a. 粗砂岩孔隙度分布直方图; b. 粗砂岩渗透率分布直方图; c. 中砂岩孔隙度分布直方图;
d. 中砂岩渗透率分布直方图; e. 细砂岩孔隙度分布直方图; f. 细砂岩渗透率分布直方图

图8 山西组储层砂岩物性与粒度关系统计图

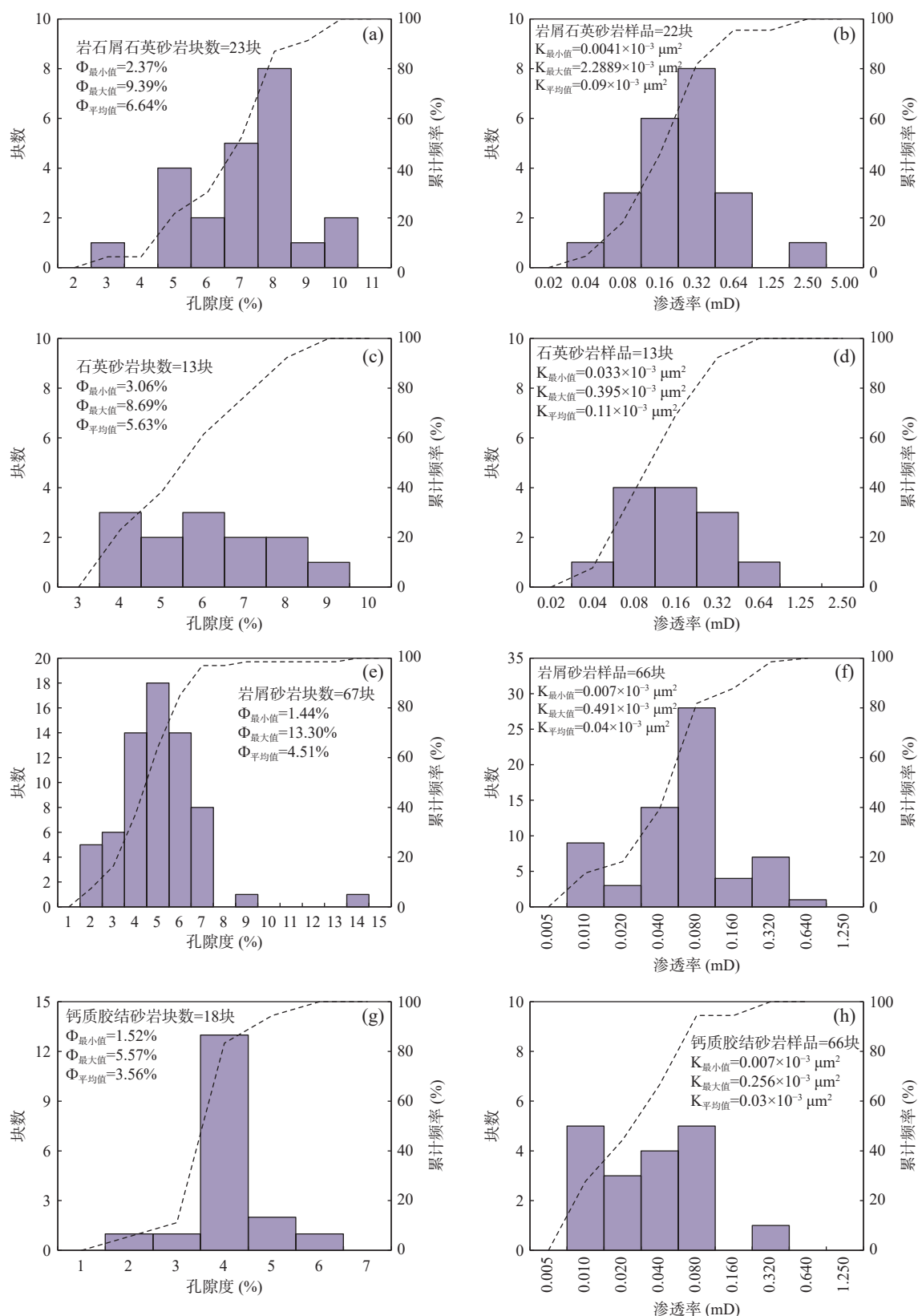
Fig. 8 Statistical chart of the relationship between physical properties and grain size of sandstone in Shanxi Formation

4.4 成岩作用对储层物性的影响

(1) 机械压实作用在储层砂岩埋藏过程中持续发生, 随着油层埋藏深度的增加, 在上覆地层重荷作用下, 致使松散沉积物不断被压实, 排出孔隙水, 使孔隙度降低。除了石英含量外, 塑性颗粒含量也是影响储层特性的主要因素之一。研究区岩屑砂岩中石英含量为 37.8%~74.2%, 平均为 61.8%, 高塑性岩屑含量

为 24.7%~58.5%, 平均为 37.3%。受压实作用影响, 火山岩屑发生强烈塑性变形, 见大量火山岩屑遭受挤压变形, 形成假杂基。塑性颗粒含量越高, 压实率高, 残余粒间孔少, 孔渗低, 当火山岩屑含量小于 15%, 遭受选择性溶蚀, 对物性起到积极作用; 当塑性组分含量高于 15% 时, 储层物性呈降低趋势(图 11)。

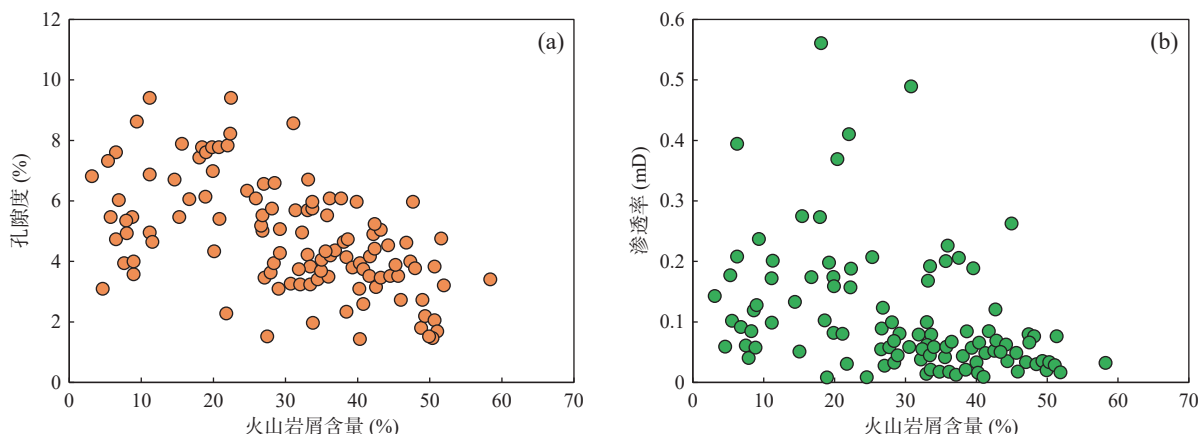
(2) 胶结作用: 胶结作用在研究区内较为发育, 是



a. 岩屑石英砂岩孔隙度分布直方图; b. 岩屑石英砂岩渗透率分布直方图; c. 石英砂岩孔隙度分布直方图; d. 石英砂岩渗透率分布直方图;
e. 岩屑砂岩孔隙度分布直方图; f. 岩屑砂岩渗透率分布直方图; g. 钙质胶结砂岩孔隙度分布直方图; h. 钙质胶结砂岩渗透率分布直方图

图9 山西组储层砂岩岩性与物性关系统计图

Fig. 9 Statistical chart of the relationship between physical properties and sandstone lithology in Shanxi Formation



a. 火山岩屑含量与孔隙度关系; b. 火山岩屑含量与渗透率关系

图10 山西组塑性颗粒组分含量与储层物性的关系

Fig. 10 The relationship between the content of plastic particle components and physical properties in Shanxi Formation

破坏原生孔隙的重要原因之一。研究区胶结作用主要包括碳酸盐胶结作用和黏土矿物胶结作用及硅质胶结作用等。

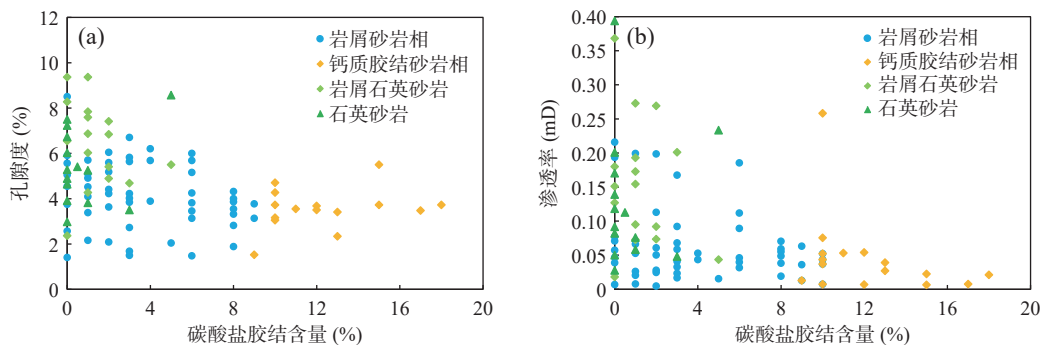
山西组储层砂岩碳酸盐胶结物主要为方解石、白云石及少量菱铁矿胶结。钙质胶结砂岩储层碳酸盐胶结含量为 9%~28%, 平均为 13.8%; 岩屑砂岩储层碳酸盐胶结含量为 0~9%, 平均为 3.1%; 岩屑石英砂岩储层碳酸盐胶结含量为 0~5%, 平均为 1.1%; 石英砂岩储层碳酸盐胶结含量为 0~5%, 平均为 0.8%。碳酸盐胶结在岩屑砂岩及岩屑石英砂岩储层中更为发育(图 12)。实测物性分析表明, 碳酸盐胶结含量与储层物性呈负相关关系, 胶结物含量越高, 储层物性越差。钙质胶结砂岩的碳酸盐胶结含量大于 10%, 其孔隙度一般小于 4%, 渗透率一般小于 0.04 mD, 变为致密储层或非储层。

研究区硅质胶结主要以次生加大边胶结和自形

晶体呈孔隙充填式胶结为主。自生石英加大或充填孔隙一方面使原生孔隙减少, 是造成砂岩物性变差, 但研究区山西组硅质胶结含量相对较低。统计结果表明, 硅质胶结在石英砂岩及岩屑石英砂岩储层中含量相对较高, 平均为 5.64% 和 3.45%。石英砂岩及岩屑石英砂岩储层中有较丰富的硅质来源, 如火山岩屑的溶蚀、石英颗粒的压溶作用等。高塑性火山岩屑砂岩中由于压实作用导致塑性变形有效抑制了石英次生加大的发育。

5 有利区域预测

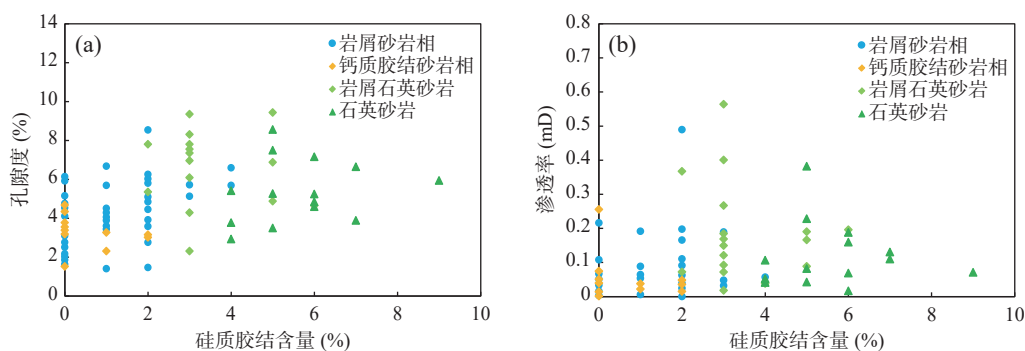
研究区山西组主要为源内成藏组合。沉积相上, 山西组山 1 段及山 2 段储集体主要为曲流河三角洲前缘水下分流河道, 综合考虑岩性、沉积微相展布、储层分类和钻井油气显示等因素, 山 1 段及山 2 段



a. 碳酸盐胶结物含量与孔隙度关系; b. 碳酸盐胶结物含量与渗透率关系

图11 山西组碳酸盐胶结物含量与储层物性的关系

Fig. 11 The relationship between the carbonate cement content and physical properties in Shanxi Formation



a. 硅质胶结含量与孔隙度关系; b. 硅质胶结含量与渗透率关系

图12 山西组储层硅质胶结含量与储层物性关系图

Fig. 12 The relationship between the siliceous cementation content and physical properties in Shanxi Formation

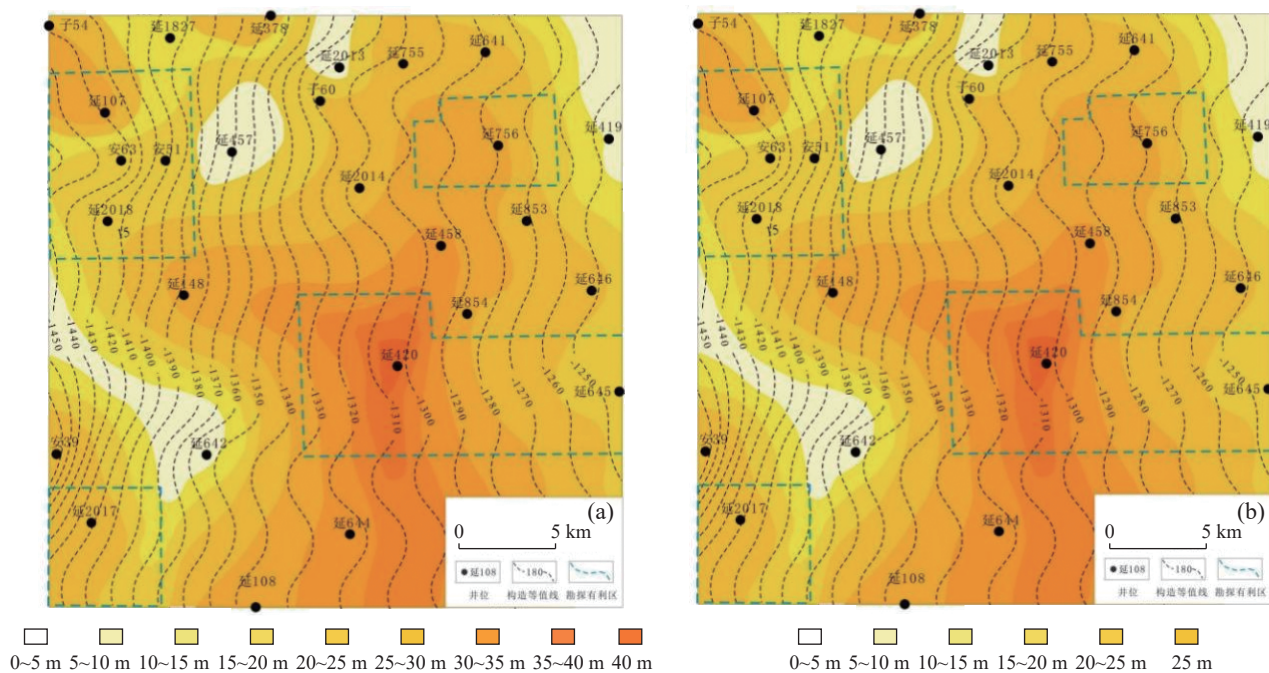
水下分流间湾优势发育且主体占据区块中部位置(图13)。山西组砂体具有单层厚度相对较小,横向变化快等特点。但砂体累计厚度统计结果表明,山西组山1段及山2段砂体仍总体相对较发育。山1段厚层砂体主要发育在中部及中南部区域,基本呈连片分布特征。山2段厚层砂体主要呈条带状发育,厚层砂体主要发育在中部及北部等区域。

山西组钻遇较好气测显示,山1段试气10口,试气产量为0.28万 m^3 ~0.88万 m^3 ,多层不产气或产少量气;山2段试气2口,延2017井及延458井试气无阻流量为1.7万 m^3 ~1.9万 m^3 。山西组煤系烃源岩为

良好的气源岩;局部砂体仍有优质储层砂体发育;山西组发育低幅构造-岩性及岩性圈闭,当优质砂体与顶部泥岩形成良好配置时可为天然气富集提供有利条件。因此,山西组可作为天然气重点勘探层位。依据已钻井良好显示、砂体相对发育及低幅鼻状构造发育,笔者圈定了山1段及山2段的有利区(图13)。

6 结论

(1)延安气田延川东区山西组储层以岩屑石英砂岩为主,石英含量为67.1%~71.8%。相较于山1段,



a. 硅质胶结含量与孔隙度关系; b. 硅质胶结含量与渗透率关系

图13 研究区山西组储层有利区预测平面图

Fig. 13 Prediction Plan of beneficial reservoir areas in Shanxi Formation of the research area

山 2 段石英含量更高,碳酸盐胶结物含量显著增加,胶结类型以孔隙式胶结为主,整体呈现中-细粒结构,分选中等至好,磨圆度以次棱角状为主。

(2)山西组储层孔隙类型以残余粒间孔和岩屑溶孔为主,微裂缝局部发育但密度较低。山 2 段储层物性优于山 1 段,平均孔隙度为 4.74%、渗透率为 0.764 mD,孔喉分选中等,喉道半径平均为 0.05 μm ,属细喉型储层。山 2 段物性更好,以 II 类、III 类孔隙结构为主,山 1 段以 III 类、IV 类为主。

(3)山西组储层物性受粒度、岩石组成及成岩作用显著控制。粗粒砂岩物性最佳,孔隙度与渗透率显著高于中、细粒砂岩。塑性岩屑含量大于 15% 时,储层物性显著降低;钙质胶结砂岩,物性最差,多为非储层。机械压实作用导致原生孔隙减少,碳酸盐胶结与硅质胶结抑制次生孔隙发育。

(4)山 1 段有利区位于中南部砂体连片发育区,山 2 段有利区呈 NW-SE 向条带状展布,与低幅鼻状构造叠合区域为天然气富集潜力区。兼顾构造-岩性圈闭匹配关系,部署勘探优势区域于山 2 段水下分流河道砂体厚层带。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 曹军,乔向阳,贺永红,等.鄂尔多斯盆地延安地区山西组山 2 段浅水曲流河三角洲沉积模拟实验研究[J].沉积学报,2024,42(5):1685-1698.
- CAO Jun, QIAO Xiangyang, HE Yonghong. Sedimentary simulation experiment of shallow-water meandering river delta in Shan 2 member of Shanxi Formation in Yan'an area, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(5): 1685-1698.
- 陈刚,胡宗全.鄂尔多斯盆地东南缘延川南深层煤层气富集高产模式探讨[J].煤炭学报,2018,43(6):1572-1579.
- CHEN Gang, HU Zongquan. Enrichment and high-yield model of deep coalbed methane in southern Yanchuan block, southeastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1572-1579.
- 董大忠,邱振,张磊夫,等.海陆过渡相页岩气层系沉积研究进展与页岩气新发现[J].沉积学报,2021,39(1):29-45.
- DONG Dazhong, QIU Zhen, ZHANG Lefu, et al. Advances in sedimentology of transitional facies shale gas systems and new shale gas discoveries[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 29-45.
- 段逸飞,赵卫卫,杨天祥,等.鄂尔多斯盆地延安地区二叠系山西组页岩气源储特征及聚集规律[J].岩性油气藏,2024,36(3):72-83.
- DUAN Yifei, ZHAO Weiwei, YANG Tianxiang, et al. Source-reservoir characteristics and accumulation patterns of shale gas in Permian Shanxi Formation, Yan'an area, Ordos Basin s[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(3): 72-83.
- 付玉通,原俊红,崔彬,等.延川南区块深部煤层气与致密砂岩气合采关键技术[J].煤炭学报,2018,43(6):1747-1753.
- FU Yutong, YUAN Junhong, CUI Bin, et al. Key technologies for co-production of deep coalbed methane and tight sandstone gas in southern Yanchuan block[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1747-1753.
- 侯晓伟,张津铭,朱炎铭,等.沁水盆地煤系气含气层段发育特征及其地质控制效应[J].煤炭科学技术,2023,51(S2):141-151.
- HOU Xiaowei, ZHANG Jinmin, ZHU Yanmin, et al. Development characteristics and geological controls of coal-measure gas-bearing intervals in Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 141-151.
- 黄有根,王晔,路归一,等.鄂尔多斯盆地神木气田石千峰组千 5 段砂体发育规模与储层特征[J].西北地质,2024,57(6):186-198.
- HUANG Yougen, WANG Yan, LU Guiyi, et al. Sandbody scale and reservoir characteristics of Qian 5 member in Shiqianfeng Formation, Shenmu Gas Field, Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 186-198.
- 郭兰,郭顺,丁超,等.鄂尔多斯盆地延安气田山西组 2 段砂岩储层致密化与天然气成藏关系[J].大庆石油地质与开发,2025,44(3):22-31.
- GUO Lan, GUO Shun, DING Chao, et al. Relationship between tightness and gas accumulation of the Shanxi Formation member 2 sandstone reservoirs in Yan'an Gas Field, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2025, 44(3): 22-31.
- 郭顺,周进松,郭兰,等.延安气田上古生界山西组致密砂岩储层微观特征及主控因素[J].特种油气藏,2024,31(2):10-18.
- GUO Shun, ZHOU Jinsong, GUO Lan, et al. Microscopic characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoirs in the Upper Paleozoic Shanxi Formation of the Yan'an Gas Field[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(2): 10-18.
- 雷涛,王桥,任广磊,等.鄂尔多斯盆地山西组致密砂岩成分特征及其对储层的制约——以大牛地气田 A 区为例[J].天然气地球科学,2023,34(3):418-430.
- LEI Tao, WANG Qiao, REN Guanglei, et al. Composition characteristics of tight sandstone in the Shanxi Formation of the Ordos Basin and their constraints on reservoirs: A case study of Block A in the Daniudi Gas Field[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(3): 418-430.
- 李亚龙,于兴河,周进松,等.鄂尔多斯盆地东南部山 2 段物源与曲流河三角洲沉积体系[J].沉积学报,2017,35(3):540-551.
- LI Yalong, YU Xinghe, ZHOU Jinsong, et al. Provenance and mean-

- dering river delta depositional system of Member Shan 2 in the southeastern Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3): 540–551.
- 牛艳伟, 吴鹏. 神木地区解家堡区块山西组储层“四性”关系及有效储层下限[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(5): 513–524+550.
- NIU Yanwei, WU Peng. Four-property relationship and lower limit of effective reservoirs in the Shanxi Formation of the Xijiabao Block, Shenmu area[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2023, 50(5): 513–524+550.
- 单俊峰, 吴炳伟, 金科, 等. 鄂尔多斯盆地宜川-黄龙地区上古生界储层特征及其对天然气成藏的影响[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(6): 29–38.
- SHAN Junfeng, WU Bingwei, JIN Ke, et al. Characteristics of Upper Paleozoic reservoirs and their influence on gas accumulation in the Yichuan-Huanglong area, Ordos Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(6): 29–38.
- 师学耀, 高超利, 孟旺才, 等. 鄂尔多斯盆地东缘成家庄地区二叠系山西组三角洲前缘露头构型分析[J]. *西北地质*, 2025, 58(1): 135–149.
- SHI Xueyao, GAO Chaoli, MENG Wangcai, et al. Outcrop architecture analysis of delta front in the Permian Shanxi Formation, Chengjiazhuang area, eastern Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(1): 135–149.
- 孙龙德, 邹才能, 贾爱林, 等. 中国致密油气发展特征与方向[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(6): 1015–1026.
- SUN Longde, ZOU Caineng, JIA Ailin, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(6): 1015–1026.
- 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 (pene-)syngenetic karstification in the Ordovician Majiagou Formation Member Ma 5 carbonate rocks, Sulige Gas Field[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 146–156.
- 王香增, 乔向阳, 张磊, 等. 鄂尔多斯盆地东南部致密砂岩气勘探开发关键技术创新及规模实践[J]. *天然气工业*, 2022, 42(1): 102–113.
- WANG Xiangzeng, QIAO Xiangyang, ZHANG Lei, et al. Key technological innovations and large-scale practice in the exploration and development of tight sandstone gas in the southeastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 102–113.
- 谢梦雨, 张东东, 罗厚勇, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界致密储层孔隙结构特征——以盐池地区山西组和下石盒子组为例[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(7): 1173–1186.
- XIE Mengyu, ZHANG Dongdong, LUO Houyong, et al. Pore structure characteristics of tight Upper Paleozoic reservoirs in the Ordos Basin: A case study of the Shanxi and Lower Shihezi formations in the Yanchi area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(7): 1173–1186.
- 闫高原, 张军建, 路冠文, 等. 沁水盆地太原组—山西组页岩孔隙分形特征[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(5): 548–553.
- YAN Gaoyuan, ZHANG Junjian, LU Guanwen, et al. Fractal characteristics of shale pores in the Taiyuan and Shanxi formations, Qinshui Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(5): 548–553.
- 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 & development of tight gas in the Upper Paleozoic of Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3): 295–303.
- 于兴河, 王香增, 王念喜, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界层序地层格架及含气砂体沉积演化特征[J]. *古地理学报*, 2017, 19(6): 935–954.
- YU Xinghe, WANG Xiangzeng, WANG Nianxi, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary evolution of gas-bearing sandbodies in the Upper Paleozoic of southeastern Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(6): 935–954.
- 赵帮胜, 李荣西, 覃小丽, 等. 鄂尔多斯盆地中部上古生界山西组页岩储层特征[J]. *沉积学报*, 2019, 37(6): 1140–1151.
- ZHAO Bangsheng, LI Rongxi, QIN Xiaoli, et al. Characteristics of shale reservoirs in the Upper Paleozoic Shanxi Formation, central Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(6): 1140–1151.
- 赵龙梅, 吴和源, 黄力, 等. 鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县区块及邻区山西组山2段物源分析[J]. *西北地质*, 2023, 56(5): 322–331.
- ZHAO Longmei, WU Heyuan, HUANG Li, et al. Provenance analysis of Member Shan 2 in the Shanxi Formation, Daning-Jixian Block and adjacent areas, eastern margin of Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(5): 322–331.
- Xiong F, Jiang Z, Huang H, et al. Mineralogy and gas content of upper Paleozoic Shanxi and Benxi shale formations in the Ordos Basin[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(2): 1061–1068.
- Zhao W, Zhang H, Shi Y, et al. Geological characteristics and exploration potential of the coal measure gas from Shan 2 of the Shanxi formation in the eastern Ordos Basin[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1142141.
- Shao X, Pang X, Jiang F, et al. Diagenetic characteristics and reservoir quality in tight gas sandstones: A case study of the Shanxi Formation in the north - eastern Ordos Basin, China[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(6): 3257–3271.
- Gu Y, Li X, Qi L, et al. Sedimentology and geochemistry of the lower permian Shanxi Formation Shan 23 submember transitional shale, eastern Ordos Basin, north China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 859845.
- Zhang L, Peihua Z, Wei H, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of mudshale in Shan 23 sub-member of Shanxi Formation, eastern margin of Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 34(2): 181–193.
- Jiang Z, Fu J, Li G, et al. Using resistivity data to study the water-flooding process: A case study in tight sandstone reservoirs of the Ordos Basin, China[J]. *Geophysics*, 2021, 86(2): B55–B65.