

Micro-pore Structure Characteristics of Low Permeability Sandstone Reservoir and Its Influence on Reservoir Properties—Taking the Long 6 Oil Layer Group in Zhenstability-Shuangcheng Area of Ordos Basin, China as an Example

Jianhui Yang Panfeng Gao Ling Wang Quanda Jiang

China Petroleum Changqing Oilfield Branch Fourth Oil Production Plant, Jingbian, Shaanxi, 718500, China

Abstract

Low permeability reservoirs are an important component of oil and gas resources. With the gradual reduction of unconventional oil and gas resources, low-permeability reservoirs have gradually become an important field for oil and gas exploration and development. Based on the analysis of the petrological and physical characteristics of the Chang 6 oil reservoir in the Zhenjing Shuangcheng area of the Ordos Basin, this study explores the micro pore structure characteristics and physical property influencing factors of low-permeability sandstone reservoirs using methods such as rock casting thin sections, scanning electron microscopy, and high-pressure mercury injection. The results indicate that the reservoir rock types are mainly lithic feldspar sandstone and feldspar sandstone; The overall physical properties of the reservoir are poor, belonging to low porosity ultra-low porosity, ultra-low permeability ultra-low permeability reservoirs; The micro pore structure can be divided into three main types: mesopores micro throats, mesopores micro throats, and mesopores adsorption throats, with mesopores micro throats being the main type; The average radius and median radius of pore throats are positively correlated with physical properties, while the displacement pressure and median pressure are negatively correlated with physical properties. The correlation between sorting coefficient and coefficient of variation and physical properties is not significant. The correlation coefficients between the median radius reflecting the size of pore throats and the median pressure reflecting the connectivity of pore throats and physical properties are relatively large and better, indicating that the size and connectivity of pore throats play a decisive role in the quality of reservoir properties, and the overall macroscopic physical properties of reservoirs are influenced by the microscopic pore structure.

Keywords

Ordos Basin; Chang 6 oil reservoir group; pore structure; reservoir properties

低渗透砂岩储层微观孔隙结构特征及其对储层物性的影响——以中国鄂尔多斯盆地镇靖—双城地区长6油层组为例

杨建辉 高攀锋 王玲 姜全达

中国石油长庆油田分公司第四采油厂, 中国·陕西 靖边 718500

摘要

低渗透储层是油气资源的重要组成部分, 随着非常规油气资源的逐渐减少, 低渗透储层逐渐成为油气勘探开发的重要领域。在鄂尔多斯盆地镇靖—双城地区长6油层组储层岩石学特征、物性特征分析的基础上, 通过运用岩石铸体薄片、扫描电镜和高压压汞等方法, 探讨低渗透砂岩储层微观孔隙结构的特征及其物性影响因素。结果表明: 储层岩石类型以岩屑长石砂岩和长石砂岩为主; 储层整体物性较差, 属于低孔-特低孔、特低渗-超低渗储层; 微观孔隙结构可以划分为中孔-微细喉、中孔-微喉道、中孔-吸附喉道三种主要类型, 其中以中孔-微喉道为主; 孔喉平均半径、孔喉中值半径与物性呈正相关关系, 排驱压力、中值压力与物性呈负相关关系, 分选系数、变异系数与物性的相关性不明显。其中, 反映孔喉大小的中值半径和反映孔喉连通性的中值压力与物性的相关系数较大, 相关性更好, 这表明, 孔喉大小和连通程度对储层物性的好坏起着决定性的作用, 储层的整体宏观物性受微观孔隙结构的影响。

关键词

鄂尔多斯盆地; 长6油层组; 孔隙结构; 储层物性

1 引言

【作者简介】杨建辉(1986—), 男, 中国宁夏固原人, 工程师, 从事油气田开发研究。

低渗透砂岩储层微观孔隙结构复杂多样, 对储层物性产生着重要的影响。微观孔隙结构是控制储层物性的重要

因素^[1]，其特征包括孔隙的大小、形状、分布、连通性等多个方面。这些微观孔隙结构的特性不仅直接影响着储层的物性，还在很大程度上决定了油气在储层中的赋存状态和流动规律^[2]。基于铸体薄片、扫描电镜、高压压汞等分析测试方法，以储层岩石学、物性及孔隙结构特征的精细表征为基础，深化对低渗透砂岩储层的认识，探讨微观孔隙结构对储层物性的影响，为镇靖—双城地区长6油层组低渗透油藏的勘探提供科学依据，具有现实的指导意义。

2 研究区概况

镇靖—双城地区位于鄂尔多斯盆地的中部（图1）。在构造单元上属于伊陕斜坡，位于盆地内部构造相对稳定区域，存在一系列微小的构造变形，这些构造变形在一定程度上影响了油气的运移和聚集。区域沉积演化特征研究表明，镇靖—双城地区长6油层组沉积时期，主要为曲流河沉积体系，其沉积微相包括分流河道、河漫滩等，砂体发育广泛，砂体粒度较细、分选较差，这些不同的沉积微相为低渗透储层的形成提供了物质基础。在长期的地质演化过程中，强烈的压实作用，胶结作用等破坏性成岩作用是导致储层物性降低的重要因素之一。除此之外，盆地内部构造运动相对较弱，储层缺少有效的裂缝系统来改善储集性能^[3]，从而加速了储层物性的变差。



图1 鄂尔多斯盆地研究区位置及构造单元划分

3 储层岩石学及物性特征

3.1 储层岩石学特征

通过岩石铸体薄片鉴定结果显示，研究区长6油层组

岩石类型主要为岩屑长石砂岩和长石砂岩（图2）。粒径主要介于0.13~0.50mm，碎屑颗粒分选中等，磨圆以次棱角状为主，颗粒之间以线接触为主，局部出现点接触，颗粒支撑结构，胶结类型主要为孔隙胶结。储层砂岩总体上成分成熟度较低，结果成熟度中等。在碎屑组分中，长石含量最高，石英次之，岩屑含量最低，石英含量介于20%~29%，平均为22.75%，长石含量介于47%~65%，平均为48.16%，岩屑含量介于15%~26%，平均为19.01%，岩屑以石英岩和片岩等变质岩岩屑为主，总体具有高长石低石英的特征。填隙物以为黏土矿物和碳酸盐矿物为主（图3），其中黏土矿物主要为绿泥石和高岭石，平均含量分别为2.98%、1.10%，碳酸盐矿物主要为方解石，平均含量为5.4%。

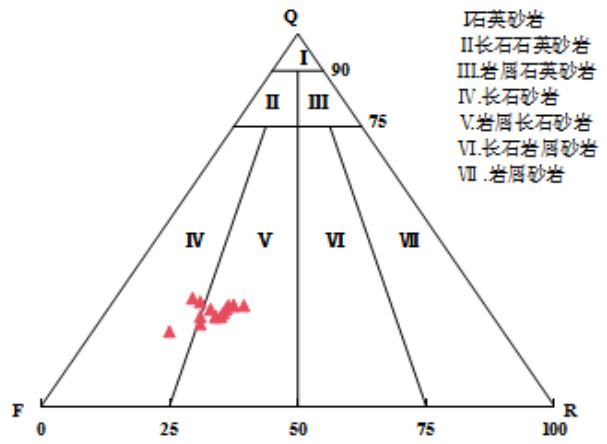


图2 镇靖—双城长6岩石类型图（样品数：13）

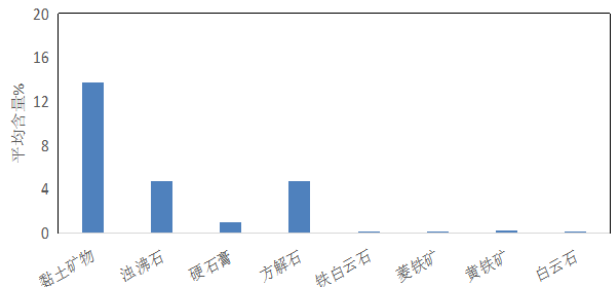


图3 镇靖—双城长6储层填隙物组分图（样品数：13）

3.2 储层物性特征

研究区长6油层组储层物性统计结果表明，实测样品孔隙度为5.27%~15.97%，平均值为11.07%，孔隙度集中分布在6%~14%范围，占样品总数的81.8%。实测渗透率介于 0.2×10^{-3} ~ 1.81×10^{-3} μm，平均值为 0.94×10^{-3} μm，渗透率集中分布在 0.2×10^{-3} ~ 1.4×10^{-3} μm范围，占样品总数的77.27%。根据《石油天然气储量计算规范》储层划分标准^[4]，研究区长6储层属于低孔-特低孔、特低渗-超低渗储层。孔隙度与渗透率呈正相关，但相关系数较低，表现出储层孔隙结构相对复杂。

4 储层微观孔隙结构特征

孔隙结构由孔隙和喉道两部分组成,是指孔隙和喉道的大小,连通状况,配置关系及其演化特征,孔隙反映了储集层储集能力,喉道则控制着孔隙的渗透和储集能力,孔隙结构的好坏可以直接影响储集岩的储集性能^[5]。

4.1 孔隙类型

通过岩石铸体薄片,及扫描电镜分析结果表明,研究区长6油层组储层孔隙类型主要为粒间溶孔,长石溶孔,微裂缝。总面孔率介于1%~10%,平均为5.23%,其中粒间溶孔最高,面孔率平均为3.73%,长石溶孔次之,面孔率平均为1.19%,微裂缝最少,面孔率平均为0.31%。

粒间溶孔(图4a),是在原生粒间孔与剩余粒间孔基础上经过次生溶蚀作用后形成的^[4],溶蚀作用的物质主要为杂基和胶结物,孔隙内部见矿物溶蚀残余。粒间溶孔是由于砂岩储集体中部分碎屑及填隙物受溶蚀作用改造扩大形成的孔隙,主要赋存于刚性碎屑颗粒之间,并且孔隙周围填隙物一般存在溶蚀痕迹^[6]。长石溶孔(图4b、d)形成在酸性介质条件下,长石与水接触时,都将发生非全等溶解反应,长石在其溶解过程中,部分离子被溶解进入溶液中,而另一部分组分则将转变成新的矿物。由于这些新生的矿物或称次生矿物与原始矿物组成的不同,它们的分子量、密度等物理化学性质也不同,其所占据的体积空间将发生变化,从而导致次生孔隙空间的产生^[7]。长石溶孔中长石常沿解理缝选择

性溶蚀,形态不规则,随着溶蚀作用增强,少量长石颗粒被完全溶蚀,形成铸模孔^[8]。微裂缝(图4c)是在成岩期因受到构造应力发生挤压,导致砂岩形成破裂缝,微裂缝对孔隙的连通性起到了极其重要的作用。

4.2 喉道类型

缩颈型喉道:在压实作用的影响下,石英和长石等刚性矿物颗粒发生重新排列,颗粒之间的接触方式转变为线接触和点一线接触,颗粒被压实后,颗粒间的喉道变窄,颗粒之间发育出缩颈喉道结构^[9](图4b)。这就导致部分孔隙由于喉道变小从而无法有效连通,成为了孤立的孔隙。尽管压实作用保留下来有较大的孔隙,但其渗透率却可能相对较低。除此之外,颗粒边缘的溶蚀作用,也能够增大喉道半径,从而改善孔隙之间的连通性。

片状、片弯状喉道:在强烈的压实作用下,颗粒之间定向排列,形成的孔隙和喉道都变得很细,其形态呈片状或弯曲片状的长条状通道^[9](图4e)。当压实程度较强且晶体再生长,剩余的粒间孔隙变得更小,喉道其实属于晶体之间的晶间孔隙。当颗粒之间发生溶蚀作用时,可以扩大片状喉道的宽度。片状、片弯庄喉道的变化较大,受后期溶蚀作用溶蚀作用影响容易被改造增粗。

管束状喉道:管束状喉道多存在于黏土胶结物发育和溶蚀作用强烈的地方。原始粒间孔被各类黏土矿物充填,各类黏土矿物中的微孔隙既是孔隙又是喉道,交叉分布,形成管束状喉道(图4f)。

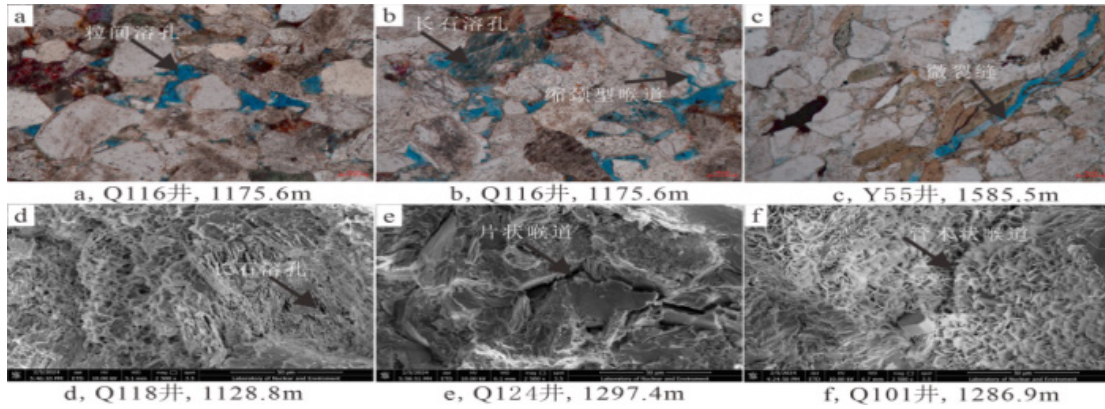


图4 镇靖—双城地区长6储层孔隙喉道类型

4.3 微观孔隙结构特征

依据毛细管压力曲线形态及孔隙结构的参数特征,结合铸体薄片,可以将研究区的储层结构划分为中孔-微细喉,中孔-微喉道,中孔-吸附喉道三种主要类型,其中以中孔-微喉道孔隙结构为主。

中孔-微细喉道,此类型孔隙结构的储集层孔隙度一般为12.24%~13.54%,渗透率为 0.5×10^{-3} ~ $1.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}$,排驱压力小于1MPa(图5),平均孔喉半径小于 $1 \mu\text{m}$,偏粗歪度。中孔-微喉道,此类型孔隙结构的储集层孔隙度一般为10.55%~12.94%,渗透率为 0.41×10^{-3} ~ $1.37 \times 10^{-3} \mu\text{m}$,排驱压力介于1~8MPa(图6),平均孔喉半径小于 $0.5 \mu\text{m}$,

略粗歪度。中孔-吸附喉道,此类型孔隙结构的储集层孔隙度一般为5.27%~6.44%,渗透率为 0.20×10^{-3} ~ $0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}$;排驱压力大于8MPa(图7),平均孔喉半径小于 $0.025 \mu\text{m}$,偏细歪度。

5 孔隙结构对储层物性的影响

微观孔隙结构是影响储层物性的重要因素,微观孔隙结构的参数能够定量地表征与物性之间的相关关系。

反映孔吼大小的参数主要有平均孔吼半径和孔吼中值半径,其大小受控于储集空间类型及其发育程度,碎屑颗粒分选性,填隙物含量等因素^[10],平均孔吼半径、孔吼中值

半径与孔隙度、渗透率一般呈正相关性。其中孔隙度、渗透率与孔喉中值半径相关系数分别为 0.7447、0.4506（图 8），一般中值半径越大，孔渗条件越好。而孔喉平均半径与物性的相关性较低（图 9），孔喉平均半径分布在 0.02~0.70 μm ，平均为 0.26 μm ，孔吼整体偏小，影响储集层物性，是导致储层物性变差的重要原因。

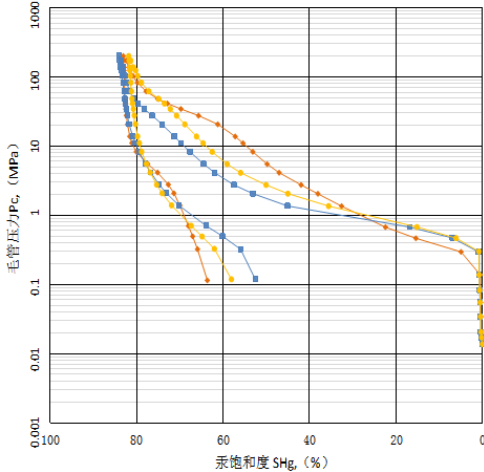


图 5 中孔—微细喉道压汞曲线

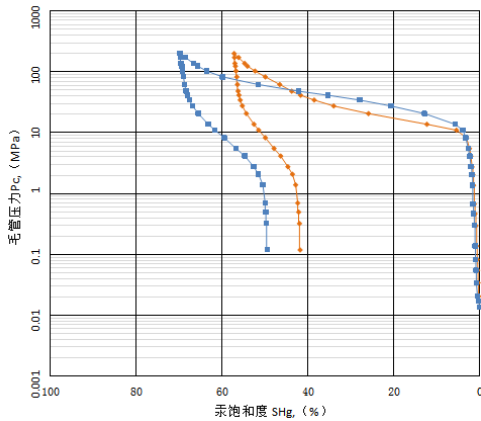


图 6 中孔—微喉道压汞曲线

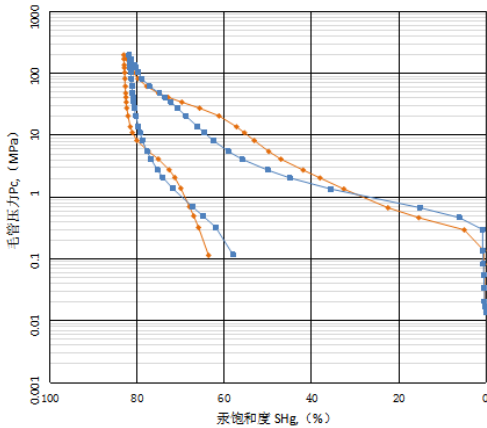


图 7 中孔—吸附喉道压汞曲线

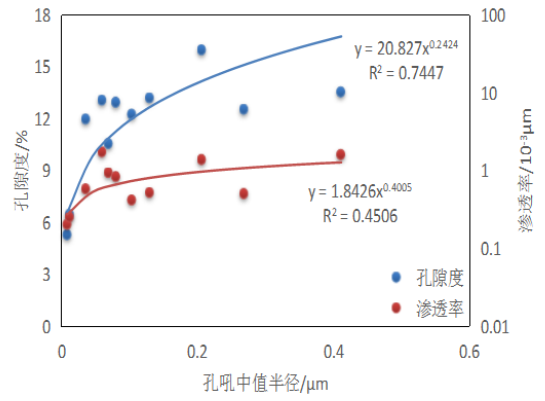


图 8 孔吼中值半径与孔渗相关关系图

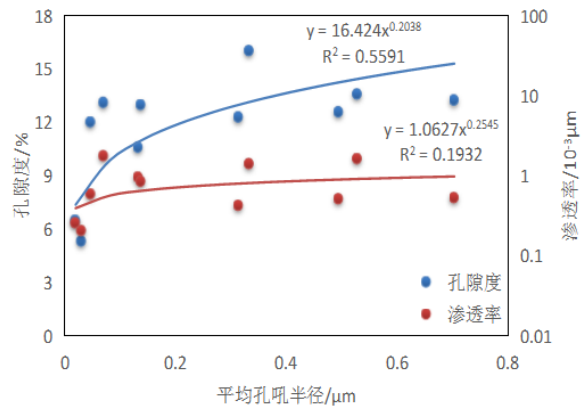


图 9 平均孔吼半径与孔渗相关关系图

反映孔吼分选性的参数有分选系数、变异系数。分选系数反映的是孔喉喉道的集中程度，分选系数介于 1.03~2.94 之间，平均 2.06，表明分选性一般，且分选系数与孔渗相关性不明显（图 10）。变异系数能更好反映孔喉大小分布均匀程度，数值越小，孔喉分布越均匀，变异系数分布在 0.07~0.26，平均为 0.17，这说明研究区孔喉大小分布较为均匀，但与孔渗相关性不明显（图 11）。分析其原因在于，低渗透储层压实作用及胶结作用影响下孔喉半径趋于变小，孔喉均一化程度逐渐提高，虽然溶蚀作用改造后可以发育一定数量的较大孔喉，但大部分的小孔喉受胶结封堵而缺乏改造，造成储层物性变差^[10]。

反映孔吼渗流能力的参数有排驱压力和中值压力。排驱压力是孔隙中最大连通孔喉喉道所对应的毛细管力，排驱压力分布在 0.14×10^{-3} ~ 11.03×10^{-3} μm ，平均为 2.78×10^{-3} μm ，排驱压力较大，表明储层渗透性较差，排驱压力与孔渗具有较好的负相关性（图 12），排驱压力增大，孔渗减小。中值压力为汞饱和度 50% 是所对应的毛细管压力值，研究区中值压力分布在 1.79×10^{-3} ~ 83.29×10^{-3} μm ，平均值为 19.64×10^{-3} μm ，中值压力与孔渗具有较好的负相关（图 13），该值越小，岩石孔渗越好。

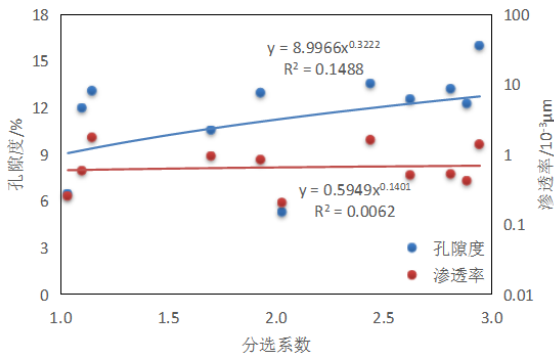


图 10 分选系数与孔渗相关关系图

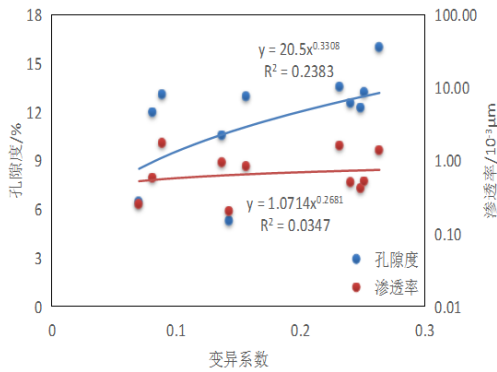


图 11 变异系数与孔渗相关关系图

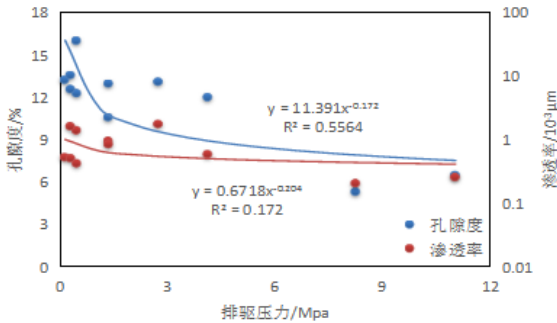


图 12 排驱压力与孔渗相关关系图

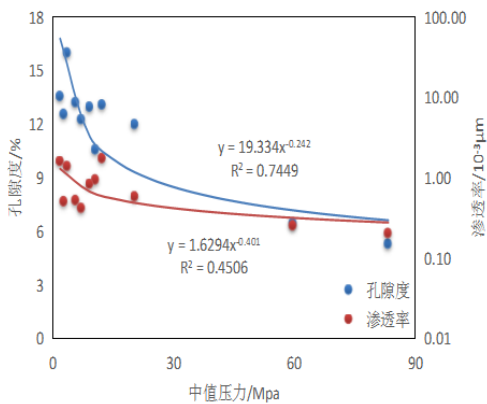


图 13 中值压力与孔渗相关关系图

从样品的孔喉大小、孔喉分选性和孔吼渗流能力参数

与储层物性之间的关系可以看出，中值半径、孔喉平均半径与储层物性呈的正相关关系。排驱压力、中值压力与储层物性呈明显的负相关关系。分选系数、变异系数与储层物性无明显的相关关系。其中，同一类型的结构参数对孔隙度的影响更为明显，且反映孔吼大小的中值半径和反映孔吼连通性的中值压力与物性的相关系数较大，相关性最好。这表明，孔喉大小和连通程度对储层物性的好坏起着决定性的作用，储层的整体宏观物性受微观孔隙结构的影响^[11]。

6 结论

①镇靖—双城地区长6油层组储层类型为低孔-特低孔、特低渗-超低渗储层，孔渗相关性不明显，渗透率低是储层物性差的主要表现。储层主要发育粒间溶孔、长石溶孔、微裂缝，以粒间溶孔为主。

②微观孔隙特征主要表现为：孔隙整体以中孔为主，喉道整体较细、类型多样，并且分布比较集中。可以划分出中孔-微细喉，中孔-微喉道，中孔-吸附喉道三种主要类型，储层物性依次变差。

③储层物性随孔吼平均半径、中值半径的增大而增大，具有正相关性，随排驱压力、中值压力的增加而减小，具有负相关性，与分选系数、变异系数相无明显相关性。孔喉大小和连通程度对储层物性的好坏起着决定性的作用。

参考文献

- [1] 韩进.鄂尔多斯盆地王盘山区延长组储层微观孔隙结构及渗流特征表征[D].西安:西北大学,2020.
- [2] 夏宇轩.低渗储层微观孔隙结构分形表征及渗流特性研究[D].北京:中国地质大学,2022.
- [3] 康麒龙.鄂尔多斯盆地中生界油气成藏构造及油气藏形成特点[D].西安:西北大学,2022.
- [4] DZ/T 0217—2020 石油天然气储量估算规范[S].
- [5] 杨友运,赵永刚,陈朝兵.鄂尔多斯盆地西南部延长组致密砂岩储层微观特征[M].北京:科学出版社,2020.
- [6] 肖玲,陈曦,雷宁,等.鄂尔多斯盆地合水地区三叠系长7段页岩油储层特征及主控因素[J].岩性油气藏,2023,35(2):80-93.
- [7] 李文国,张晓鹏,钟玉梅.长石砂岩次生溶孔的形成机理[J].石油与天然气地质,2005(2):220-223+229.
- [8] 窦伟坦,田景春,王峰,等.鄂尔多斯盆地长6油层组集砂岩成岩作用及其对储层性质的影响[J].成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(2):153-158.
- [9] 仓辉,杜贵超,王聪娥,等.甘泉油田延长组长7致密储层孔喉结构特征及分类评价[J].成都理工大学学报(自然科学版),2023,50(5):525-536.
- [10] 许兆林,王凤,许爽,等.低渗透砂岩微观孔隙结构特征及其对储层物性的影响研究[J].石化技术,2022,29(10):152-154+156.
- [11] 尚婷,曹红霞,郭艳琴,等.致密砂岩储层微观孔隙结构特征及物性影响因素分析——以延长探区上古生界山西组为例[J].西北大学学报(自然科学版),2017,47(6):877-886.