

基于核磁共振实验的致密砂砾岩储层孔隙分析 ——以准噶尔盆地东道海子凹陷二叠系 上乌尔禾组为例

李辉¹,袁瑞²,王秋玉¹,谢知益³,张蓉¹,陈梦娜¹,袁云峰¹,肖娜⁴

(1. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院,新疆克拉玛依 834000; 2. 长江大学地球物理与石油资源学院,湖北武汉 430100; 3. 中国石油新疆油田分公司勘探事业部,新疆克拉玛依 834000; 4. 长江大学石油工程学院,湖北武汉 430100)

摘要:准噶尔盆地东道海子凹陷上乌尔禾组发育深层—超深层、特低—超低孔渗砂砾岩储层。根据不同岩性样品核磁共振实验和高压压汞实验结果,分析饱和与离心状态下核磁共振 T_2 谱响应特征,建立致密砂砾岩储层核磁共振 T_2 谱与高压压汞实验孔喉半径转换关系,探讨储层孔隙参数特征。结果表明:准噶尔盆地东道海子凹陷二叠系上乌尔禾组极粗砂岩、砂质细砾岩和细—中砾岩样品的饱和状态 T_2 谱,分别为明显双峰、不明显双峰和单峰形态;极粗砂岩的 T_2 谱峰值弛豫时间和 T_2 截止值较大,砂质细砾岩次之,细—中砾岩较小;极粗砂岩孔隙度较大、裂缝孔隙较发育,细—中砾岩孔隙及裂缝孔隙不发育;从极粗砂岩到细—中砾岩,储层可动孔隙半径下限和可动孔隙度逐渐减小。研究区致密砂砾岩储层整体有效孔隙度下限为 4.81%,对应的可动孔隙度下限为 0.80%。该结果可为东道海子凹陷上乌尔禾组致密砂砾岩储层评价及有利目标预测提供参考。

关键词:准噶尔盆地;东道海子凹陷;二叠系;上乌尔禾组;核磁共振;致密砂砾岩储层;孔隙参数

中图分类号:TE348 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)06-0112-11

0 引言

由砂质和砾质颗粒混合沉积形成的砂砾岩地层是一种重要的油气储集体。在中国敦煌、渤海湾、北部湾和准噶尔等盆地探明中大型砂砾岩油气藏^[1-7]。以陆相页岩作为烃源岩、砂砾岩作为储集层的准噶尔盆地形成大规模全油气系统,是中国陆上砂砾岩油气勘探开发的主战场之一^[8-13]。准噶尔盆地发现玛湖凹陷三叠系百口泉组砂砾岩储层 10 亿吨级大油区^[14-16],核磁共振实验研究有效揭示玛湖凹陷致密砂砾岩储层孔隙结构及流体可流动性特征^[17-20]。毛锐等^[21]利用样品饱和状态核磁共振和高压压汞联测实验数据,计算玛湖凹陷下乌尔禾组砂砾岩储层不同孔隙的毛细管压力,建立其与核磁共振 T_2 谱的转换关系。在不同离心力作用下,崔雁虎等^[22]分析玛 2 井区百口泉组砂砾岩储层核磁共振 T_2 谱形态及其可动流体饱和度变化特征。吴建邦等^[23]利用在线核磁共振驱替和 CT 扫描实验,确定玛湖凹陷不同沉积环境下致密砂砾岩储层可动孔隙半径下限。刘赛等^[24]计算玛湖 1 井区不同地层致密砂砾岩储层核磁共振弛豫时间—高压压汞孔喉半径转换系数,确定不同层位砂砾岩储层可动孔隙半径下限。这些研究为其他地区类似致密砂砾岩储层孔隙结构分析提供参考。

准噶尔盆地中央坳陷东道海子凹陷二叠系平地泉组发育优质湖相烃源岩,与上覆上乌尔禾组砂砾岩和泥岩地层形成良好的“生—储—盖”组合^[25-29],上乌尔禾组致密砂砾岩储层具有重大油气勘探开发潜力^[30-31]。受沉积和成岩作用控制,东道海子凹陷上乌尔禾组砂砾岩地层为深层—超深层、复杂岩性、特低—超低孔渗储层;储层埋藏深度为 3 700~5 200 m;砾岩、砂岩及泥岩等岩性混合堆积,岩性变化快;火山质和泥质充填物充填在砾石及砂岩颗粒之间;储层物性和孔渗关系差^[32-36]。

收稿日期:2025-06-11;编辑:刘丽丽

基金项目:中国石油天然气集团有限公司重大科技专项(2023ZZ24YJ01)

作者简介:李辉(1980—),男,硕士,高级工程师,主要从事石油地质方面的研究。

通信作者:袁瑞,E-mail: yuanrui@yangtzeu.edu.cn

以核磁共振实验为主的东道海子凹陷上乌尔禾组致密砂砾岩储层孔隙参数研究较少。笔者选取研究区 5 口取心井 21 块致密砂砾岩样品,根据核磁共振实验和高压压汞实验测试结果,分析不同岩性储层饱和状态与离心状态下核磁共振 T_2 谱响应特征,建立核磁共振 T_2 谱与高压压汞孔喉半径转换关系,探讨裂缝孔隙度和可动孔隙度与储层孔隙度的关系,确定可动孔隙半径下限和有效孔隙度下限,为东道海子凹陷上乌尔禾组致密砂砾岩储层有利储集体的勘探开发提供支持。

1 区域地质概况

1.1 地层特征

东道海子凹陷位于准噶尔盆地中央坳陷中部,被滴南、莫北、莫索湾和白家海凸起包围,东接五彩湾凹陷(见图 1(a))^[27-28]。研究区地层从老到新依次发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系及第四系。凹陷东部斜坡区二叠系上乌尔禾组(P_3w)厚度约为 250 m,发育大型退覆式砂砾岩扇三角洲沉积(见图 1(b))^[30]。上乌尔禾组自下而上划分为乌一段(P_3w_1)、乌二段(P_3w_2)和乌三段(P_3w_3)。其中,乌一段主要发育灰色砂砾岩夹灰色泥岩沉积,为扇三角洲平原和前缘亚相;乌二段主要发育灰色砂砾岩及灰色、红褐色泥岩,为扇三角洲前缘亚相;乌三段发育厚层红褐色泥岩夹薄层灰色砂岩和砾质砂岩,主要为前扇三角洲亚相(见图 1(c))^[33-34]。

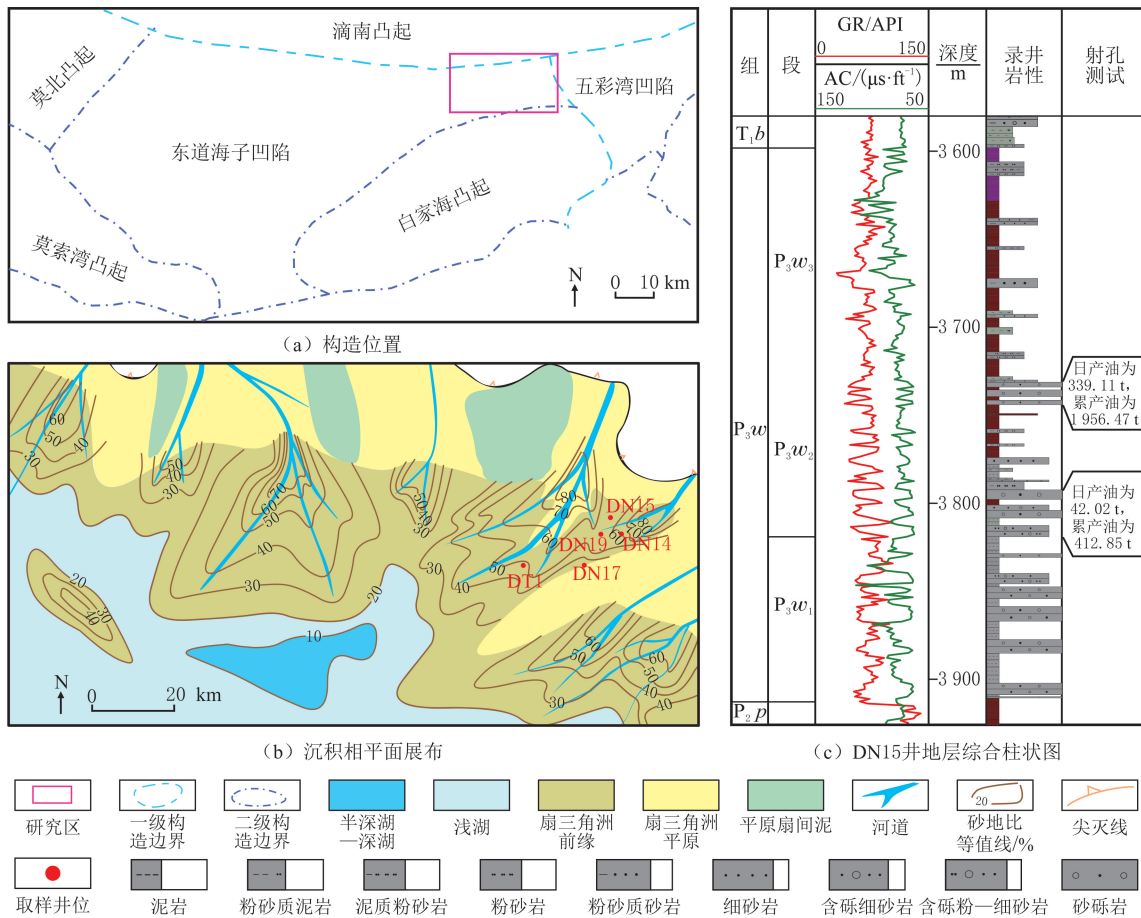


图 1 东道海子凹陷上乌尔禾组构造位置、沉积相平面展布及地层综合柱状图

Fig. 1 Tectonic location, sedimentary facies plane distribution and stratigraphic composite chart of the Upper Wuerhe Formation in the Dongdaohaizi Sag

1.2 储层特征

根据砂砾岩储层粒度划分方案^[37],东道海子凹陷上乌尔禾组砂砾岩储层岩性主要为极粗砂岩、砂质细砾岩、细砾岩、中砾岩及少量砂岩(见图 2(a))。砂砾岩颗粒岩屑成分主要为中基性火山岩,沉积岩次

之,变质岩较少。填隙物中砂质、凝灰质与泥质含量高。胶结物主要为浊沸石、方解石和黏土矿物等。储集空间以孔隙型为主,孔隙—裂缝型次之。储层剩余原生孔隙欠发育,主要以剩余粒间孔为主^[32-33]。根据常规物性分析,砂砾岩储层孔隙度为2.0%~11.0%,平均为7.2%;渗透率为(0.01~60.00)×10⁻³ μm²,平均为1.88×10⁻³ μm²^[35-36]。根据石油天然气行业碎屑岩储层分类标准^[38],上乌尔禾组砂砾岩地层主要属于特低—超低孔渗储层,且孔隙度与渗透率相关关系较差(见图2(b))。

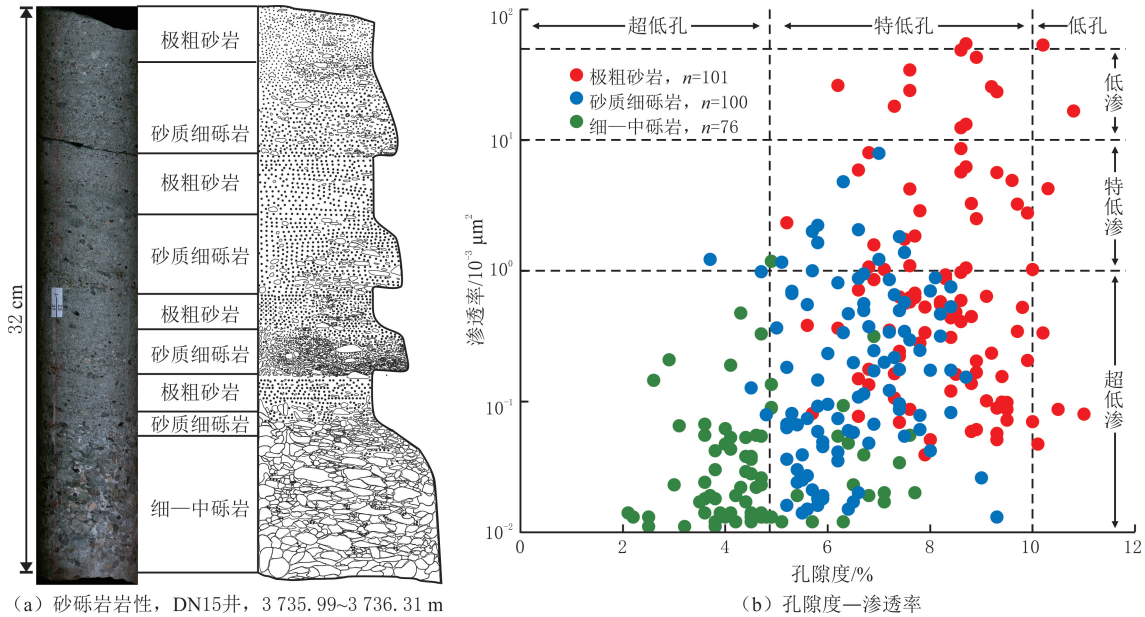


图2 上乌尔禾组致密砂砾岩储层岩性及物性

Fig. 2 Lithology and physical property of tight conglomerate reservoir in the Upper Wuerhe Formation

2 样品与实验

选取东道海子凹陷乌二段5口井全直径岩心,钻取21块直径为2.5 cm的样品。其中,极粗砂岩5块、砂质细砾岩4块、细一中砾岩12块。先对样品进行线切割,获取高度5.0 cm柱样;再对柱样进行洗油、洗盐和称干重等前处理。

核磁共振实验参照SY/T 6490—2023《岩样核磁共振参数实验室测量规范》^[39]。实验在湖北省油气钻采工程重点实验室(长江大学)完成。将样品置于江苏苏州纽迈分析仪器股份有限公司开发的MacroMR12-150H-I型变温高压核磁共振成像分析系统,在120℃温度下进行14 h干燥、抽真空处理。在20 MPa围压下,使用与上乌尔禾组地层水矿化度相近的盐水对样品进行48 h饱和。设置5 s等待时间、0.1 ms回波间隔时间、8次扫描次数和15 000个回波等参数,测量样品在饱和状态下弛豫时间 T_2 谱。饱和状态下 T_2 谱孔隙度分量峰值对应的弛豫时间记为 T_{2peak} 、最大弛豫时间记为 T_{2max} 。利用上海卢湘仪离心机仪器有限公司生产的CSC-12S型超级岩心高速冷冻离心机,选取2.07 MPa离心力对饱和样品进行5 000 r/min的离心处理,再次测量样品离心状态下核磁共振 T_2 谱。在离心状态下核磁共振 T_2 谱累积曲线最大处作X轴平行线,与饱和状态下 T_2 谱累积曲线相交,交点对应的弛豫时间为 T_2 谱截止值,记为 $T_{2cutoff}$ 。

根据高压压汞实验测试的岩心孔喉半径分布,绘制核磁共振 T_2 谱弛豫时间和高压压汞孔喉半径累积分布曲线。采用插值方法,计算相同累积频率刻度下弛豫时间和孔喉半径,对二者进行拟合,明确核磁共振弛豫时间—高压压汞孔喉半径转换关系,将核磁共振弛豫时间转换为孔径分布^[24,40]。

3 实验结果

3.1 饱和状态 T_2 谱特征

研究区21块砂砾岩样品在饱和状态下的核磁共振 T_2 谱显示,极粗砂岩、砂质细砾岩和细一中砾岩

核磁共振 T_2 谱分别呈明显双峰、不明显双峰和单峰形态(见图 3)。

5 块极粗砂岩样品核磁共振 T_2 谱为明显双峰形态(见图 3(a))。几何对称的左峰占主导,明显的右峰与左峰相连。左峰弛豫时间 $T_{2\text{peak}}$ 为 0.50~1.50 ms,右峰弛豫时间 $T_{2\text{peak}}$ 为 11.00~103.00 ms, $T_{2\text{max}}$ 为 200.00~470.00 ms。双峰形态 T_2 谱说明极粗砂岩同时发育微细孔隙与一定数量的微裂缝^[41]。

4 块砂质细砾岩样品核磁共振 T_2 谱为不明显双峰形态(见图 3(b))。尽管右峰与左峰相连,但是右峰不明显,孔隙度分量小于 2%。左峰弛豫时间 $T_{2\text{peak}}$ 为 0.50~1.10 ms,右峰弛豫时间 $T_{2\text{peak}}$ 为 22.00~39.00 ms, $T_{2\text{max}}$ 为 90.00~150.00 ms。不明显双峰形态 T_2 谱说明砂质细砾岩比极粗砂岩微裂缝的发育程度低。

12 块细一中砾岩样品核磁共振 T_2 谱主要为单峰形态(见图 3(c))。 T_2 谱以单峰峰值为中心具备较好的几何对称性,当弛豫时间大于 10 ms 时,孔隙度分量极低。 $T_{2\text{peak}}$ 为 0.17~1.10 ms, $T_{2\text{max}}$ 为 1.30~250.00 ms。单峰形态 T_2 谱说明细一中砾岩内部微细孔隙连续、均匀分布。

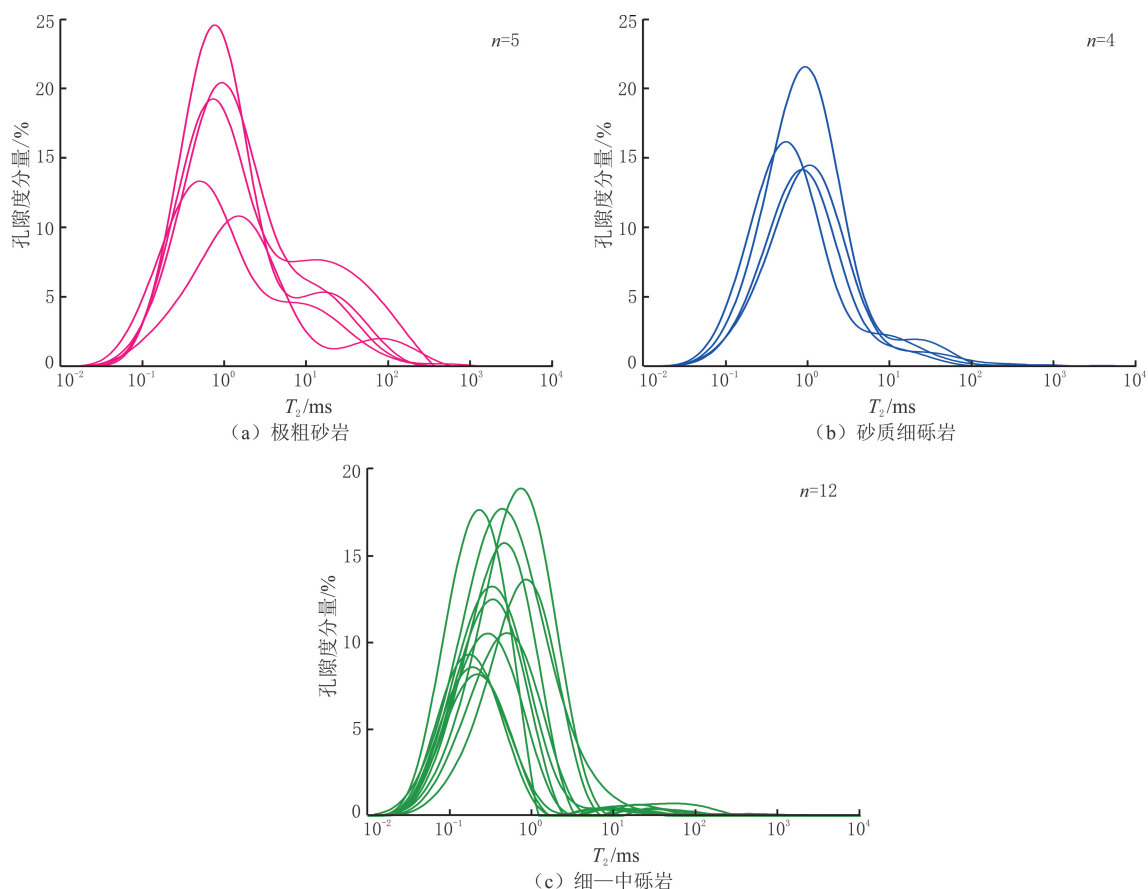


图 3 上乌尔禾组致密砂砾岩储层不同岩性在饱和状态下核磁共振 T_2 谱

Fig. 3 Saturated NMR T_2 spectra of different lithologies from tight conglomerate reservoir in the Upper Wuerhe Formation

3.2 离心状态 T_2 谱特征

对样品离心后,再次测量核磁共振 T_2 谱。由于可动孔隙内流体被离心出来,在离心状态下 T_2 谱幅度整体下降(见图 4)。研究区极粗砂岩样品 T_2 谱的右峰孔隙度分量大幅下降,样品 T_2 谱截止值($T_{2\text{cutoff}}$)为 5.76 ms(见图 4(a));砂质细砾岩样品 T_2 谱孔隙度分量降低,且右峰与左峰断开,样品 $T_{2\text{cutoff}}$ 为 1.93 ms(见图 4(b));细一中砾岩样品 T_2 谱整体略微向左移动,样品 $T_{2\text{cutoff}}$ 为 1.00 ms(见图 4(c))。

不同砂砾岩岩性在饱和与离心状态下核磁共振 T_2 谱形态与 T_2 截止值存在明显差异。极粗砂岩在饱和状态下 T_2 谱 $T_{2\text{peak}}$ 较大,在离心状态下 T_2 谱右峰孔隙度分量下降明显, $T_{2\text{cutoff}}$ 较大,主要为 5.76~9.95 ms,平均为 7.55 ms。砂质细砾岩在饱和状态下 T_2 谱 $T_{2\text{peak}}$ 中等,在离心状态下 T_2 谱右峰与左峰断

开, $T_{2\text{cutoff}}$ 中等, 主要为 1.93~2.97 ms, 平均为 2.46 ms。细一中砾岩在饱和状态下 T_2 谱 $T_{2\text{peak}}$ 较小, 在离心状态下 T_2 谱向左移动, $T_{2\text{cutoff}}$ 较小, 主要为 0.13~2.29 ms, 平均为 1.20 ms, 并且 $T_{2\text{peak}}$ 与 $T_{2\text{cutoff}}$ 表现为较好的线性正相关关系(见图 5)。

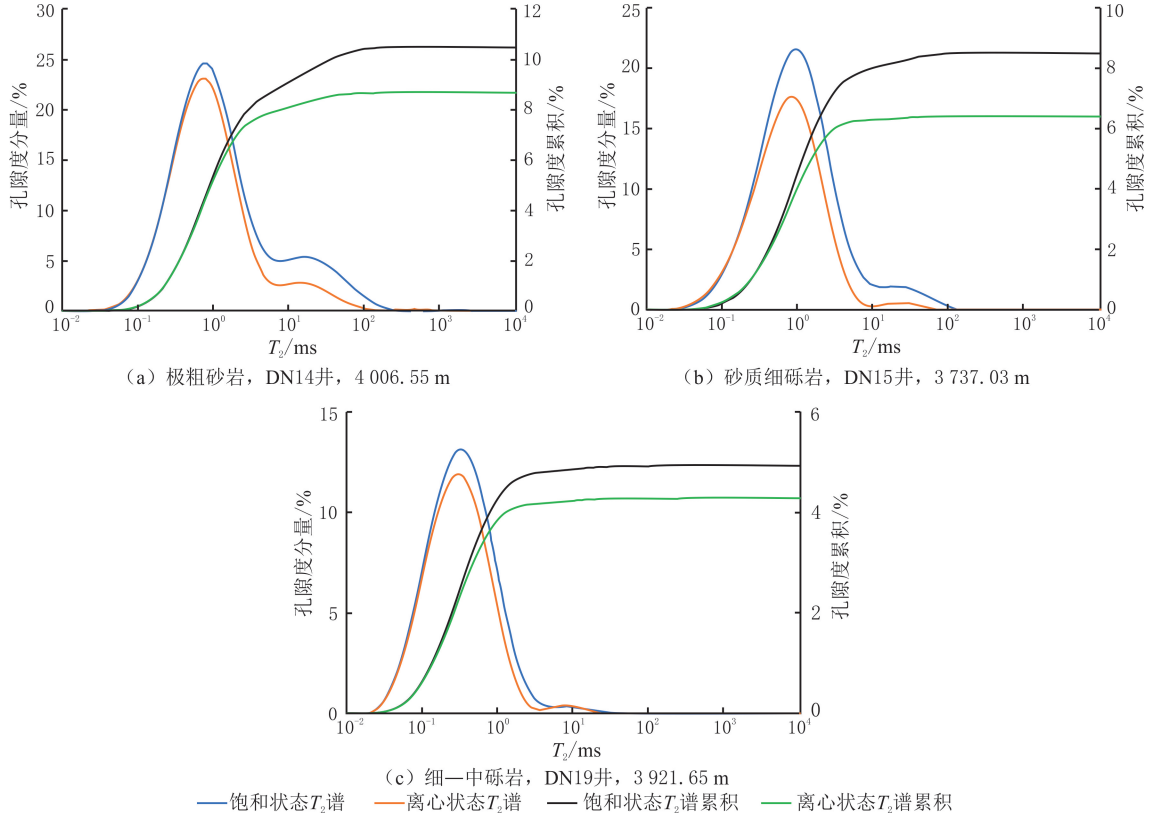


图4 上乌尔禾组致密砂砾岩储层不同岩性在饱和与离心状态下 T_2 谱及累积曲线

Fig. 4 Saturated, centrifuged, and cumulative NMR T_2 spectra of different lithologies from tight conglomerate reservoir in the Upper Wuerhe Formation

3.3 核磁共振孔径分布

根据极粗砂岩、砂质细砾岩和细一中砾岩 3 个平行样品的高压压汞实验结果, 极粗砂岩、砂质细砾岩及细一中砾岩核磁共振 T_2 谱弛豫时间与高压压汞孔喉半径累积分布曲线见图 6。由于弛豫时间与孔径分布的累积分布刻度不一致, 采用插值方法, 计算相同累积频率刻度下弛豫时间和孔喉半径, 分别拟合极粗砂岩(见图 7(a))、砂质细砾岩(见图 7(b)), 以及细一中砾岩(见图 7(c))的核磁共振弛豫时间—高压压汞孔喉半径转换系数, 计算东道海子凹陷上乌尔禾组致密砂砾岩储层极粗砂岩(见图 8(a))、砂质细砾岩(见图 8(b)), 以及细一中砾岩(见图 8(c))的核磁共振孔径与孔隙度分量分布。核磁孔径分布曲线形态与 T_2 谱形态基本一致。极粗砂岩核磁孔径最大值较大, 砂质细砾岩的次之, 细一中砾岩的较小。

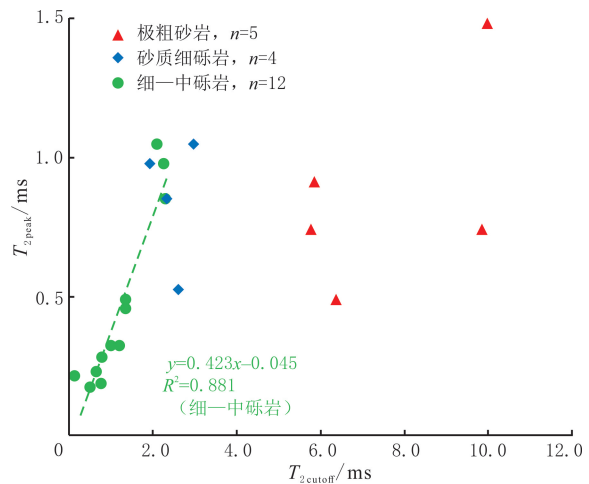


图5 上乌尔禾组致密砂砾岩储层不同岩性 $T_{2\text{cutoff}}$ 与 $T_{2\text{peak}}$ 关系

Fig. 5 Correlation between $T_{2\text{cutoff}}$ and $T_{2\text{peak}}$ of different lithologies from tight conglomerate reservoir in the Upper Wuerhe Formation

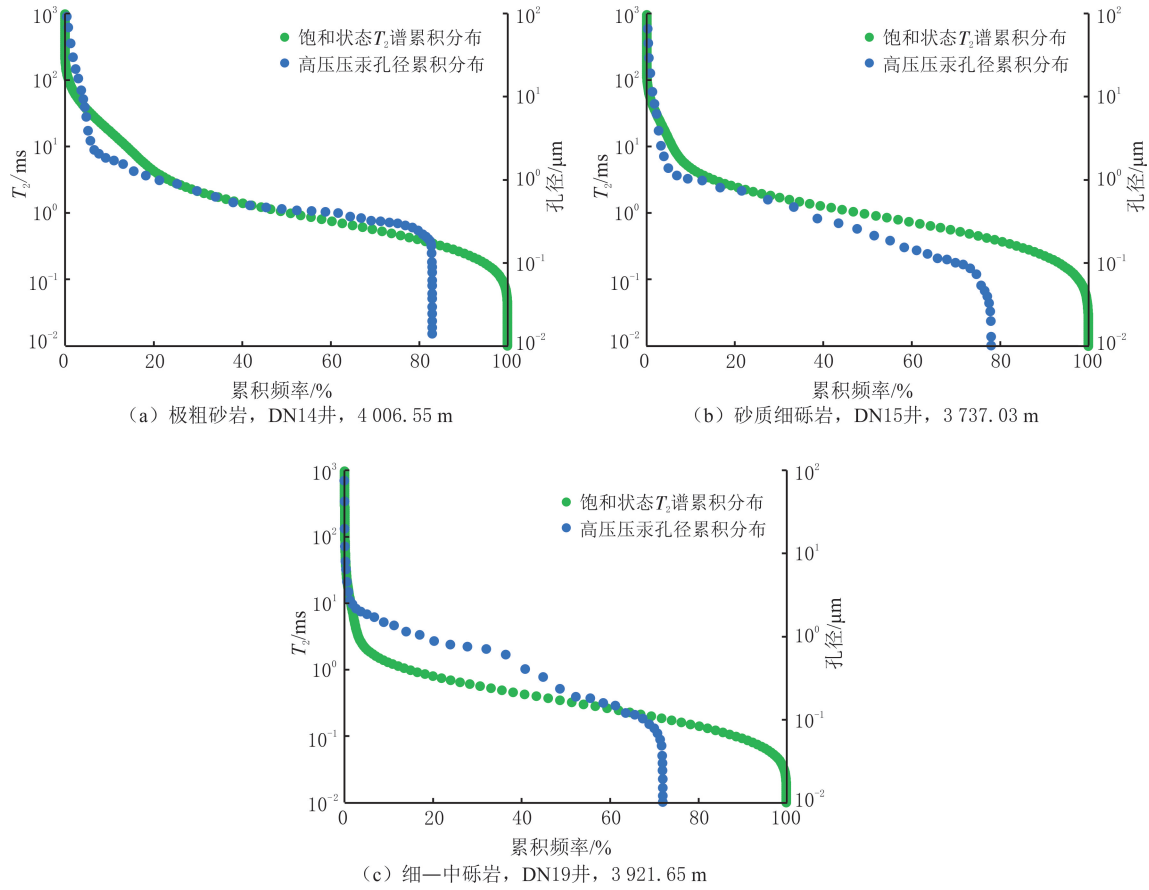
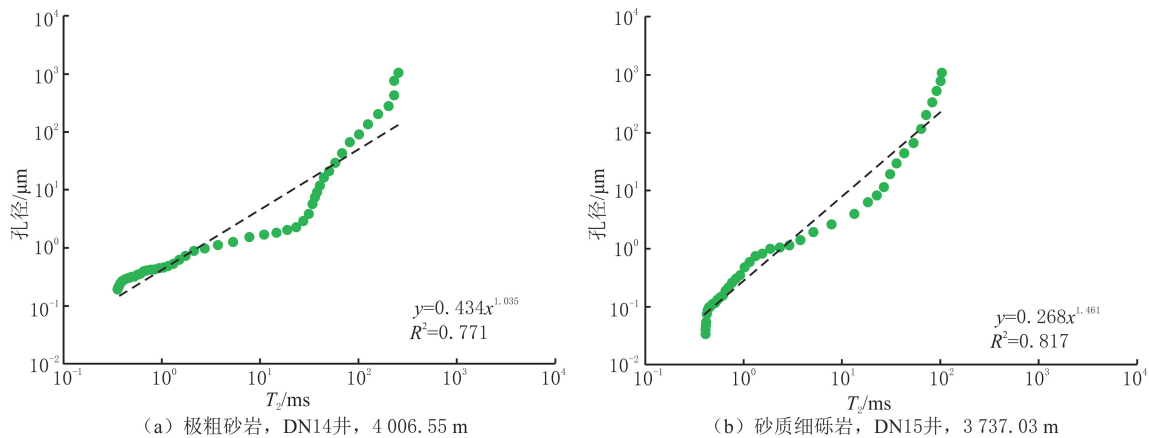


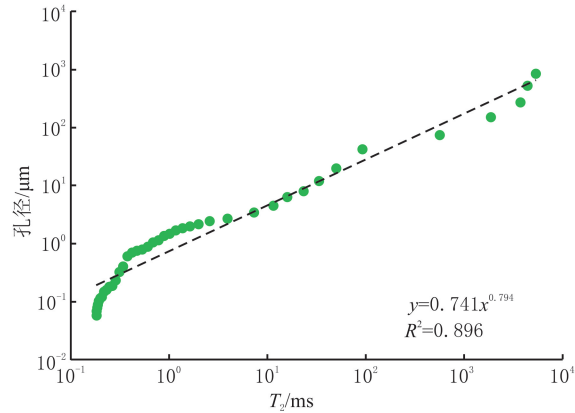
图 6 上乌尔禾组致密砂砾岩储层不同岩性核磁共振弛豫时间与高压压汞孔喉半径累积曲线
 Fig. 6 Cumulative curves of NMR relaxation time and high-pressure Hg injection pore radius of different lithologies from tight conglomerate reservoir in the Upper Wuerhe Formation

4 储层孔隙特征

4.1 裂缝孔隙度

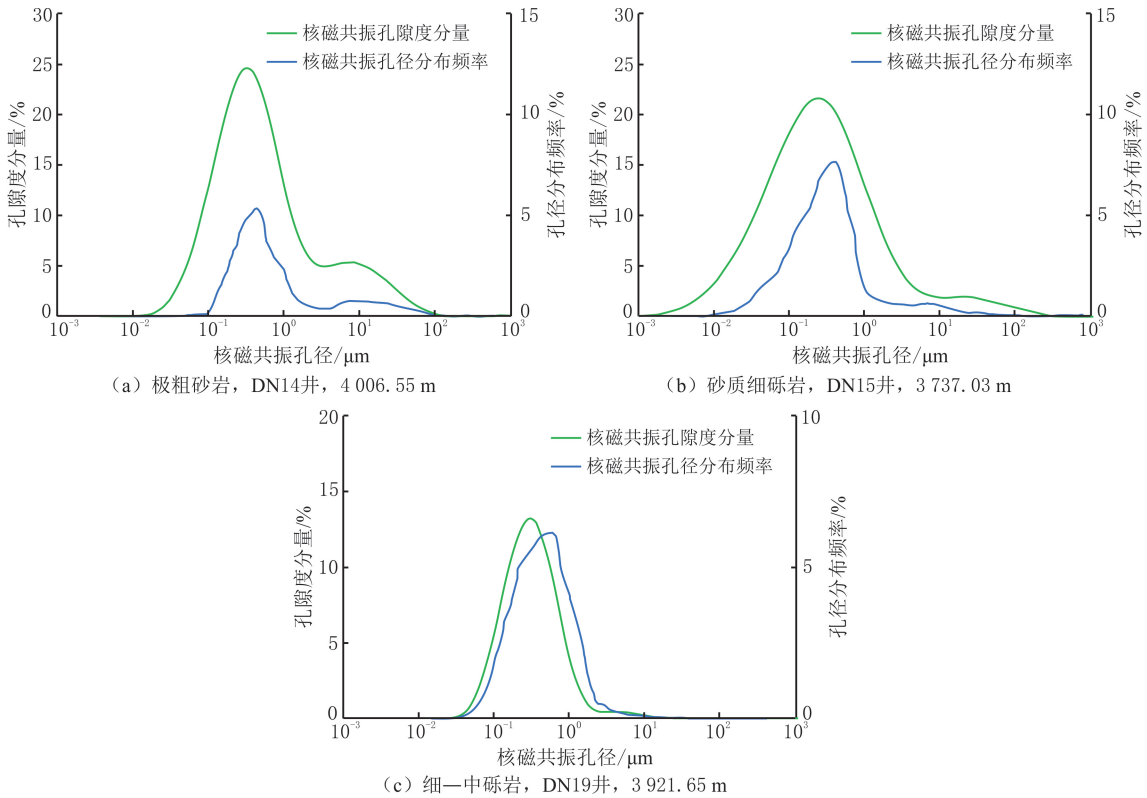
根据研究区 21 块砂砾岩样品核磁共振实验结果,极粗砂岩、砂质细砾岩和细一中砾岩的孔隙度分别为 5.42%~10.61%(平均为 8.64%)、5.50%~8.50%(平均为 6.59%)和 2.53%~7.69%(平均为 4.70%)。根据饱和状态下核磁共振 T_2 谱分布特征,定义左峰下包面积代表基质孔隙、右峰下包面积代表微裂缝,分别求取孔隙度分量之和,得到基质孔隙度和裂缝孔隙度。极粗砂岩、砂质细砾岩和细一中砾





(c) 细—中砾岩, DN19井, 3 921.65 m

图 7 上乌尔禾组致密砂砾岩储层不同岩性核磁共振弛豫时间—高压压汞孔喉半径转换关系
Fig. 7 Conversion relations between NMR relaxation time and high-pressure Hg injection pore radius of different lithologies from tight conglomerate reservoir in the Upper Wuerhe Formation



(a) 极粗砂岩, DN14井, 4 006.55 m

(b) 砂质细砾岩, DN15井, 3 737.03 m

(c) 细—中砾岩, DN19井, 3 921.65 m

图 8 上乌尔禾组致密砂砾岩储层不同岩性核磁共振孔径分布

Fig. 8 Pore radius distribution of NMR of different lithologies from tight conglomerate reservoir in the Upper Wuerhe Formation

岩的基质孔隙度分别为 4.79%~8.84% (平均为 7.06%)、5.31%~8.05% (平均为 6.22%) 和 2.44%~7.07% (平均为 4.59%); 裂缝孔隙度分别为 0.63%~3.00% (平均为 1.58%)、0.19%~0.55% (平均为 0.38%) 和 0.07%~0.34% (平均为 0.12%)。极粗砂岩中硅质矿物具有较高的硬度和抗压能力, 通常有利于原生粒间孔隙的保持和微裂缝的形成, 基质及裂缝孔隙度较高。细—中砾岩中颗粒之间被砂质、凝灰质及泥质杂基充填, 且发育多种胶结物, 基质及裂缝孔隙度较小。

极粗砂岩、砂质细砾岩和细—中砾岩的裂缝孔隙度与其在核磁共振孔隙度中占比呈较好线性正相关关系(见图 9(a)), 说明上乌尔禾组致密砂砾岩储层微裂缝越发育, 微裂缝在孔隙度中占比越大, 即裂缝对储层储集空间贡献较大。极粗砂岩和砂质细砾岩主要为孔隙—裂缝型储层, 核磁共振孔隙度与裂缝孔隙

度为中等线性正相关关系(见图 9(b))。

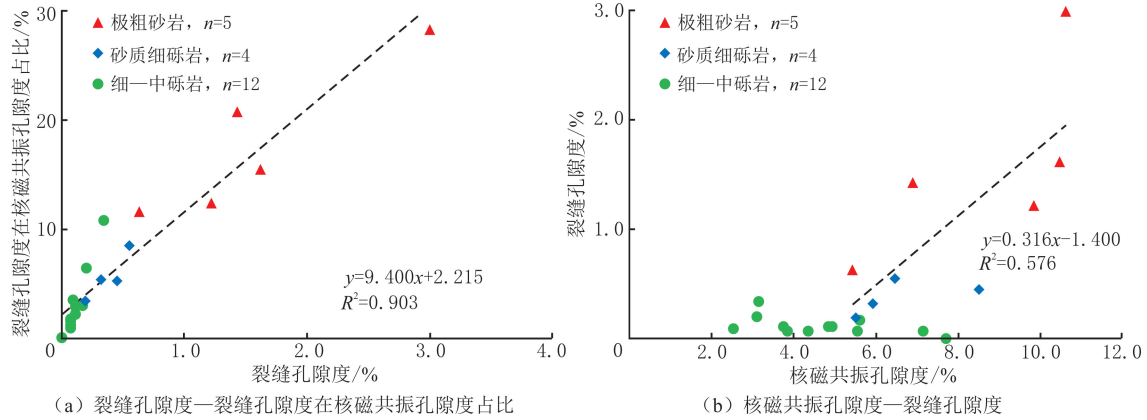


图 9 上乌尔禾组致密砂砾岩储层不同岩性裂缝孔隙参数

Fig. 9 Fracture porosity parameters of different lithologies from tight conglomerate reservoir in the Upper Wuerhe Formation

4.2 可动孔隙度

根据核磁共振弛豫时间—高压压汞孔喉半径转换关系,将各个样品的核磁共振 T_2 谱截止值代入,计算可动孔隙半径下限^[24]。若孔喉半径大于可动孔隙半径下限,为可动孔隙;否则,为不可动孔隙。统计可动孔隙半径下限以上和以下的核磁共振孔隙度分量,分别得到储层可动孔隙度和不可动孔隙度。极粗砂岩可动孔隙半径下限为 $2.66 \sim 4.68 \mu\text{m}$ (平均为 $3.52 \mu\text{m}$)、可动孔隙度为 $0.89\% \sim 2.87\%$ (平均为 2.07%);砂质细砾岩可动孔隙半径下限为 $0.70 \sim 1.31 \mu\text{m}$ (平均为 $1.01 \mu\text{m}$)、可动孔隙度为 $0.91\% \sim 2.21\%$ (平均为 1.32%);细一中砾岩可动孔隙半径下限为 $0.15 \sim 1.43 \mu\text{m}$ (平均为 $0.83 \mu\text{m}$)、可动孔隙度为 $0.28\% \sim 2.43\%$ (平均为 0.78%)(见图 10(a))。整体上,从极粗砂岩到细一中砾岩,储层孔隙度、可动孔隙半径下限和可动孔隙度逐渐减小。

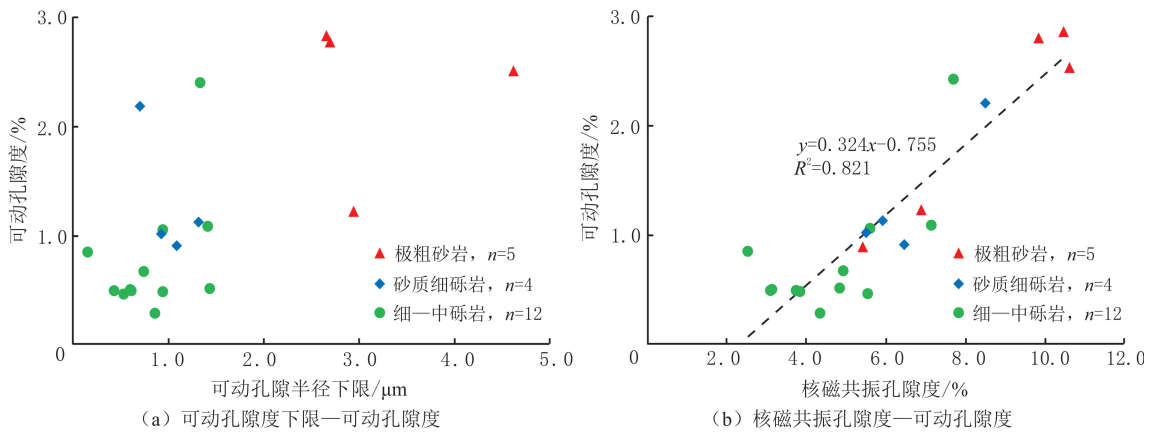


图 10 上乌尔禾组致密砂砾岩储层不同岩性可动孔隙参数

Fig. 10 Mobile pore parameter of different lithologies from tight conglomerate reservoir in the Upper Wuerhe Formation

研究区 21 块样品的平均不可动孔隙度为 4.81% ,因此认为储层有效孔隙度下限约为 4.81% ,即当地层孔隙度大于 4.81% 时,储层才有效。根据玛湖凹陷百口泉组砂砾岩储层深度与有效孔隙下限的关系,东道海子凹陷上乌尔禾组深层—超深层砂砾岩储层的有效孔隙度下限约为 $4.20\% \sim 5.86\%$,与研究区核磁共振实验得到的 4.81% 有效孔隙度下限基本一致。上乌尔禾组砂砾岩储层核磁共振孔隙度与可动孔隙度在整体上表现为较好的线性正相关关系(见图 10(b))。储层有效孔隙度下限为 4.81% ,对应的可动孔隙度下限为 0.80% 。利用储层孔隙度,可以估算东道海子凹陷上乌尔禾组致密砂砾岩储层可动孔隙度。

5 结论

(1)准噶尔盆地东道海子凹陷二叠系上乌尔禾组极粗砂岩、砂质细砾岩和细一中砾岩,在饱和状态下核磁共振 T_2 谱分别为明显双峰、不明显双峰和单峰形态。极粗砂岩的孔隙度分量峰值弛豫时间和 T_2 截止值较大,砂质细砾岩的次之,细一中砾岩的较小。

(2)研究区极粗砂岩、砂质细砾岩和细一中砾岩的核磁共振孔隙度分别为 5.42%~10.61%、5.50%~8.50%和 2.53%~7.69%;裂缝孔隙度分别为 0.63%~3.00%、0.19%~0.55%和 0.07%~0.34%。极粗砂岩裂缝孔隙度较发育。储层裂缝孔隙度与其在核磁共振孔隙度中占比呈正相关关系。

(3)研究区极粗砂岩、砂质细砾岩和细一中砾岩的平均可动孔隙半径下限分别为 3.52、1.01 和 0.83 μm ,平均可动孔隙度分别为 2.07%、1.32%和 0.78%。从极粗砂岩到细一中砾岩,储层孔隙度、可动孔隙半径下限和可动孔隙度逐渐减小。上乌尔禾组致密砂砾岩储层有效孔隙度下限为 4.81%,对应的可动孔隙度下限为 0.80%。

参考文献(References):

- [1] 胡鑫,丁晓琪,张歆妍,等. 渤南北带沙三一沙四段砂砾岩储层特征及发育主控因素[J]. 东北石油大学学报,2021,45(1):55-61.
HU Xin, DING Xiaoqi, ZHANG Xinyan, et al. Glutenite reservoir characteristics and main controlling factors of E_{s3} - E_{s4} in northern zone of Bonan[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021,45(1):55-61.
- [2] 唐勇,宋永,何文军,等. 准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律[J]. 石油与天然气地质,2022,43(1):132-148.
TANG Yong, SONG Yong, HE Wenjun, et al. Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022,43(1):132-148.
- [3] 周晓光,黄晓波,王启明,等. 渤海海域石南陡坡带多期砂砾岩扇体识别与展布特征[J]. 东北石油大学学报,2020,44(2):46-55.
ZHOU Xiaoguang, HUANG Xiaobo, WANG Qiming, et al. Identification and description of the multi-stage sandy conglomerate fan body in Shinan Steep Slope Zone, Bohai Sea[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2020,44(2):46-55.
- [4] 彭小东,张辉,汪新光,等. 低渗砂砾岩储层三元孔隙结构特征及其渗流机理与改善水驱对策[J]. 地球科学,2023,48(8):2960-2978.
PENG Xiaodong, ZHANG Hui, WANG Xinguang, et al. Enhanced water-drive recovery based on microscopic seepage mechanism for low permeability glutenite reservoir with ternary pore-throat structure characteristics of WS Field[J]. Earth Science, 2023,48(8):2960-2978.
- [5] 王永诗,巩建强,陈冬霞,等. 渤海湾盆地东营凹陷盐家地区深层砂砾岩油气藏相态演化及成藏过程[J]. 石油与天然气地质,2023,44(5):1159-1172.
WANG Yongshi, GONG Jianqiang, CHEN Dongxia, et al. Phase evolution and accumulation mode of hydrocarbons in deep coarse-grained clastic reservoirs in the Yanjia Area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023,44(5):1159-1172.
- [6] 王波,郭强,王春伟,等. 基于低场核磁共振的致密储层孔隙结构特征及流体可动性研究:以敦煌盆地五墩凹陷侏罗系为例[J]. 西北地质,2024,57(5):156-165.
WANG Bo, GUO Qiang, WANG Chunwei, et al. Pore structure characteristics and fluid mobility of tight reservoir based on nuclear magnetic resonance: a case study of Jurassic in Wudun Sag, Dunhuang Basin[J]. Northwestern Geology, 2024,57(5):156-165.
- [7] 雷文智,陈冬霞,成铭,等. 东营凹陷古近系深层砂砾岩油气藏差异化形成机理及模式[J]. 地质学报,2025,99(3):929-944.
LEI Wenzhi, CHEN Dongxia, CHENG Ming, et al. Differential formation mechanism and model of Paleogene deep sandy conglomerate reservoirs in the Dongying Sag[J]. Acta Geologica Sinica, 2025,99(3):929-944.
- [8] 支东明,宋永,何文军,等. 准噶尔盆地中一下二叠统页岩油地质特征、资源潜力及勘探方向[J]. 新疆石油地质,2019,40(4):389-401.
ZHI Dongming, SONG Yong, HE Wenjun, et al. Geological characteristics, resource potential and exploration direction of shale oil in Middle-Lower Permian, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019,40(4):389-401.
- [9] 唐勇,曹剑,何文军,等. 从玛湖大油区发现看全油气系统地质理论发展趋势[J]. 新疆石油地质,2021,42(1):1-9.
TANG Yong, CAO Jian, HE Wenjun, et al. Development tendency of geological theory of total petroleum system: insights from the discovery of Mahu large oil province[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021,42(1):1-9.
- [10] 唐勇,何文军,姜懿洋,等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相页岩油气富集条件与勘探方向[J]. 石油学报,2023,44(1):125-143.
TANG Yong, HE Wenjun, JIANG Yiyang, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Permian saline lacustrine shale oil and gas in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023,44(1):125-143.
- [11] 宋永,唐勇,何文军,等. 准噶尔盆地油气勘探新领域、新类型及勘探潜力[J]. 石油学报,2024,45(1):52-68.
SONG Yong, TANG Yong, HE Wenjun, et al. New fields, new types and exploration potentials of oil-gas exploration in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024,45(1):52-68.

- [12] 王金铎,张关龙,庄新明,等.准噶尔盆地重点领域油气勘探研究进展及潜力方向[J].油气地质与采收率,2024,31(4):24-41.
WANG Jinduo, ZHANG Guanlong, ZHUANG Xinming, et al. Research progress and potential directions of oil and gas exploration in key fields of Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024,31(4):24-41.
- [13] 孙靖,尤新才,郑孟林,等.准噶尔盆地深层—超深层二叠系碎屑岩储层特征及控制因素[J].中国石油勘探,2024,29(5):120-135.
SUN Jing, YOU Xincan, ZHENG Menglin, et al. Characteristics and controlling factors for the Permian clastic reservoirs in deep to ultra-deep formations in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2024,29(5):120-135.
- [14] 唐勇,徐洋,李亚哲,等.玛湖凹陷大型浅水退覆式扇三角洲沉积模式及勘探意义[J].新疆石油地质,2018,39(1):16-22.
TANG Yong, XU Yang, LI Yazhe, et al. Sedimentation model and exploration significance of large-scaled shallow retrogradation fan delta in Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018,39(1):16-22.
- [15] 吴俊,白雨,余兴,等.玛湖凹陷南斜坡MH1井区百口泉组岩性油气藏成藏模式[J].新疆石油地质,2018,39(1):70-75.
WU Jun, BAI Yu, YU Xing, et al. Hydrocarbon accumulation model of lithological reservoirs in Baikouquan Formation of wellblock MH-1 on the southern slope of Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018,39(1):70-75.
- [16] 支东明,唐勇,郑孟林,等.玛湖凹陷源上砾岩大油区形成分布与勘探实践[J].新疆石油地质,2018,39(1):1-8.
ZHI Dongming, TANG Yong, ZHENG Menglin, et al. Discovery, distribution and exploration practice of large oil provinces of a-bove-source conglomerate in Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018,39(1):1-8.
- [17] 杜猛,向勇,贾宁洪,等.玛湖凹陷百口泉组致密砂砾岩储层孔隙结构特征[J].岩性油气藏,2021,33(5):120-131.
DU Meng, XIANG Yong, JIA Ninghong, et al. Pore structure characteristics of tight glutenite reservoirs of Baikouquan Formation in Mahu Sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2021,33(5):120-131.
- [18] 朱明,贾春明,穆玉庆,等.基于正态分布拟合的致密砂砾岩储层核磁共振测井可变 T_2 截止值计算方法[J].石油地球物理勘探,2021,56(3):612-621.
ZHU Ming, JIA Chunming, MU Yuqing, et al. A method of predicting T_2 cutoffs from NMR logging data of tight glutenite reservoirs based on normal distribution simulation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021,56(3):612-621.
- [19] 金国文,王堂宇,刘忠华,等.基于核磁共振测井的砂砾岩储层分类与产能预测方法[J].石油学报,2022,43(5):648-657.
JIN Guowen, WANG Tangyu, LIU Zhonghua, et al. Classification and productivity prediction of glutenite reservoirs based on NMR logging[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022,43(5):648-657.
- [20] 孙灵辉,萧汉敏,谭龙,等.致密砂砾岩储层孔隙结构对比及差异机制研究[J].地质学报,2022,96(6):2155-2172.
SUN Linghui, XIAO Hanmin, TAN Long, et al. Pore structure comparison and difference mechanism between tight sandstone and tight conglomerate reservoirs[J]. Acta Geologica Sinica, 2022,96(6):2155-2172.
- [21] 毛锐,申子明,常秋生,等.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系下乌尔禾组核磁共振测井含油性评价方法[J].中国石油勘探,2021,26(4):162-172.
MAO Rui, SHEN Ziming, CHANG Qiusheng, et al. Evaluation method of reservoir oil-bearing property by NMR logging of Permian Lower Wuerhe Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(4):162-172.
- [22] 崔雁虎,朱国涛,朱杰,等.玛2井区百口泉组砂砾岩储层可动流体赋存特征及主控因素[J].东北石油大学学报,2022,46(6):14-25.
CUI Yanhu, ZHU Guotao, ZHU Jie, et al. Occurrence characteristics and control factors of movable fluids in Baikouquan Formation glutenite reservoirs in Ma 2 Block[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022,46(6):14-25.
- [23] 吴建邦,杨胜来,李强,等.准噶尔盆地玛湖凹陷致密砂砾岩储层可动孔隙界限[J].大庆石油地质与开发,2022,41(6):167-174.
WU Jianbang, YANG Shenglai, LI Qiang, et al. Movable pore limits of tight glutenite reservoir in Mahu Sag of Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022,41(6):167-174.
- [24] 刘赛,吴建邦,周伟,等.玛湖1井区致密砂砾岩储层物性特征及其对流体可动性的影响[J].西安石油大学学报(自然科学版),2023,38(6):15-23.
LIU Sai, WU Jianbang, ZHOU Wei, et al. Physical properties of tight glutenite reservoirs in Mahu 1 wellblock and their effects on fluid mobility[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2023,38(6):15-23.
- [25] 冯德浩,刘成林,杨海波,等.准噶尔盆地东部中二叠统咸化湖相烃源岩生气潜力及天然气勘探意义[J].石油与天然气地质,2024,45(5):1289-1304.
FENG Dehao, LIU Chenglin, YANG Haibo, et al. Gas-generating potential of the Middle Permian saline lacustrine source rocks and significance for natural gas exploration in the Eastern Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024,45(5):1289-1304.
- [26] 李二庭,米巨磊,张宇,等.准噶尔盆地东道海子凹陷二叠系平地泉组烃源岩特征[J].岩性油气藏,2024,36(1):88-97.
LI Erting, MI Julei, ZHANG Yu, et al. Source rock characteristics of Permian Pingdiqian Formation in Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2024,36(1):88-97.
- [27] 王大兴,胡海燕,邹佳群,等.准噶尔盆地东道海子凹陷二叠系下乌尔禾组陆相页岩气形成富集条件及主控因素[J].地质科技通报,2024,43(4):98-112.
WANG Daxing, HU Haiyan, ZOU Jiaqun, et al. Enrichment conditions and main controlling factors of continental shale gas in the

- Permian Lower Wuerhe Formation in the Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(4):98-112.
- [28] 杨海波,冯德浩,杨小艺,等.准噶尔盆地东道海子凹陷二叠系平地泉组烃源岩特征及热演化史模拟[J].*岩性油气藏*,2024,36(5):156-166.
YANG Haibo, FENG Dehao, YANG Xiaoyi, et al. Characteristics of source rocks and thermal evolution simulation of Permian Pingdiqian Formation in Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024,36(5):156-166.
- [29] 尹晟宇,龚德瑜,苏静,等.准噶尔盆地东道海子凹陷及周缘上古生界原油成因来源[J].*高校地质学报*,2024,30(2):218-230.
YIN Shengyu, GONG Deyu, SU Jing, et al. Genetic types and origins of Upper Paleozoic-reservoired oil in Dongdaohaizi Sag and its surrounding areas in the Junggar Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2024,30(2):218-230.
- [30] 李艳平,邹红亮,李雷,等.准噶尔盆地东道海子凹陷上乌尔禾组油气勘探思路及发现[J].*新疆石油地质*,2022,43(2):127-134.
LI Yanping, ZOU Hongliang, LI Lei, et al. Petroleum exploration ideas and discoveries in Upper Wuerhe Formation, Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022,43(2):127-134.
- [31] 支东明,谢安,杨帆,等.准噶尔盆地东部二叠系富烃凹陷全油气系统勘探前景[J].*地质力学学报*,2024,30(5):781-794.
ZHI Dongming, XIE An, YANG Fan, et al. Exploration prospects of the whole oil and gas system in the Permian hydrocarbon depressions in the Eastern Junggar Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 2024,30(5):781-794.
- [32] 曹江骏,罗静兰,马迪娜·马吾提汗,等.微观非均质性对砂砾岩储层致密化的影响机理:以准噶尔盆地东道海子凹陷 DN8 井区上二叠统梧桐沟组为例[J].*地球科学*,2021,46(10):3435-3452.
CAO Jiangjun, LUO Jinglan, MADINA·Mawutihan, et al. Influence mechanism of micro-heterogeneity on conglomerate reservoir densification: a case study of Upper Permian Wutonggou Formation in DN8 Area of Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin[J]. *Earth Science*, 2021,46(10):3435-3452.
- [33] 胡鑫,邹红亮,胡正舟,等.扇三角洲砂砾岩储层特征及主控因素:以准噶尔盆地东道海子凹陷东斜坡二叠系上乌尔禾组为例[J].*东北石油大学学报*,2021,45(6):15-26.
HU Xin, ZOU Hongliang, HU Zhengzhou, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of glutenite reservoir in fan delta glutenite: a case study of the Upper Urho Formation of Permian in the east slope of Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021,45(6):15-26.
- [34] 汪孝敬,赵长永,邹红亮,等.东道海子凹陷东斜坡上乌尔禾组源—汇控砂控相规律[J].*西安石油大学学报(自然科学版)*,2022,37(5):36-46.
WANG Xiaojing, ZHAO Changyong, ZOU Hongliang, et al. Source-sink sandbody control and facies control law of Upper Wuerhe Formation in the east slope of Dongdaohaizi Sag[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2022,37(5):36-46.
- [35] 曹江骏,罗静兰,马迪娜·马吾提汗,等.差异性沉积—成岩演化过程对砂砾岩储层致密化的影响:以准噶尔盆地东部二叠系上乌尔禾组为例[J].*中国矿业大学学报*,2022,51(5):923-940.
CAO Jiangjun, LUO Jinglan, MADINA·Mawutihan, et al. Influence of differential sedimentary-diagenetic evolution on the densification of the sandy conglomerate reservoir: a case study of the Permian Upper Wuerhe Formation in Eastern Junggar Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022,51(5):923-940.
- [36] 王秋玉,刘超威,闫文琦,等.准噶尔盆地东部凹陷区二叠系上乌尔禾组深层—超深层储层特征及发育模式[J].*天然气地球科学*,2024,35(2):259-274.
WANG Qiuyu, LIU Chaowei, YAN Wenqi, et al. Characteristics and development model of deep-ultra deep reservoirs in the Upper Wuerhe Formation of Permian in the sags of Eastern Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024,35(2):259-274.
- [37] 张昌民,王绪龙,朱锐,等.准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组岩石相划分[J].*新疆石油地质*,2016,37(5):606-614.
ZHANG Changmin, WANG Xulong, ZHU Rui, et al. Litho-facies classification of Baikouquan Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016,37(5):606-614.
- [38] 国家能源局. 油气储层评价方法;SY/T 6285—2011[S].北京:石油工业出版社,2011:1-2.
National Energy Administration. Evaluation method of oil and gas reservoirs; SY/T 6285—2011[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011:1-2.
- [39] 国家能源局. 岩样核磁共振参数实验室测量规范;SY/T 6490—2023[S].北京:石油工业出版社,2023:1-11.
National Energy Administration. Specification for measurement of rock NMR parameter in laboratory; SY/T 6490—2023[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023:1-11.
- [40] 李爱芬,任晓霞,王桂娟,等.核磁共振研究致密砂岩孔隙结构的方法及应用[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*,2015,39(6):92-98.
LI Aifen, REN Xiaoxia, WANG Guijuan, et al. Characterization of pore structure of low permeability reservoirs using a nuclear magnetic resonance method[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2015,39(6):92-98.