

DOI: 10.12401/j.nwg.2023026

准噶尔盆地沙湾凹陷风城组储层特征及物性控制因素分析

贾春明¹, 潘拓¹, 余海涛¹, 岳喜伟¹, 张洁¹, 况昊², 于景维^{3,*}

(1. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830014; 2. 重庆科技学院, 重庆 401331;
3. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 为进一步挖掘沙湾凹陷风城组油气勘探开发潜力, 需要针对储层基本特征以及物性控制因素进行详细研究。通过岩心观察、薄片分析等多种研究手段, 分析储层特征以及物性控制因素, 为优质储层的预测奠定基础。结果表明, 风城组储集岩性以砂砾岩为主, 储集空间以微裂缝为主, 普遍见片状片弯状喉道, 孔隙结构较差, 属于特低孔特低渗储层。构造、沉积和成岩作用为储层物性主要控制因素, 断裂的发育以及异常压力的形成为微裂缝的发育提供基础条件, 古地貌对沉积水动力条件起到重要控制作用, 岩石成分和结构差异加剧储层物性平面的非均质性。成岩作用控制储层最终物性, 压实和胶结作用造成储层物性变差, 溶蚀作用的发育极大改善储层的物性。研究区北部凹槽内断裂带附近的风城组砂岩类储层为下一步勘探的重点目标。

关键词: 风城组; 储层特征; 控制因素; 沙湾凹陷; 准噶尔盆地

中图分类号: P536; TE132

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)04-0049-13

Controlling Factors on Physical Property and Reservoir Characters of Fengcheng Formation in Shawan Depression, Junggar Basin

JIA Chunming¹, PAN Tuo¹, YU Haitao¹, YUE Xiwei¹, ZHANG Jie¹, KUANG Hao², YU Jingwei^{3,*}

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development of Xinjiang Oilfield Company, Urumchi 830014, Xinjiang, China;
2. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 3. Petroleum Institute of China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, Karamay 834000, Xinjiang, China)

Abstract: It is important to search controlling factors on physical property and reservoir characters of Fengcheng Formation in Shawan depression, where need to excavate large oil and gas potential. Petrology, reserve characters and controlling factors on physical property of Fengcheng Formation were analysed in detail through core observation, microscope image analysis, SEM, electro probe micro-analysis, physical property and oil testing data. Rock type of Fengcheng Formation was dominated by sandy conglomerate, and micro cracks were main reserve spaces with bending throats; The reservoir belonged to low porosity and low permeability

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2023-03-01; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目“砂砾岩致密储层甜点成因机理”(2021D01A201)和国家重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05001-005-01)联合资助。

作者简介: 贾春明(1975-), 男, 高级工程师, 从事石油地质研究工作。E-mail: 273823801@qq.com。

* 通讯作者: 于景维(1985-), 男, 博士, 副教授, 从事储层沉积学、层序地层学教学和科研。E-mail: yyjjww-1985@163.com。

with complex pore structures; Tectonic, sedimentary and diagenetic were controlling factors on physical property, development of faults and abnormal pressure built basic formation for micro cracks, ancient landscape had an important control on hydrodynamic conditions, differences on composition and construction of rocks intensified plane heterogeneity of physical property. Diagenetic controlled final physical property, compaction and cementation made physical property of reservoirs poorer, while corrosion made it better.

Keywords: Fengcheng Formation; reservoir character; controlling factors; Shawan depression; Junggar basin

近些年,准噶尔盆地玛湖凹陷在二叠系风城组取得油气勘探的重大突破(何文军等, 2021, 2023),其原因在于大量扎实的基础研究,尤其是前人针对风城组储层沉积背景(秦志军等, 2016; 何衍鑫等, 2018; 张志杰等, 2018; 李威等, 2020)、岩石学(曹剑等, 2015; 江懋才等, 2016; 汪梦诗, 2017; 汪梦诗等, 2018)、矿物学(江懋才等, 2016; 余宽宏等, 2016; 赵研等, 2020)以及控制因素(陈磊等, 2012; 阿布力米提等, 2015; 张鸾洋等, 2015; 孙乐等, 2016)等方面做了详实的分析,为风城组油气的持续勘探开发奠定坚实基础。除玛湖凹陷外,近两年在沙湾凹陷斜坡区部署的ST002井以及CP24井均在风城组获得工业油流。相较于玛湖凹陷风城组储层丰富研究成果,沙湾凹陷斜坡区风城组储层相关研究几乎为空白,不利于该区风城组油气的进一步勘探开发。因此,为给研究区风城组油气勘探开发提供有效理论指导,同时为有利储层发育区带的预测提供依据,本次研究利用岩心观察、薄片分析、高压压汞、扫描电镜、电子探针以及物性分析等多项测试资料,针对研究区风城组储层特征及控制因素进行详实分析。

1 区域地质概况

沙湾凹陷位于准噶尔盆地中央坳陷西部,是盆地内重要的富烃凹陷(路玉等, 2018; 杜金虎等, 2019; 付瑜等, 2020; 余海涛等, 2020; 关新等, 2021; 于景维等, 2021a, 2021b),第四次油气资源评价认为凹陷西部石油总地质资源量近 2×10^8 t(梁宇生等, 2018),油气勘探潜力相对较大。随着现代油气勘探重点区域已由凸起转型为凹陷周围斜坡区(于景维等, 2022),沙湾凹陷斜坡区发育走向近北西-南东向鼻状构造带,整体可划分为两大凹槽区(图1),具有较为有利的成藏条件,成为油气勘探的重点区域。

斜坡区整体为西高东低,面积大约为 3000 km^2 ,受古构造运动影响,区内发育多个正断层控制的箕状断陷,断面上陡下缓,平面上有较远的延伸,纵向上断深较大,最大断深可达石炭系,同时断裂沟通多套油源,为油气大范围运移提供有利帮助。区内发育地层较为齐全,自下而上发育的地层依次为石炭系;二叠系风城组、佳木河组、上乌尔禾组;三叠系百口泉组、

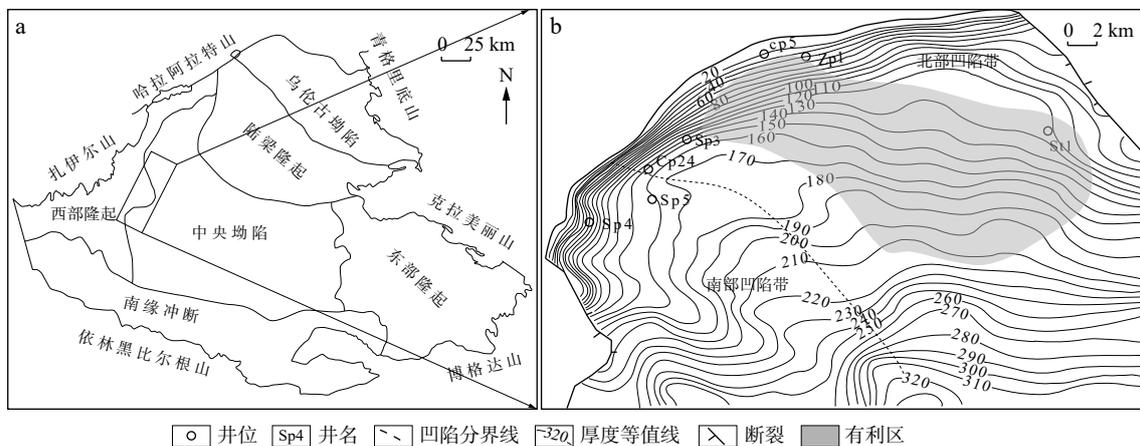


图1 研究区位置图(a)及风城组厚度图(b)

Fig. 1 (a) Location of study area and (b) thickness chart of Fengcheng Formation

克下组、克上组、白碱滩组;侏罗系八道湾组、三工河组、头屯河组、齐古组;白垩系吐谷鲁群。风城组沉积时期火山活动减弱,构造活动相对稳定,地层起伏变化较小、且厚度相对均一。受二叠纪至三叠纪构造抬升运动影响,风城组遭受一定程度剥蚀,特别在中拐凸起的主部位上,风城组剥蚀殆尽,整体呈现西薄东厚的特征。研究区共6口井钻遇风城组,其中1口未钻穿,4口井处于南部凹槽。风城组平均埋深在4200 m以下,平均厚度约为300 m,自下而上可分为风一段、风二段和风三段。储层岩性主要为大套砂砾岩,普遍存在异常高压。目前,研究认为区内风城组发育扇三角洲沉积,6口钻井的风城组均以扇三角洲平原亚相为主。

2 储层特征

2.1 储层岩石学特征

研究区风城组储层为扇三角洲平原分流河道沉积,岩石类型多样。按照砂质体积分数可划分为砂岩类(指岩石中砂质体积分数至少为50%,包括细砂岩、细中砂岩、砾质中粗砂岩)和砾岩类岩石(指砂质体积分数小于50%,包括砾岩、砂砾岩、含砂砾岩及砂质砾岩),以砾岩类岩石为主。砂岩类岩石主要为红色

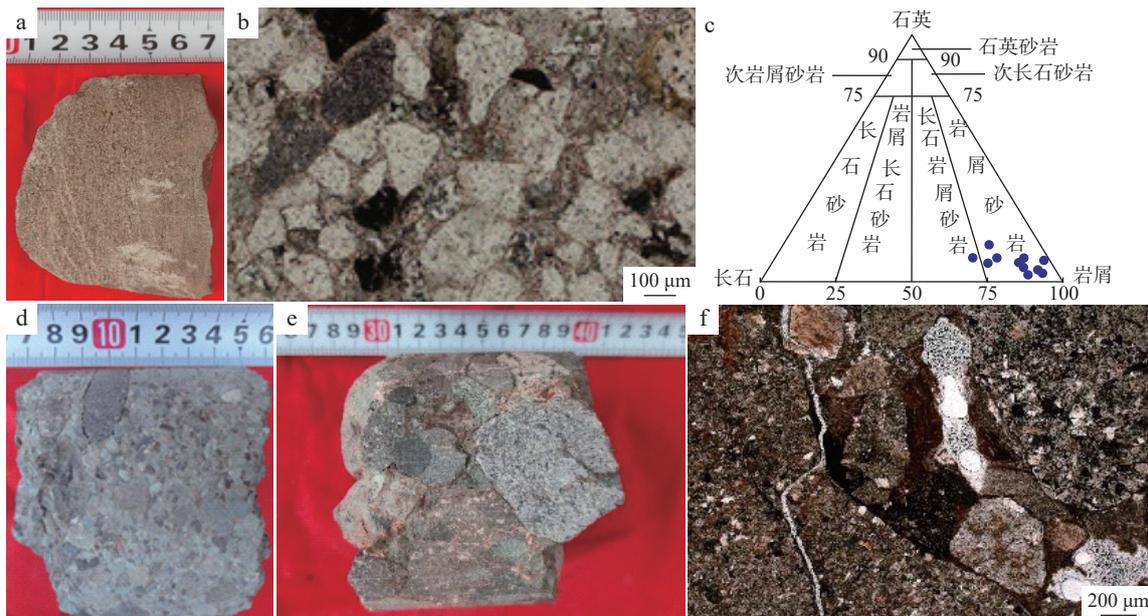
的岩屑砂岩(图2),碎屑成分中石英相对体积分数为3%~15%,平均为8%,以单晶石英为主;长石相对体积分数为3%~25%,平均为12%,以斜长石为主;岩屑相对体积分数为65%~91%,平均为80%,岩屑成分以火成岩为主,少见变质岩及沉积岩。填隙物以胶结物为主,常见浊沸石和伊蒙混层、绿蒙混层。砂岩成分成熟度较低。颗粒分选中等-好,磨圆次棱角-次圆,结构成熟度相对较好。

砾岩类岩石以红色砂砾岩为主(图2),石英相对体积分数为1%~9%,平均为4.8%,以多晶石英为主;长石相对体积分数为3%~9%,平均为5.2%,以斜长石为主;岩屑相对体积分数为85%~94%,平均为90%。砾石成分以凝灰岩为主,其次为安山岩,少见霏细岩和花岗岩。砾岩类岩石中杂基主要为细砂岩,局部为泥岩,体积分数平均为6%,砾石颗粒边缘常见红色浊沸石胶结物。砾石磨圆程度差异较大,棱角状-次圆状都有,分选较差,砾石颗粒最大可达10 cm,结构成熟度较低。

2.2 储层储集特征

2.2.1 储集空间特征

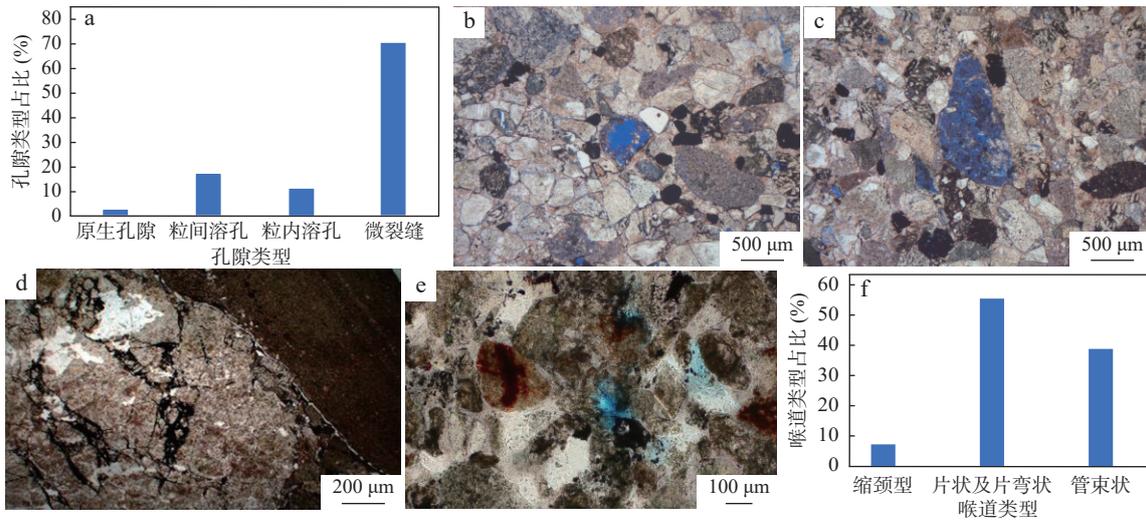
通过50余张铸体薄片观察,发现风城组储层内储集空间类型多样,包括原生粒间孔、粒间和粒内溶孔以及微裂缝,以微裂缝为主(图3)。原生粒间孔主



a. Sp3井, 4718.29 m, 灰褐色细砂岩; b. Sp3井, 4718.27 m, 中砂岩; c. 砂岩分类三角图; d. Cp24, 4609.92 m, 棕红色砂砾岩; e. Sp4井, 4336.27 m, 含砂砾岩; f. Sp5井, 4781.41 m, 含砂砾岩

图2 研究区风城组岩石学特征图

Fig. 2 Petrology characteristics of Fengcheng reservoirs in study area



a. 储层孔隙类型及占比; b. Cp24井, 4604.87 m, 粒间溶孔; c. Cp24井, 4605.14 m, 粒内溶孔; d. Sp5井, 4659.98 m, 微裂缝; e. Sp5井, 4781.07 m, 片状及弯片状喉道; f. 储层喉道类型及占比

图3 研究区风城组储集空间特征图

Fig. 3 Reserve space characters of Fengcheng Formation in study area

要存在于砂岩类储层中,虽然岩石颗粒分选及磨圆相对砾岩类较好,有利于原生孔隙的保存,由于岩石成分成熟度极低,在较大埋深条件下原生粒间孔所占储集空间的比例最低,占有孔隙类型的3%。粒间溶孔和粒内溶孔在薄片上较为常见(图3),占有孔隙类型的16%。粒间溶孔主要为长石、岩屑以及粒间胶结物(沸石类矿物以及方解石)的溶解,其形态差异较大,长石溶蚀表现为沿解理进行大面积溶蚀,溶蚀形态相对规则;岩屑溶蚀表现为沿着颗粒边缘进行溶蚀,呈现港湾状形态;胶结物的溶蚀形态往往呈条带状。粒内溶孔主要表现为长石和岩屑的溶蚀,占有孔隙类型的11%。长石颗粒内溶蚀沿解理溶蚀,岩屑溶蚀表现为粒内易溶组分溶蚀。

风城组储层微裂缝最为发育,占有孔隙类型的70%,储层主要为裂缝型储层。根据前人对于微裂缝类型的划分(闫伟鹏等,2002;汪虎等,2019;吕文雅等,2020),研究区风城组储层微裂缝包括构造缝、贴粒缝和溶蚀缝(图3),以构造缝和贴粒缝最为常见。研究区断裂构造普遍发育,构造应力释放会造成岩心上存在较多高角度裂缝,在镜下表现为颗粒的破碎或者颗粒被切穿,多数微裂缝未完全充填,少数裂缝间充填石英。该类型裂缝延伸较远,缝宽差异较大,最大可达1000 μm。研究区目的储层内贴粒缝常为沿砾石颗粒界面形成的裂缝,少见石英颗粒边界的裂缝。产生贴粒缝的砾石成分以凝灰岩为主,硬度较大,磨圆较好。贴粒缝的形成可能受到异常压力或者岩石颗粒脱水

作用的影响,同构造-成岩缝相似(汪虎等,2019)。该类裂缝有较明显的弧度,缝宽最大约为80 μm,在贴粒缝边缘存在一定的溶蚀作用,会造成裂缝延伸至颗粒内部,但延伸距离较短。研究区成岩缝所占比例较低,主要存在于长石、岩屑以及易溶胶结物内部,该类裂缝无固定方向,可沿矿物解理或者易溶组分方向延伸,延伸距离最短,缝宽约为2~10 μm。

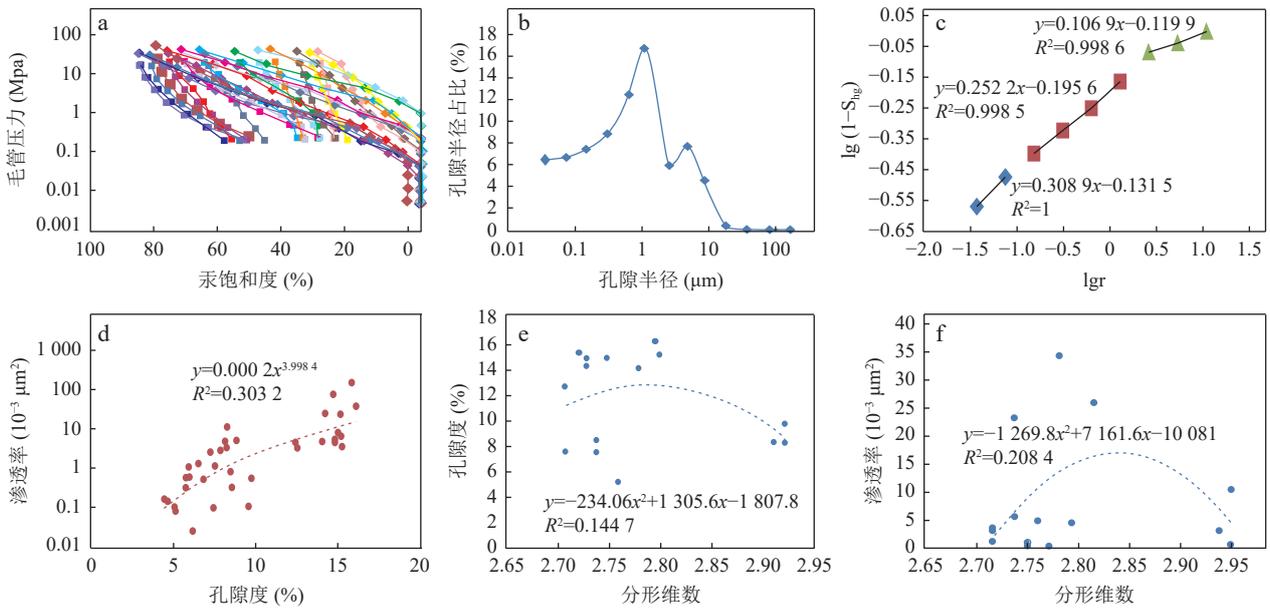
在风城组储层中,不同孔隙类型常以组合形式出现,通过扫描电镜及铸体薄片的进一步观察,粒间溶孔+粒内溶孔+微裂缝组合最为常见。由于微裂缝能为岩石中流体交换提供通道,有利于颗粒间易溶物质的溶蚀,偶见原生粒间孔+粒内溶孔组合(图3)。

喉道为连接孔隙之间的通道,对于储层渗透性起到重要的控制作用(张龙海等,2006;刘文锋等,2021)。研究区风城组喉道类型包括点状喉道、片弯状喉道以及管束状喉道,以片弯状以及管束状喉道为主。微裂缝也可作为片弯状喉道连接孔隙(图3),对于增强岩石渗流性能较为有利。

2.2.2 孔隙结构特征

孔隙结构研究内容主要为孔喉的分布、连通以及配置情况,它控制孔隙的物性特征。前人对于孔隙结构的分析常见的是利用高压压汞资料,针对压汞曲线的形态以及压汞参数对孔隙结构进行定性-半定量研究(胡作维等,2014;于景维等,2018;刘文锋等,2021)。

通过风城组储层压汞曲线形态观察(图4a),发现



a. 储层压汞曲线特征; b. Cp24 井, 4 604.87 m, 储层孔喉半径分布曲线; c. Cp24 井, 4 604.87 m, 储层孔喉分形特征曲线;
d. 储层孔隙度和渗透率关系图; e. 分形维数同孔隙度的关系; f. 分形维数同渗透率的关系

图 4 研究区风城组储层孔喉分形维数特征及其同物性参数的关系图

Fig. 4 Characteristics of fractal dimension and its relations with parameters of physical property in reservoirs

压汞曲线中进汞饱和度最高可达 79% 左右, 平缓段较短, 位置靠上, 细歪度, 孔喉分选较差, 整体反映孔隙结构较为复杂。

对研究区 5 口井内样品进行压汞实验所获基础参数进行分析, 发现风城组储层分选系数为 1.38~3.09, 平均为 2.31; 峰态为 1.17~5.71, 平均为 2.65; 变异系数为 0.11~0.29, 平均为 0.20; 中值压力为 1.51~18.06 Mpa, 平均为 6.37 Mpa; 最大孔喉半径为 0.59~10.32 μm, 平均为 5.18 μm; 排驱压力为 0.07~1.24 Mpa, 平均为 0.37 Mpa; 平均毛管半径为 0.14~2.69 μm, 平均为 1.24 μm; 孔喉比为 0.75~5.28, 平均为 2.13。整体反映储层排驱压力不高, 孔隙和喉道分布不集中, 孔隙结构非均质性较强。

选取部分参数以表征孔隙结构, 虽然也是对孔隙结构进行量化分析, 但是参数较多, 存在盲点, 不易普遍应用(于景维等, 2018; 刘文锋等, 2021)。由于致密储层内孔隙结构存在分形特征, 可用分形理论对于储层孔隙结构的非均质性进行更为精细表征(彭军等, 2018), 其过程主要利用压汞参数计算相应的分形维数, 通过分形维数判断储层孔隙结构的非均质性。多孔岩石的分形维数多为 2~3, 分形维数越小, 表明储层孔喉分布越均匀, 均质性越强(胡作维等, 2014; 彭军等, 2018; 于景维等, 2018; 刘文锋等, 2021)。研究

区风城组储层分形维数的计算基于 Brook-Corey 模型, 通过 16 块样品分形曲线特征的绘制(图 4b、图 4c), 发现研究区储层孔隙结构分形系数范围为 2.71~2.92, 表明储层孔隙结构非均质性很强。由于分形维数接近 3, 表明储层孔隙结构整体较差。

2.2.3 储层物性特征

储层物性是储层储集性能的直接体现, 通过 6 口取心井 50 块样品的常规物性测试分析, 发现研究区风城组孔隙度分布为 1.1%~16.2%, 平均孔隙度为 6.78%。通过进一步细分孔隙度区间, 发现 65% 的样品孔隙度小于 10%; 储层渗透率为 $0.011 \times 10^{-3} \sim 145 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $4.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。通过进一步细分渗透率区间, 发现 75.7% 的样品渗透率小于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 18.9% 的样品渗透率为 $5 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 5.4% 的样品渗透率为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上。基于前述岩性分类, 发现砂岩类储层孔隙度要好于砾岩类储层孔隙度。参照《油气储层评价方法》(Y/T 6285-2011) 行业标准(国家能源局, 2011), 风城组储层主要属于特低孔特低渗储层。

通过对研究区风城组孔隙度和渗透率进行交会分析, 发现二者呈现一定的正相关, 相关程度较好, 结合上述储层孔隙类型的分析, 发现裂缝对于储层物性具有重要的影响。为明确裂缝对于孔隙度和渗透率

的影响,将裂缝发育程度不同样品的分形维数同储层物性进行交会(图4d),发现分形维数同储层孔隙度呈反比,反映随着样品内裂缝逐渐发育,孔隙结构越复杂,分形维数逐渐增大,储层孔隙度越差。分形同渗透率关系比较复杂,小于2.83的分形维同渗透率呈反比,反映随着样品内裂缝逐渐发育,孔隙结构越复杂,分形维数逐渐增大,储层渗透率越好;大于2.83的分形维同渗透率呈正比,反应孔隙结构越复杂,分形维数逐渐增大,储层渗透率越差。整体表现出裂缝对于储层渗透率的改善较为明显,对于孔隙度的增加影响相对较小(图4e、图4f)。

3 储层物性控制因素分析

3.1 构造作用

构造作用对于储层物性变化起到重要控制作用,

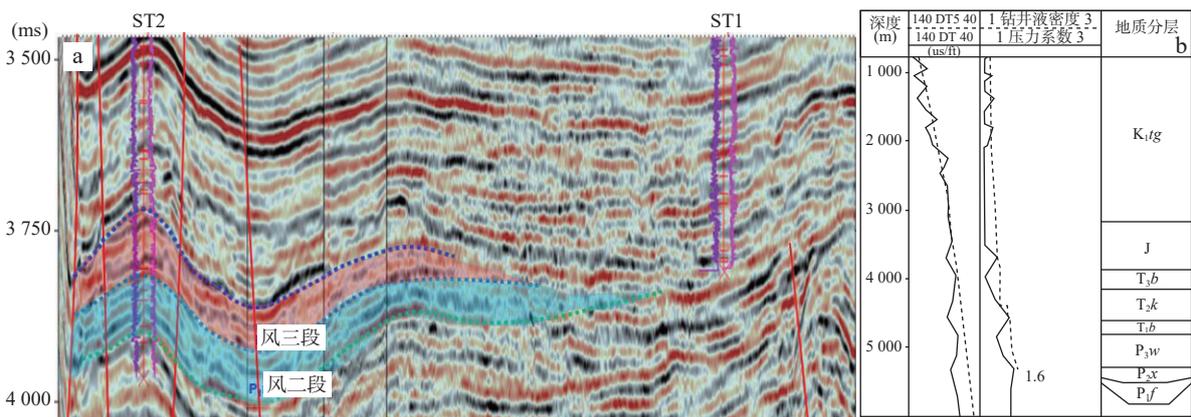


图5 研究区ST1~ST2构造剖面(a)及异常压力分布图(b)

Fig. 5 (a) Structural profile between ST1~ST2 and (b) abnormal pressure in Fengcheng Formation

在前人研究基础上(况军等,2006;隋风贵,2015),利用残余厚度法对风城组古地貌进行恢复,发现受构造运动影响,风城组时期研究区主要发育南北两大凹槽(图1)。南部凹槽坡度较陡,而北部凹槽坡度较缓,导致南部凹槽内风城组以大套砂砾岩为主(图6),粒度曲线所反映的水动力条件倾向于重力流特征,砂质含量占比较低,GR值相对较高,DEN值相对较大,储层内泥质含量较大,原始物性相对较差;北部凹陷内风城组砂岩呈互层状发育(图6),砂质含量占比较高,粒度曲线所反映的水动力条件明显倾向于牵引流特征,GR值相对较低,DEN值相对较小,储层内泥质含量较小,原始物性相对较好。从现场岩心物性分析及试油结果来看,北部凹槽内风城组储层物性较好,

主要表现在断裂发育、古地貌以及异常高压对于储层物性不同程度的影响。

通过上述已知研究区风城组主要为裂缝型储层,微裂缝的发育对储层物性影响最为关键,而微裂缝的形成同构造断裂的发育演化十分密切。达尔布特洋在晚石炭世逐渐闭合,沙湾凹陷在该时期发育多个正断层,断距较大。受华力西运动以及印支运动影响,早期断裂逐渐被激活,研究区形成多个褶皱转折端以及断裂带(图5a)。尤其在南部凹陷带中,有较大规模断裂集中发育,导致风城组储层产生大量微裂缝。由于大部分断层断穿多套生烃层系,烃源岩生烃过程中会伴生酸性流体,会沿着微裂缝对长石、沸石以及方解石等易溶矿物进行溶蚀,极大改善储集层物性。同时由于构造抬升,风城组暴露地表遭受一定程度的风化剥蚀,大气水通过裂缝进入储层内进一步加剧溶蚀作用,有利储层物性的提高。

油气高产井多分布于该区。

通过DST实测资料,发现研究区风城组存在异常高压(图5b),实测压力系数为1.2~1.7。异常高压的形成主要受印支运动影响,研究区二叠系—三叠系处于强烈挤压的构造背景,导致区内所形成的褶皱以及断裂带周围流体压力分配不均匀。异常高压能在一定程度上增加储层的抗压实能力,阻碍流体的运移,减缓胶结物的胶结,对于储层孔隙有较好的保护作用(杜栩等,1995;于景维等,2015)。前人将研究区压力系数同孔隙度增加量进行相交性分析,发现孔隙被保护较为明显时压力系数大于1.4(于景维等,2018),因此压力系数大于1.4的区域储层物性会较好。图5b显示,风城组压力系数高达1.6,为储层物性提供

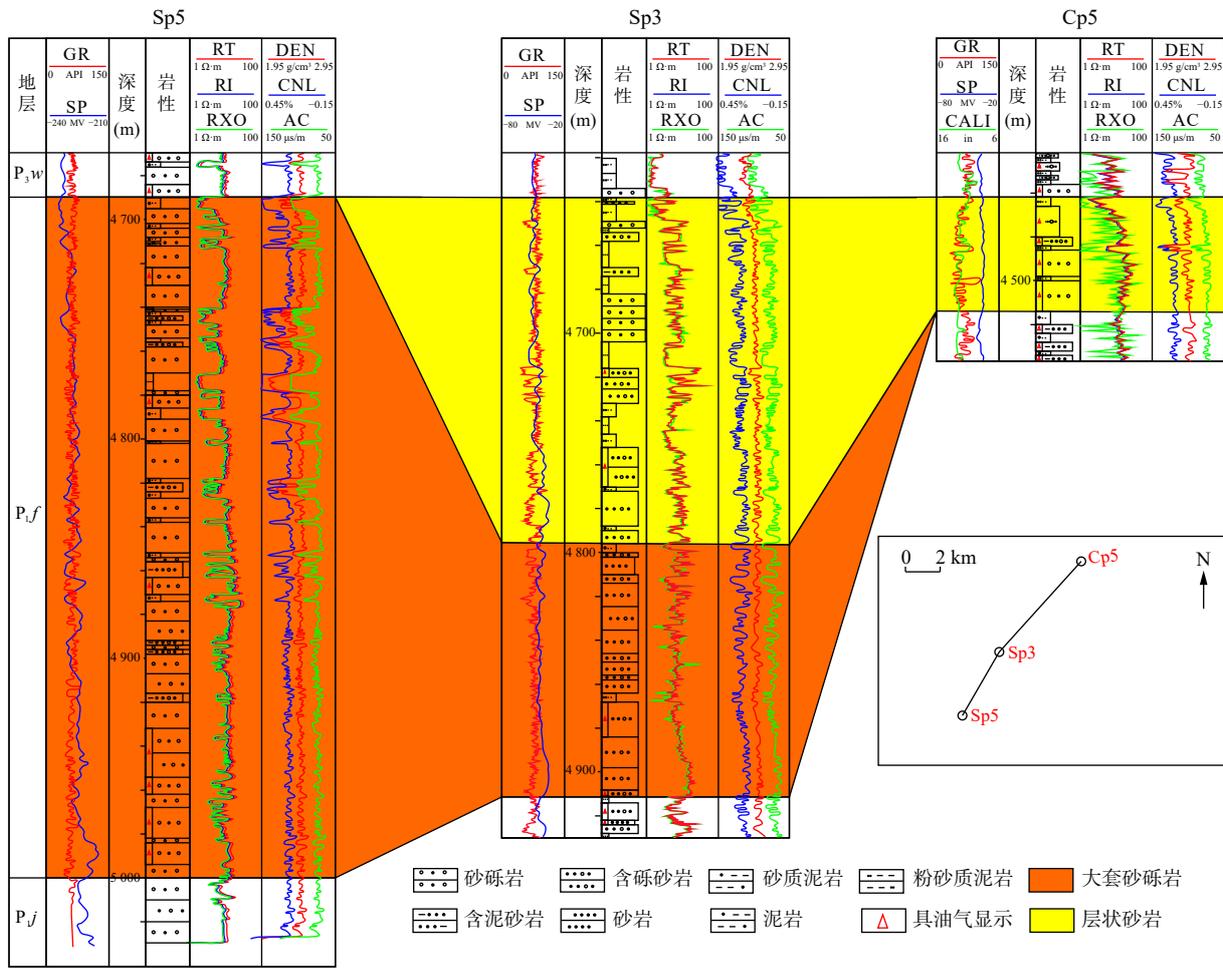


图 6 研究区 Sp5~Cp5 风城组连井剖面图

Fig. 6 Profile between well Sp5~Cp5 of Fengcheng Formation in the study area

较好的保护。同时,在砂体冲刷界面以及断裂活动区域,流体流动性较好,较高压力易于释放,有利于微裂缝的发育。

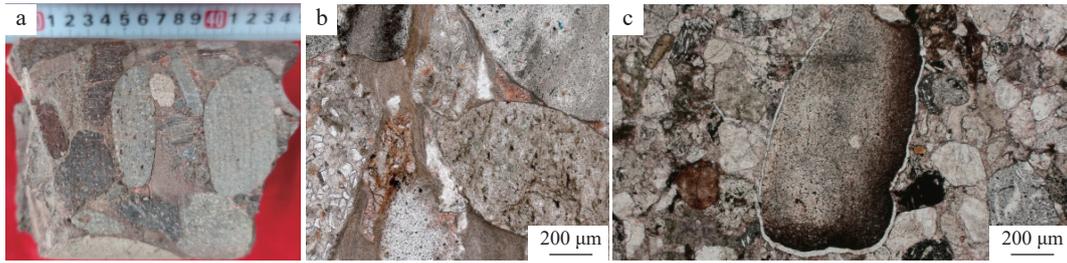
3.2 沉积作用

通过岩心及薄片观察,研究区风城组发育短水系扇三角洲沉积。由于距离物源较近,风城组储集岩成分成熟度较低,以凝灰岩为主的岩屑相对含量超过 80%,虽然降低储集岩石的抗压实能力,但也为后期溶蚀作用的发育提供物质基础(于景维等, 2014)。

从水动力条件角度,发现研究区风城组主要发育扇三角洲平原沉积,分流河道沉积包括扇面内的河道以及靠近物源的辫状河流(图 6),扇面内的河道以牵引流为主,储集砂体受河道迁移而复合叠置,单期次河道厚度约为 5 m,分布面积广,填隙物含量较低,储层的储集性能较好,孔隙度平均为 8.93%,渗透率平均为 $41.53 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;靠近物源的辫状河流受地貌影响,在局部也表现为重力流沉积,单期次河道厚度多超过

10 m,填隙物的含量相对较高,储层的储集性能较差,孔隙度平均为 5.36%,渗透率平均为 $2.998 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

从岩石粒度来看,砂岩类储层岩屑含量相对砾岩类储层含量较低,分选较好,抗压实能力较强,原始孔隙度保存较好,后期微裂缝的发育和原本较好的渗流性能为溶蚀流体提供通道,造成储层物性得到明显的改善;砾岩类储层分选较差,原始孔隙度保存较差,由于微裂缝的发育导致储层受到溶蚀作用影响较大,孔隙度改善不明显,但渗透率明显增加。同时受南北凹槽不同坡度差异影响,南部凹槽内风城组岩石颗粒磨圆主要为棱角-次棱角状,北部凹槽内岩石颗粒磨圆为次棱角状-次圆状,通过岩石薄片观察,发现微裂缝往往发育在颗粒磨圆较好的边缘。由于岩石成分和结构成熟度较低,储层在深埋藏条件下受到压实作用较强,颗粒之间以线接触为主,磨圆较差的颗粒在该背景下咬合力要好于磨圆较好的颗粒(图 7),在同等应力释放条件下,磨圆较好颗粒边缘容易松动(潘远



a. Sp4, 4336.27 m, 含砂砾岩, 岩心中可观察到较好磨圆的砾石边缘易形成微裂缝; b. Sp4, 4361.99 m, 含砂砾岩, 薄片反映颗粒磨圆较差, 微裂缝发育不明显; c. Cp24, 4604.89 m, 砂砾岩, 薄片反映磨圆较好的砾石边缘易形成微裂缝

图7 研究区风城组岩石学特征图

Fig. 7 Lithological characters in Fengcheng Formation of study area

阳, 2020), 形成微裂缝(图7)。

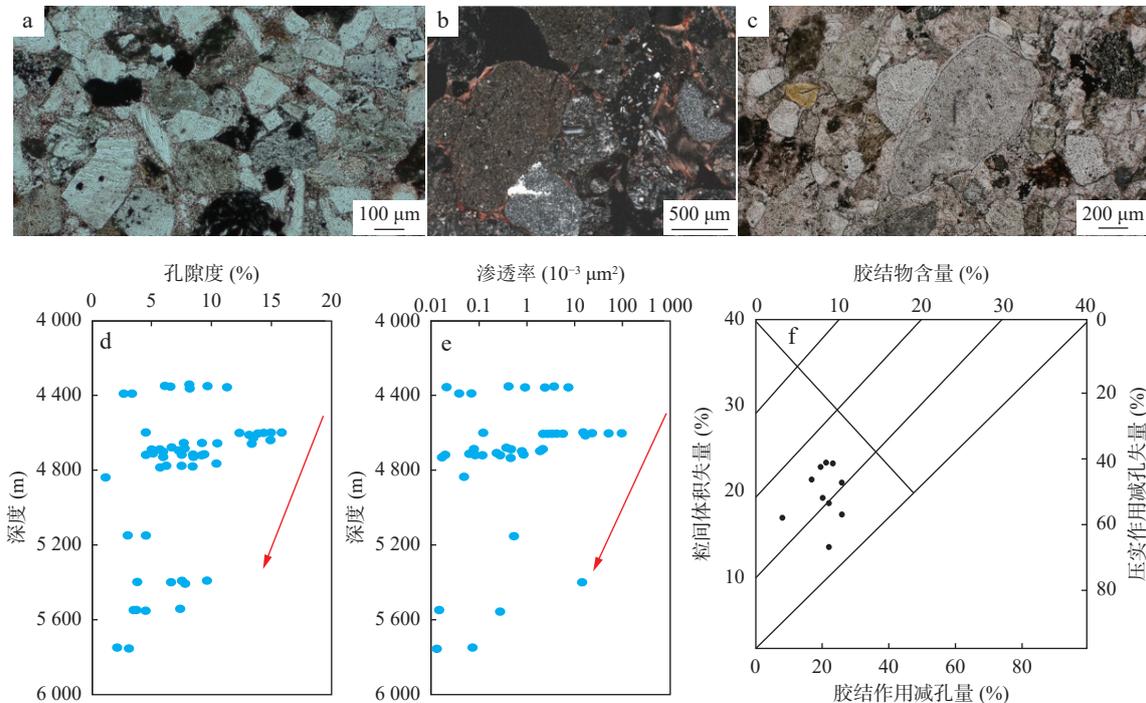
3.3 成岩作用

成岩作用决定深埋藏条件下储层孔隙结构的演化(罗静兰等, 2006; 郑荣才等, 2007; 丁晓琪等, 2011; 于景维等, 2021b), 对储层最终的物性有着直接的控制作用。研究区对储层物性具有主要影响的成岩作用包括压实、胶结和溶蚀作用。

目前研究区风城组普遍埋深在4200 m以下, 岩石中塑性颗粒占比较大, 因此储层受到强烈的压实作用。通过大量岩石及铸体薄片的观察, 发现颗粒之间

接触关系普遍为线接触(图8a、图8c), 部分为凹凸接触, 偶见缝合接触, 面孔率几乎为0。岩屑颗粒常见被压变形(图8b), 长石颗粒会沿着薄弱区域(解理、双晶面等)进行分裂, 石英颗粒被压碎。将储层孔隙度和渗透率同深度进行相关性分析, 发现随着埋深的增加, 储层物性明显降低(图8d、图8e)。利用Houseknecht(1987)针对压实过程和胶结过程中孔隙度减少所做图版(图8f), 发现压实作用对于孔隙度的破坏程度基本大于40%, 最高可达70%。

通过图版可发现研究区储层胶结作用对于孔隙



a. Sp3, 4718.27 m, 颗粒多为线接触; b. Sp4, 4361.99 m, 岩屑受压变形; c. Cp24, 4604.89 m, 砂砾岩, 薄片反映磨圆较好的砾石边缘易形成微裂缝; d. 孔隙度同深度关系; e. 渗透率同深度关系; f. 评估压实和胶结过程造成孔隙度降低程度

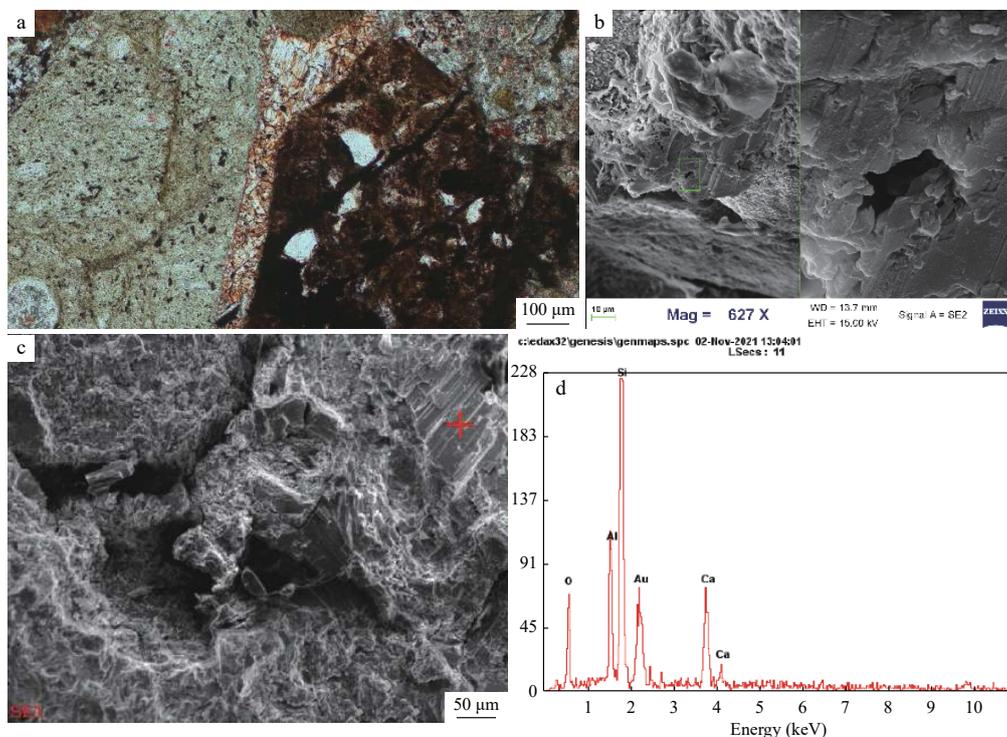
图8 研究区风城组成岩作用特征

Fig. 8 Diagenetic characters in Fengcheng Formation of the study area

度的破坏平均在 20% 以上,对储层物性影响较大。储集岩石颗粒间胶结物常见浊沸石(图 9a),其在岩心中常常附在砾石边缘,在微裂缝间尤为发育。在单偏光镜下浊沸石具有 2 组完全解理和不平整断口,扫描电镜照片呈现短柱状,常见其与叶片状-绒球状绿泥石、片状绿-蒙混层矿物及石英共生(图 9b),少见同伊-蒙混层矿物共生,一般通过探针更容易识别(图 9c、图 9d)。浊沸石往往形成于中-碱性水化学环境中,同火山物质蚀变、黏土矿物转化以及钙长石的钠长石化有关形成(Hall, 1998)。通过扫描电镜特征,认为沸石形成于弱碱性的还原环境,其形成同火山物质溶蚀后形成的蒙脱石,然后蒙脱石发生绿泥石化有关,反映浊沸石的形成与砂砾岩中富含火山碎屑(特别是凝灰岩)有关。在封闭成岩环境中,溶蚀矿物会局部重组形成等效体积的胶结物,溶蚀作用对于孔隙度增加并无实际意义,只有在开放成岩体系中,溶蚀组分能够通过一定规模的流体流动被搬运出该系统,溶蚀作用对于储层物性的改善才有意义(Hall, 1998; 杨海军等, 2012)。研究区风城组储层主要属于裂缝型储层,颗粒及胶结物的溶蚀程度受微裂缝发育而增强,相当于

开放成岩体系,溶蚀作用对储层物性改善有实质性意义。由于储集岩石内火山岩岩屑发育,为溶蚀提供大量物质基础,常见岩屑颗粒局部溶解,偶见铸模孔,胶结物主要是浊沸石的溶蚀(图 9b、图 9c)。前人将溶蚀流体的来源大致分为两类(杨海军等, 2012; 李国蓉等, 2014; 吴和源等, 2017),一类是表生成岩作用阶段,大气淡水的回流对于长石和岩屑颗粒的溶蚀;另一类是中成岩阶段超压快速损失带或烃类形成有关的富 CO_2 流体对于颗粒以及胶结物的溶蚀。根据储层内储集空间类型、颗粒溶蚀形态、胶结物溶蚀机理以及裂缝发育程度,认为研究区风城组储层最终物性改善受大气淡水回流影响较小,溶蚀流体主要为烃类形成有关的富 CO_2 流体,该流体多期次通过微裂缝对储层颗粒以及胶结物进行溶蚀,结合压实和胶结作用对于储层孔隙度的定量影响,认为溶蚀作用使孔隙度平均增加 10.6%,是储层物性改善的关键因素。

整体来看,储层物性受控于构造、沉积和成岩的综合影响,北部凹槽内断裂带附近的风城组砂岩类储层为下一步勘探的重点目标,其次为砾岩类储层(图 1)。



a. Sp3, 4 693.3 m, 砾石间充填浊沸石; b. Cp24, 4 605.14 m, 见不规则片状绿泥石, 粒间充填沸石类矿物, 见溶蚀孔, 4 608.02 m; c、d. Cp24, 浊沸石能谱图

图 9 研究区风城组沸石胶结物特征图

Fig. 9 Zeolite characters in Fengcheng Formation of the study area

4 结论

(1)研究区风城组储层岩石以砂砾岩为主,成分成熟度和结构成熟度较低。储集空间以微裂缝为主,其次为粒间和粒内溶孔,储层为裂缝型储层,微裂缝类型主要为构造缝。喉道以片弯状以及管束状喉道为主。压汞资料和分形维数综合反映储层孔隙结构非均质性较强,整体较差;储层孔隙度平均为6.78%,渗透率平均为 $4.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于特低孔特低渗储层。微裂缝对于渗透率的正向影响最大,对于孔隙度的增加影响相对较小。

(2)研究区风城组储层最终物性受控于构造、沉积和成岩的综合影响,构造和沉积作用的耦合效应控制储层的原始物性。古构造运动造成研究区大量断裂的发育以及异常高压的形成,为储层内微裂缝的形成奠定基础,扇面内的河道砂体储集物性要好于靠近物源的辫状河流砂体储集物性,岩石内可溶组分含量高也为后期溶蚀提供物质基础。区内形成南北2个凹槽,受凹槽内坡度影响,水动力条件、沉积物颗粒大小以及磨圆的差别导致南部凹槽内储层物性要差于北部凹槽。成岩作用为储层物性演化的直接因素,压实和胶结作用导致储层物性变差,受控于微裂缝发育程度的溶蚀作用对储层物性有明显的改善。北部凹槽内断裂带附近的风城组砂岩类储层为下一步勘探的重点目标。

致谢:感谢审稿专家提出的宝贵意见,在此感谢!

参考文献(References):

- 阿布力米提,曹剑,陈静,等.准噶尔盆地玛湖凹陷高成熟油气成因与分布[J].新疆石油地质,2015,36(04):379-384.
- Abulimiti, CAO Jian, CHEN Jing, et al. Origin and Occurrence of Highly Matured Oil and Gas in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(04): 379-384.
- 曹剑,雷德文,李玉文,等.古老碱湖优质烃源岩:准噶尔盆地二叠统风城组[J].石油学报,2015,36(07):781-790.
- CAO Jian, LEI Dewen, LI Yuwen, et al. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(07): 781-790.
- 陈磊,丁靖,潘伟卿,等.准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡二叠系风城组云质岩优质储层特征及控制因素[J].中国石油勘探,2012,17(03):8-11+7.
- CHEN Lei, DING Jing, PAN Weiqing, et al. Characteristics and Controlling Factors of High-quality Dolomite Reservoir in Permian Fengcheng Formation in West Slope of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2012, 17(03): 8-11+7.
- 丁晓琪,张峭楠,葛鹏莉,等.鄂尔多斯盆地东南部延长组储层成岩体系研究[J].沉积学报,2011,29(01):97-104.
- DING Xiaoqi, ZHANG Shaonan, GE Pengli, et al. Research on Diagenesis System of Yanchang Formation Reservoirs, Southeast Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(01): 97-104.
- 杜金虎,支东明,唐勇,等.准噶尔盆地上二叠统风险领域分析与沙湾凹陷战略发现[J].中国石油勘探,2019,24(01):24-35.
- DU Jinhu, ZHI Dongming, TANG Yong, et al. Prospects in Upper Permian and strategic discovery in Shawan sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(01): 24-35.
- 杜棚,郑洪印,焦秀琼.异常压力与油气分布[J].地学前缘,1995,2(04):137-148.
- DU Xu, ZHENG Hongyin, JIAO Xiuqiong. Abnormal Pressure and hydrocarbon accumulation[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(04): 137-148.
- 付瑜,柳益群,蒋宜勤,等.准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷三叠系百口泉组砂砾岩储层孔隙结构及渗流特征[J].西北地质,2020,53(2):223-234.
- FU Yu, LIU Yiqun, JIANG Yiqin, et al. Pore structures and Seepage Characteristics of Sand-conglomerate Reservoirs of Baikouquan Formation in Triassic Mahu Sag, Northwestern Margin of Junggar Basin[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(2): 223-234.
- 关新,潘树新,曲永强,等.准噶尔盆地沙湾凹陷滩坝砂的发现及油气勘探潜力[J].岩性油气藏,2021,33(01):90-98.
- GUAN Xin, PAN Shuxin, QU Yongqiang, et al. Discovery and hydrocarbon exploration potential of beach-bar sand in Shawan Sag, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(01): 90-98.
- 何文军,钱永新,赵毅,等.玛湖凹陷风城组全油气系统勘探启示[J].新疆石油地质,2021,42(06):641-655.
- HE Wenjun, QIAN Yongxin, ZHAO Yi, et al. Exploration Implications of Total Petroleum System in Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(06): 641-655.
- 何文军,吴和源,杨森,等.准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油储层岩相划分与类型评价[J].西北地质,2023,56(1):217-231.

- HE Wenjun, WU Heyuan, YANG Sen, et al. Lithofacies Division and Type Evaluation of Shale Oil Reservoir in Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 217–231.
- 何衍鑫, 鲜本忠, 牛花朋, 等. 古地理环境对火山喷发样式的影响: 以准噶尔盆地玛湖凹陷东部下二叠统风城组为例[J]. *古地理学报*, 2018, 20(02): 245–262.
- HE Yanxin, XIAN Benzong, NIU Huapeng, et al. Effects of palaeogeographic environment on volcano eruption style: Example from the Lower Permian Fengcheng Formation in eastern Mahu sag, Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2018, 20(02): 245–262.
- 胡作维, 李云, 王海红, 等. 鄂尔多斯盆地镇原地区长8油层组超低渗储层孔隙结构特征[J]. *岩性油气藏*, 2014, 26(02): 15–20.
- HU Zuowei, LI Yun, WANG Haihong, et al. Pore structure characteristics of ultra-low permeability reservoirs of Chang 8 oil reservoir set in Zhenyuan area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, 26(02): 15–20.
- 江懋才. 玛南斜坡区二叠系风城组优质储层预测研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- JIANG Maocai. Reservoir Prediction of Permian Fengcheng Formation of South Slope of Mahu Depression[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
- 况军, 齐雪峰. 准噶尔前陆盆地构造特征与油气勘探方向[J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(01): 5–9.
- KUANG Jun, QI Xuefeng. The Structural Characteristics and Oil-Gas Explorative Direction in Junggar Foreland Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(01): 5–9.
- 李国蓉, 武恒志, 叶斌, 等. 元坝地区长兴组储层溶蚀作用期次与机制研究[J]. *岩石学报*, 2014, 30(03): 709–717.
- LI Guorong, WU Hengzhi, YE Bin, et al. Stages and mechanism of dissolution in Changhsing reservoir, Yuanba area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(03): 709–717.
- 李威, 张元元, 倪敏婕, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷下二叠统古老碱湖成因探究: 来自全球碱湖沉积的启示[J]. *地质学报*, 2020, 94(06): 1839–1852.
- LI Wei, ZHANG Yuanyuan, NI Minjie, et al. Genesis of alkaline lacustrine deposits in the Lower Permian Fengcheng Formation of the Mahu Sag, northwestern Junggar Basin: insights from a comparison with the worldwide alkaline lacustrine deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(06): 1839–1852.
- 梁宇生, 何登发, 甄宇, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷构造-地层层序与盆地演化[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(05): 943–954.
- LIANG Yusheng, HE Dengfa, ZHEN Yu, et al. Tectonic stratigraphic sequence and basin evolution of Shawan sag in Junggar Basin[J]. *Petroleum and Natural Gas Geology*, 2018, 39(05): 943–954.
- 刘文锋, 张小栓, 刘谨铭, 等. AH5井区八道湾组砂质和砾质储层孔隙结构特征及评价[J]. *现代地质*, 2021, 35(06): 1844–1853.
- LIU Wenfeng, ZHANG Xiaoshuan, LIU Jinming, et al. Evaluation and Characteristics of Pore Structures in Sand and Conglomerate Reservoirs of Badaowan Formation in the AH5 Well Block[J]. *Geoscience*, 2021, 35(06): 1844–1853.
- 罗静兰, 刘小洪, 林潼, 等. 成岩作用与油气侵位对鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层物性的影响[J]. *地质学报*, 2006, 80(05): 664–673.
- LUO Jinglan, LIU Xiaohong, LIN Tong, et al. Impact of Diagenesis and Hydrocarbon Emplacement on Sandstone Reservoir Quality of the Yanchang Formation (Upper Triassic) in the Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(05): 664–673.
- 路玉. 玛湖—沙湾地区二叠系年代—地层格架与沉积充填演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- LU Yu. Permian Chronostratigraphic Framework and Sedimentary Filling Evolution in Mahu-shawan and Adjacent Area, Junggar Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- 吕文雅, 曾联波, 周思宾, 等. 鄂尔多斯盆地西南部致密砂岩储层微观裂缝特征及控制因素——以红河油田长8储层为例[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(01): 37–46.
- LV Wenya, ZENG Lianbo, ZHOU Sibin, et al. Microfracture characteristics and its controlling factors in the tight oil sandstones in the southwest Ordos Basin: Case study of the eighth member of the Yanchang Formation in Honghe Oilfield[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(01): 37–46.
- 潘远阳. 颗粒形态对粗粒土剪切破碎力学特性的影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- PAN Yuanyang. Study on the Influence of Particle Morphology on Shear Fracture Mechanical Properties of Coarse Grained Soils[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- 彭军, 韩浩东, 夏青松, 等. 深埋藏致密砂岩储层微观孔隙结构的分形表征及成因机理——以塔里木盆地顺托果勒地区柯坪塔格组为例[J]. *石油学报*, 2018, 39(07): 775–791.
- PENG Jun, HAN Haodong, XIA Qingsong, et al. Fractal characterization and genetic mechanism of micro-pore structure in deeply buried tight sandstone reservoirs: a case study of Kalpintag

- Formation in Shuntuoguole area, Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 39(07): 775–791.
- 秦志军, 陈丽华, 李玉文, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷下二叠统风城组碱湖古沉积背景[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(01): 1–6.
- QIN Zhijun, CHEN Lihua, LI Yuwen, et al. Paleo-Sedimentary Setting of The Lower Permian Fengcheng Alkali Lake in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(01): 1–6.
- 隋风贵. 准噶尔盆地西北缘构造演化及其与油气成藏的关系[J]. *地质学报*, 2015, 89(04): 779–793.
- SUI Fenggui. Tectonic Evolution and Its Relationship with Hydrocarbon Accumulation in the Northwest Margin of Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(04): 779–793.
- 孙乐, 王志章, 于兴河, 等. 高精度 CT 成像技术在致密油储层孔隙结构研究中的应用——以准噶尔盆地玛湖西斜坡风城组为例[J]. *东北石油大学学报*, 2016, 40(06): 26–34+5–6.
- SUN Le, WANG Zhizhang, YU Xinghe, et al. Application of high resolution CT image technology to the research of pore structure of tight oil reservoir: A case study of the Fengcheng formation on the Mahu west slope in Junggar basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2016, 40(06): 26–34+5–6.
- 汪虎, 何治亮, 张永贵, 等. 四川盆地海相页岩储层微裂缝类型及其对储层物性影响[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(01): 41–49.
- WANG Hu, HE Zhiliang, ZHANG Yonggui, et al. Microfracture types of marine shale reservoir of Sichuan Basin and its influence on reservoir property[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(01): 41–49.
- 汪梦诗. 玛湖凹陷风城组岩矿类型及其指示意义[J]. *地质论评*, 2017, 63(S1): 305–306.
- WANG Mengshi. Minerals of the Lower Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin and Their Indicating Significance[J]. *Geological Review*, 2017, 63(S1): 305–306.
- 汪梦诗, 张志杰, 周川闽, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷下二叠统风城组碱湖岩石特征与成因[J]. *古地学报*, 2018, 20(01): 147–162.
- WANG Mengshi, ZHANG Zhijie, ZHOU Chuanmin, et al. Lithological characteristics and origin of alkaline lacustrine of the Lower Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2018, 20(01): 147–162.
- 吴和源, 唐勇, 常秋生. 准噶尔盆地中拐凸起佳木河组沸石类胶结砂砾岩储集层成因机理[J]. *新疆石油地质*, 2017, 38(03): 281–288.
- WU Heyuan, TANG Yong, CHANG Qiusheng. Genesis of Sandy Conglomerate Reservoirs Cemented by Zeolites in Jiamuhe Formation of Zhongguai Swell, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(03): 281–288.
- 闫伟鹏, 朱筱敏, 张琴, 等. 柳沟庄—窟窿山油藏储集层裂缝类型及特征[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(01): 80–83.
- YAN Weipeng, ZHU Xiaomin, ZHANG Qin, et al. The fissure type and characteristics of Liugouzhuang-Kulongshan reservoir in Qingxi depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(01): 80–83.
- 杨海军, 李开开, 潘文庆, 等. 塔中地区奥陶系埋藏热液溶蚀流体活动及其对深部储层的改造作用[J]. *岩石学报*, 2012, 28(03): 783–792.
- YANG Haijun, LI Kaikai, PAN Wenqing, et al. Burial hydrothermal dissolution fluid activity and its transforming effect on the reservoirs in Ordovician in Central Tarim[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(03): 783–792.
- 于景维, 李璐璐, 祁利祺, 等. 阜东斜坡带头屯河组二段储集层控制因素[J]. *新疆石油地质*, 2014, 35(01): 34–38.
- YU Jingwei, LI Lulu, QI Liqi, et al. Reservoir Controlling Factors of Toutunhe No. 2 Member in Fudong Slope Zone in Eastern Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(01): 34–38.
- 于景维, 季汉成, 史燕青, 等. 准噶尔盆地阜东斜坡区三叠系韭菜园子组成岩作用特征及其对储层物性影响[J]. *西北地质*, 2021a, 54(02): 99–110.
- YU Jingwei, JI Hancheng, SHI Yanqing, et al. Diagenesis and Its Effects on the Reservoir Property of the Triassic Jiucayuanzi Formation of Fudong Slope, Junggar Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2021a, 54(02): 99–110.
- 于景维, 任伟, 王武学, 等. 阜东斜坡中侏罗统头屯河组异常高压形成机理[J]. *新疆石油地质*, 2015, 36(05): 521–525.
- YU Jingwei, REN Wei, WANG Wuxue, et al. Formation Mechanism of Toutunhe Abnormal Pressure of Middle Jurassic in Fudong Slope Area, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(05): 521–525.
- 于景维, 孙波, 余海涛, 等. 车拐斜坡区三叠系百口泉组油气成藏条件研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2021b, 43(03): 37–50.
- YU Jingwei, SUN Bo, YU Haitao, et al. Hydrocarbon Accumulation Conditions of Baikouquan Formation of Triassic in Chegou Slope Area[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2021b, 43(03): 37–50.

- 于景维, 叶勇, 柳妮, 等. 准噶尔盆地阜东斜坡区中上侏罗统储集层特征差异及控制因素分析[J]. *地质学报*, 2018, 92(05): 1070–1080.
- YU Jingwei, YE Yong, LIU Ni, et al. Character Differences and Controlling Factors of Reservoirs in the Upper-Middle Jurassic Fudong Slope Area, Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(05): 1070–1080.
- 于景维, 张庆伟, 祁利祺, 等. 白家海地区下侏罗统三工河组高分辨层序地层格架内岩性油气藏研究[J]. *西北地质*, 2022, 55(02): 199–208.
- YU Jingwei, ZHANG Qingwei, QI Liqi, et al. Analysis of Lithostratigraphic Reservoirs Distribution in High-resolution Sequence Stratigraphic at the Lower Jurassic Sangonghe Formation in Baijiahai Area[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(02): 199–208.
- 余海涛, 刘新宇, 吴博闻, 等. 准噶尔盆地西北缘沙湾凹陷上乌尔禾组大型扇三角洲控制因素[J]. *新疆地质*, 2020, 38(01): 71–76.
- YU Haitao, LIU Xinyu, WU Bowen, et al. Large Fan Delta Control Factors of Upper Wuerhe Formation of Shawan Sag in Northwest Margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2020, 38(01): 71–76.
- 余宽宏, 操应长, 邱隆伟, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷早二叠世风城组沉积时期古湖盆卤水演化及碳酸盐矿物形成机理[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(07): 1248–1263.
- YU Kuanhong, CAO Yingchang, QIU Longwei, et al. Brine evolution of ancient lake and mechanism of carbonate minerals during the sedimentation of Early Permian Fengcheng Formation in Mahu Depression, Junggar Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(07): 1248–1263.
- 国家能源局. 中华人民共和国石油天然气行业标准(SY/T 6285-2011)[R]. 国家能源局, 2011.
- 张龙海, 周灿灿, 刘国强, 等. 孔隙结构对低孔低渗储集层电性及测井解释评价的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(06): 671–676.
- ZHANG Longhai, ZHOU Cancan, LIU Guoqiang, et al. Influence of pore structures on electric properties and well logging evaluation in low porosity and permeability reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(06): 671–676.
- 张鸾洋. 准噶尔盆地玛湖凹陷深层烃源岩与油气成藏模式研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- ZHANG Luanfeng. Hydrocarbon Source Rock and Accumulation Model in the Deep-buried Strata of the Mahu Sag in the Junggar Basin, NW China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- 张志杰, 袁选俊, 汪梦诗, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱湖沉积特征与古环境演化[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(06): 972–984.
- ZHANG Zhijie, YUAN Xuanjun, WANG Mengshi, et al. Alkaline-lacustrine deposition and Paleoenvironmental evolution in Permian Fengcheng Formation at the Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(06): 972–984.
- 赵研, 郭佩, 鲁子野, 等. 准噶尔盆地地下二叠统风城组硅硼钠石发育特征及其富集成因探讨[J]. *沉积学报*, 2020, 38(05): 966–979.
- ZHAO Yan, GUO Pei, LU Ziyue, et al. Genesis of Reedmergnerite in the Lower Permian Fengcheng Formation of the Junggar Basin, NE China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(05): 966–979.
- 郑荣才, 耿威, 周刚, 等. 鄂尔多斯盆地白豹地区长6砂岩成岩作用与成岩相研究[J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(02): 1–8.
- Hall A. Zeolitization of volcanoclastic sediments: The role of temperature and pH[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1998, 68(05): 739–745.
- Houseknecht D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones[J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(01): 633–642.