

DOI: 10.12401/j.nwg.2022013

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

何文军¹, 吴和源^{2,3,*}, 杨森¹, 吴伟涛^{2,3}, 李娜¹, 白玉彬^{2,3}, 王然¹,
赵毅¹, 戚艳平¹, 赵辛楣¹

(1. 新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 2. 西安石油大学地球科学与工程学院,
陕西 西安 710065; 3. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油藏是继吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油藏之后的又一重大发现, 风城组沉积期玛湖凹陷具有近陆源供给、火山活动频发、气候干旱炎热的特点, 为独具特色的盐碱化湖泊沉积环境创造了条件, 也是风城组岩性复杂多变的重要原因。火山岩、内源岩、陆源碎屑岩以及多源混积岩纵向频繁叠置, 形成米级到厘米级页岩油储层。结合岩性变化特征, 以构造样式作为突破口, 厘米级尺度岩心观察为基础, 高频沉积构造分析为辅助, 利用亚离子抛光电镜、能谱测试、荧光分析等多种技术手段对准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油储层进行岩性岩相分析, 认为玛湖凹陷风城组页岩油储层可划分为 4 大类 (砂砾岩类、火山岩类、混积岩类与内源岩类)、8 小类储层。4 大类储层储集性能逐渐减弱, 其中混积岩类储层因其构造与成分差异可进一步划分为混积页岩、纹层-似纹层状混积泥岩、树根状-网状混积泥岩、雪花-星点状混积泥岩; 页理发育情况、云质含量以及其产出样式成为混积岩类储层储集物性差异的重要控制因素。

关键词: 页岩油; 储层类型; 风城组; 岩相划分; 玛湖凹陷

中图分类号: P618.12

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)01-0217-15

Lithofacies Division and Type Evaluation of Shale Oil Reservoir in Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin

HE Wenjun¹, WU Heyuan^{2,3,*}, YANG Sen¹, WU Weitao^{2,3}, LI Na¹, BAI Yubin^{2,3}, WANG Ran¹,
ZHAO Yi¹, QI Yanping¹, ZHAO Xinmei¹

(1. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, Xinjiang, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Xian Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;

3. Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

收稿日期: 2022-05-19; 修回日期: 2022-06-27; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“准连续型溶蚀-胶结作用致密机理: 以苏里格地区二叠系砂岩为例”(2020JQ-767), 陕西省教育厅重点科学研究计划项目“封闭-半封闭体系下成岩作用特征与砂岩致密成因机理研究: 以苏里格气区二叠系为例”(20JS128)联合资助。

作者简介: 何文军(1988-), 男, 硕士, 工程师, 从事油气资源评价及油气勘探相关研究。E-mail: fchwj@petrochina.com.cn。

* 通讯作者: 吴和源(1986-), 男, 博士, 讲师, 从事沉积与油气储层地质相关研究。E-mail: why@xsyu.edu.cn。

Abstract: Shale reservoir of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin is another important discovery after Lucaogou Formation in Jimusar Sag. During the sedimentary period of Fengcheng Formation, Mahu sag is characterized by near-terrestrial source supply, frequent volcanic activity and arid and hot climate, which creates conditions for the unique saline and alkaline lake sedimentary environment and is also an important reason for the complex and changeable lithology of Fengcheng Formation. Volcanic rock, internal rock, terrigenous clastic rock and multi-source mixed rock are frequently stacked longitudinally, forming shale oil reservoirs of meter to centimeter size. Based on the characteristics of lithologic changes, the lithology and lithofacies of shale oil reservoirs in Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin were analyzed by means of sub-ion polishing electron microscopy, energy spectrum testing and fluorescence analysis, with the structural style as the breakthrough point, cm-scale core observation as the basis and high-frequency sedimentary structure analysis as the auxiliary. The shale oil reservoirs of Fengcheng Formation in Mahu sag can be divided into 4 types and 8 types. The reservoir properties of glutenite, volcanic rock, mixed rock and internal rock are gradually weakened. Due to the differences in structure and composition, the mixed mudstone reservoir can be divided into mixed shale, laminate-laminate-like mixed mudstone, root-reticular mixed mudstone, snowflake-star-point mixed mudstone. Foliation development, dolomite content and its occurrence pattern are the important controlling factors for the difference of reservoir of reservoir physical properties of mixed rock reservoirs.

Keywords: Shale oil; Reservoir types; Fengcheng Formation; Lithofacies division; Mahu depression

面对严峻的国际形势,发挥中国页岩油资源储量优势,加快页岩油相关产业的发展已然成为国家重要工作方向之一(邹才能等, 2013; 黎茂稳等, 2019),是保障国家能源安全的现实途径,具有重要的战略意义(黎茂稳等, 2020; 王广昫等, 2020; 王倩茹等, 2020)。为支撑页岩油勘探开发建设,各大油企在准噶尔盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地等重点勘探领域(聂海宽等, 2016; 付金华等, 2020; 马文忠等, 2021; 张安达等, 2021; 付金华等, 2021; 何文渊等, 2022),对页岩油富集规律、资源潜力与经济评价、开发试验技术方法、钻井工程与压裂技术等重要方向开展了攻坚克难的研究工作(唐颖等, 2012; 张金川等, 2012; 卢双舫等, 2012; 姜在兴等, 2014; 郭旭光等, 2019; 孙超等, 2019; 方欣欣等, 2020; Deng Y, 2020; 张建国等, 2022; 黄玉越等, 2022),并获得了丰硕成果,同时初步建立了页岩油勘探开发的样板。以准噶尔盆地为代表,2020年吉木萨尔凹陷被国家能源局和自然资源部联合批复并设立为国家级陆相页岩油示范区,在此背景下,新疆油田公司开启了对准噶尔盆地二叠系主力烃源岩层位页岩油藏的集中攻势。

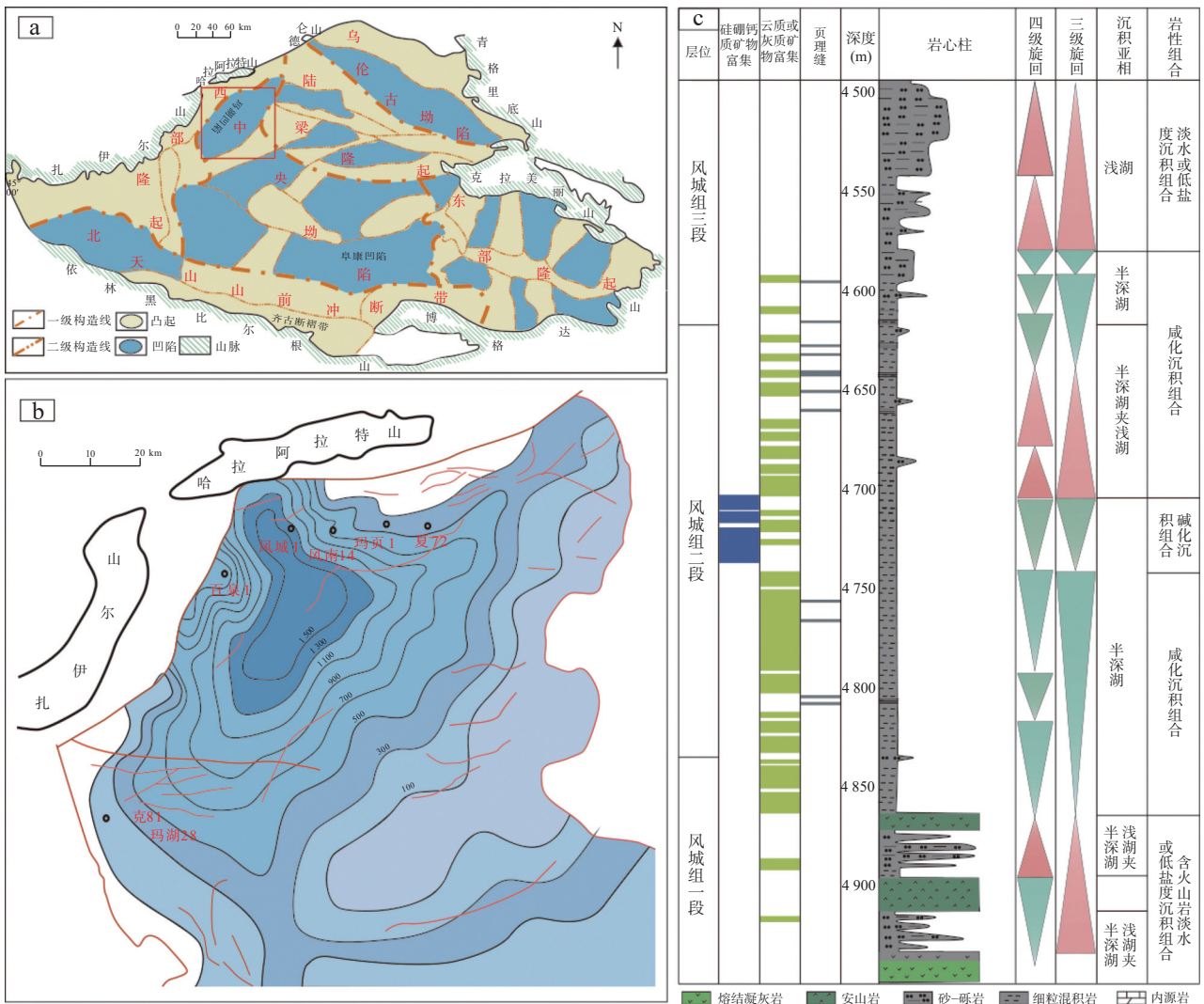
风城组作为准噶尔盆地玛湖凹陷的主力烃源岩层位,具有产烃量大、生烃转化率高的特点,是玛湖凹陷二叠系乌尔禾组至百口泉组源上砾岩大油区的主要贡献者,一直受科研工作者高度关注(何文军等,

2021; Li W et al., 2021; Tang Y et al., 2021; 唐勇等, 2022)。随着勘探开发的不断深入,风城组内砂砾岩、云质岩以及火山岩油藏在早期的致密油风险勘探中不断被发现,然而,随着勘探研究工作的逐步深化,科研工作者逐渐认为早期的致密油储层可能仅仅只是整体页岩油储层中的“甜点”类型之一(曹元婷等, 2020)。在此背景下,风城组岩石学特征、储层类型如何划分等便成为了页岩油相关科研工作亟需解答的重要问题。因此,笔者将在高分辨率岩石学特征分析手段的基础上,结合实验新方法,对风城组页岩油储层进行全面的储层类型及特征总结,为后续页岩油勘探提供指导性线索。

1 地质背景

玛湖凹陷位于准噶尔盆地西北缘,作为盆地沉降中心之一,长期接收陆源碎屑沉积供给,在风城组沉积早期,区域气候干旱炎热,受周边火山活动持续影响。闭塞型湖泊沉积环境以及西陡东缓的不对称箕状前陆凹陷古构造背景(张志杰等, 2018),导致整体地层西厚东薄(图1),沉积厚度差异大,800~1 800 m。

风城组(P_2f)沉积序列为湖侵到高位再到湖退的完整基准面变化:风一段湖侵,风二段高位,风三段湖退的沉积过程,表现为由三角洲前缘到半深湖-深湖再



a.玛湖凹陷区域位置图; b.玛湖凹陷风城组分布厚度以及岩心观察井位分布图; c.玛页1井风城组综合柱状图

图 1 玛湖凹陷区域位置以及风城组综合柱状图

Fig. 1 Location of Mahu depression and comprehensive histogram of Fengcheng Formation

到浅湖的沉积环境演化。结合沉积期盐碱化程度研究(Xiao D et al., 2021; 雷海艳等, 2022; 宋永等, 2022), 风城组纵向由下向上可分为 5 个岩性组合(图 1)。第一组合: 含火山岩的淡水或低盐度沉积组合段, 该段以火山岩、细砾岩、砂岩、粉砂岩或泥质粉砂岩为主; 第二组合: 咸化沉积组合段: 以富集云质纹层泥岩为主, 夹少量云质粉砂质泥岩或含云泥质粉砂岩纹层或透镜体; 第三组合: 碱化沉积组合段: 以混积云质、膏质、硅硼钙质泥岩为主, 夹少量云质粉砂质泥岩或含云泥质粉砂岩纹层或透镜体; 第四组合: 咸化沉积组合, 以富集云质纹层的混积泥岩为主, 夹少量云质粉砂质泥岩或含云泥质粉砂岩透镜体; 第五组合: 淡水或低盐度沉积组合: 以粉砂岩和泥质粉砂岩为主, 夹

粉砂质泥岩层。5 个岩性组合即反映了沉积环境的快速变化, 同时表明了风城组成分复杂、岩石非均质性强的特点(朱世发等, 2014; 许琳等, 2019; 王小军等, 2022), 极大的增加了储层特征研究的难度。

2 研究方法 及 实验分析手段

2.1 厘米级岩性观察。

风城组岩石类型多样, 火山岩、碎屑岩、多源混积泥岩、内源岩均有发育, 且各类岩性之间穿插频繁, 很难发现不同岩石类型之间平面和纵向叠置规律, 在未进行成分分析之前, 对细粒沉积进行准确的岩性定名难度较大。在此背景下, 结合沉积速率与沉积构造

之间的相关性分析,认为层厚与岩性、构造与岩性之间具有高度契合的特征。因此采用高分辨率厘米级岩性观察描述,对重点井进行全井段构造、岩性观察分析,建立层厚、构造、岩性、发育位置四者之间的联系,从构造上考察不同类型页岩油储层的特性,为分析繁杂的岩性理出思路。

2.2 微观实验处理

在厘米级岩性观察过程中,对不同岩性、不同构造样品进行采集,主要用于岩石成分分析、孔渗物性分析、亚离子抛光、荧光、薄片观察以及能谱矿物鉴定等。由于岩石类型的复杂多变,对单井142个样品进行全岩矿物分析,对样品进行成分鉴定。结合氮气吸附(10个)、高压压汞(1 124个)以及核磁共振(10个)对样品进行孔渗物性分析,类比不同类型储层之间的孔渗物性差异。利用普通薄片、铸体薄片(84个)以及亚离子抛光(19个)观察分析不同类型储层之间的孔隙结构特征,总结储集空间类型特点。利用荧光(35个)观察,定位并总结不同类型储层中油气

富集位置,进而为综合评价各类型储层提供依据。

3 岩心观察与微观分析结果

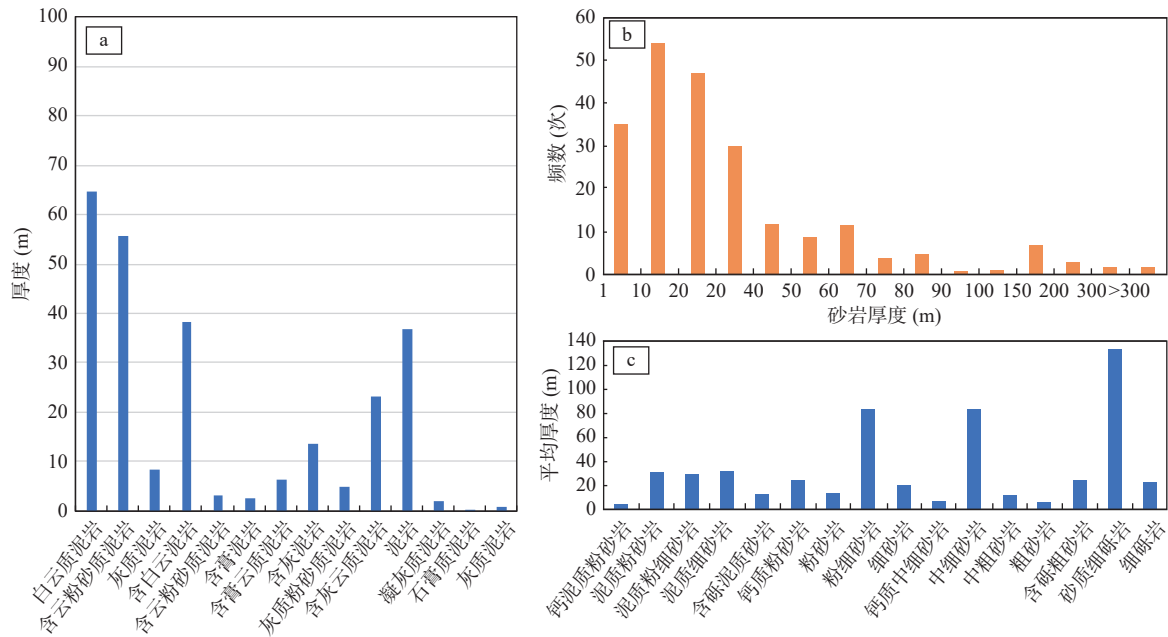
3.1 构造、层厚发育特征

凤城组不同岩石类型沉积构造、层厚以及特征矿物的富集样式具有较大差异(表1)。砂-砾岩储层作为早期致密油勘探的主要目标,以中厚层-块状分布于风一段与风三段中(图1),层厚范围广,薄层至巨厚层。细-粗砂岩类储层主要分布于风一段与风二段中,灰质和云质胶结间断性发育。粉砂岩储层在凤城组3个段中随机分布,主要表现为2种岩相:云质粉砂岩与含云泥质粉砂岩。重点井岩心观察表明,砂砾岩类储层主体厚度范围1~40 cm(图2),风一段底部砂质细砾岩最厚可达2~3 m(图2),表现为中厚层到块状,其余层位多呈现以薄层、纹层、透镜状为主。火山岩储层集中发育于风一段,玄武质安山岩和熔结凝灰岩呈厚层块状或角砾状(图3)。气孔发育,多见垂直裂

表1 玛湖凹陷凤城组岩心描述主要参数表

Tab. 1 Main parameters of core description of Fengcheng Formation in Mahu Sag

岩性类型	颜色	层厚	构造	特征矿物类型	特征矿物富集形式	裂缝发育情况	岩心含油性	可见孔隙类型	
砂-砾岩	含云泥质粉砂岩、泥质粉砂岩	浅灰白色、银灰色、灰色、浅绿色、灰色	纹层、薄层、中层、厚层、巨厚层	块状、平行层理、粒序层理、透镜状层理	黄铁矿	结核状	近垂直裂缝、近水平裂缝、缝合线	富含油、油浸、油斑、油迹	裂缝、矿物溶孔
	云质粉砂岩、粉砂岩								
	泥质粉细砂岩、粉细砂岩、泥质细砂岩、细砂岩								
	含泥砾粉砂岩								
	钙质中细砂岩、中细砂岩								
	中粗砂岩、粗砂岩、含砾粗砂岩、砂质细砾岩、细砾岩								
火山岩	安山岩、熔结凝灰岩	浅绿灰色、浅灰褐色	厚层、巨厚层	块状、角砾状、包卷状	浊沸石、石英	气孔充填	近垂直裂缝、近水平裂缝、缝合线	富含油、油浸、油斑、油迹	裂缝、气孔
云岩	灰质云岩、泥质云岩	浅灰色	薄层、纹层	透镜状					
泥级细粒混积岩	云质泥岩/页岩	黑色、黑灰色、深灰色、浅灰色	纹层、薄层、中层	页理、透镜状层理、水平层理、沙纹层理	燧石、钙质矿物、硅硼钙质矿物、石膏	纹层-似纹层状、树根状-网状、雪花-星点状	页理缝、近水平裂缝、缝合线	油浸、油斑、油迹	矿物溶孔、晶间孔、裂缝
	含云粉砂质泥岩/页岩								
	粉砂质泥岩/页岩								
	含云泥岩/页岩								



a.不同类型泥级细粒混积岩总厚; b.砂岩类储层层厚频次特征; c.砂岩类储层平均层厚分布特征; 数据均来源于玛页 1 井

图 2 玛湖凹陷风城组不同类型储层分布特征图

Fig. 2 Distribution characteristics of different types of reservoirs in Fengcheng Formation, Mahu Sag

缝,油侵、油斑现象丰富。风城组内源沉积主要为蒸发岩类,岩石类型以碳钠钙石岩、碳酸钠石(天然碱)、苏打石岩和硅硼钠石岩为主,多以纹层状或似纹层状贯穿发育于泥级细粒混积岩中,仅少量白云岩、泥质白云岩、凝灰质白云岩、灰质云岩和灰岩呈薄层状产出。总体而言,内源矿物虽然较为发育,但层状产出的内源岩在风城组中还未大规模发现,混积成因是风城组细粒岩石类型成分复杂的主要原因。

泥级细粒混积岩在风城组 3 个亚段中均广泛发育,玛页 1 井泥级细粒混积岩总厚达 262.3 m,主要集中在分布于风城组二段和三段,风一段占比较小。由于沉积环境水体相对较深,以静水和水动力相对较弱的浅湖-半深湖沉积环境为主,沉积构造单一,透镜状层理与水平层理广泛发育。岩石成分表现为细粒泥质与内源矿物伴生沉积的特点,燧石、方解石、白云石、硅硼钠钙石、石膏等矿物呈不同富集样式,将基质泥岩分隔为厘米级到分米级薄层,形成了多样化的岩石结构构造特征。高分辨率岩心观察表明,风城组内源矿物富集主要表现为 3 种样式:树根-网状、纹层-似纹层状、雪花-星点状(图 4)。因此,根据泥级细粒混积岩在整体岩性中占比大、岩心岩石成分不易区分、构造复杂多变的特点,在进行显微成分分析之前,矿物富集形式的构造差异成为细粒混积岩岩心观察中区分不同岩性段的主要途径。

3.2 岩石学成分

风城组各类岩性中火山岩类储层以其特殊的结构构造与其余几类储层较易区分,砂砾岩类以粒度较粗的陆源碎屑石英、长石为主,少量钙质胶结为特点,在岩石类型划分中具有较鲜明的特点,因此,成分分析过程中将泥级细粒混积岩作为主要研究对象。以广义混积岩概念为基础(Mount, 1984; 沙庆安, 2001; 张建国等, 2022),风城组泥级细粒沉积物全岩 X 衍射分析表明,泥级细粒沉积物中均不同程度发育云质以及灰质成分,其含量 15%~50% 不等(图 5),极少数透镜状夹层直接表现为云质岩的特点。风城组不同层段之间混积泥岩成分差异较大。风一段长英质矿物较高,风三段黏土质含量相对较高,风二段中黏土质矿物、长英质矿物和灰/云质成分总体差别较小,纵向上各层段内部差异也具有明显的不同。

3.3 物性特征

砂砾岩类储层与火山岩类储层作为早期勘探的主要对象,除具有厚度优势之外,总体物性条件要高于细粒混积岩类。玛湖凹陷不同区域风城组砂砾岩类储层物性差异大(图 6)。西斜坡风城组孔隙度分布区间为 1%~13%,平均值 2.89%,储层渗透率多小于 0.1 mD。玛页 1 井区砂岩类储层平均孔隙度为 6.9%,夏子街鼻凸砂岩类储层平均孔隙度 6.2%,克 81 井区砂岩类储层平均孔隙度为 7.2%,风南 14 井区风城组

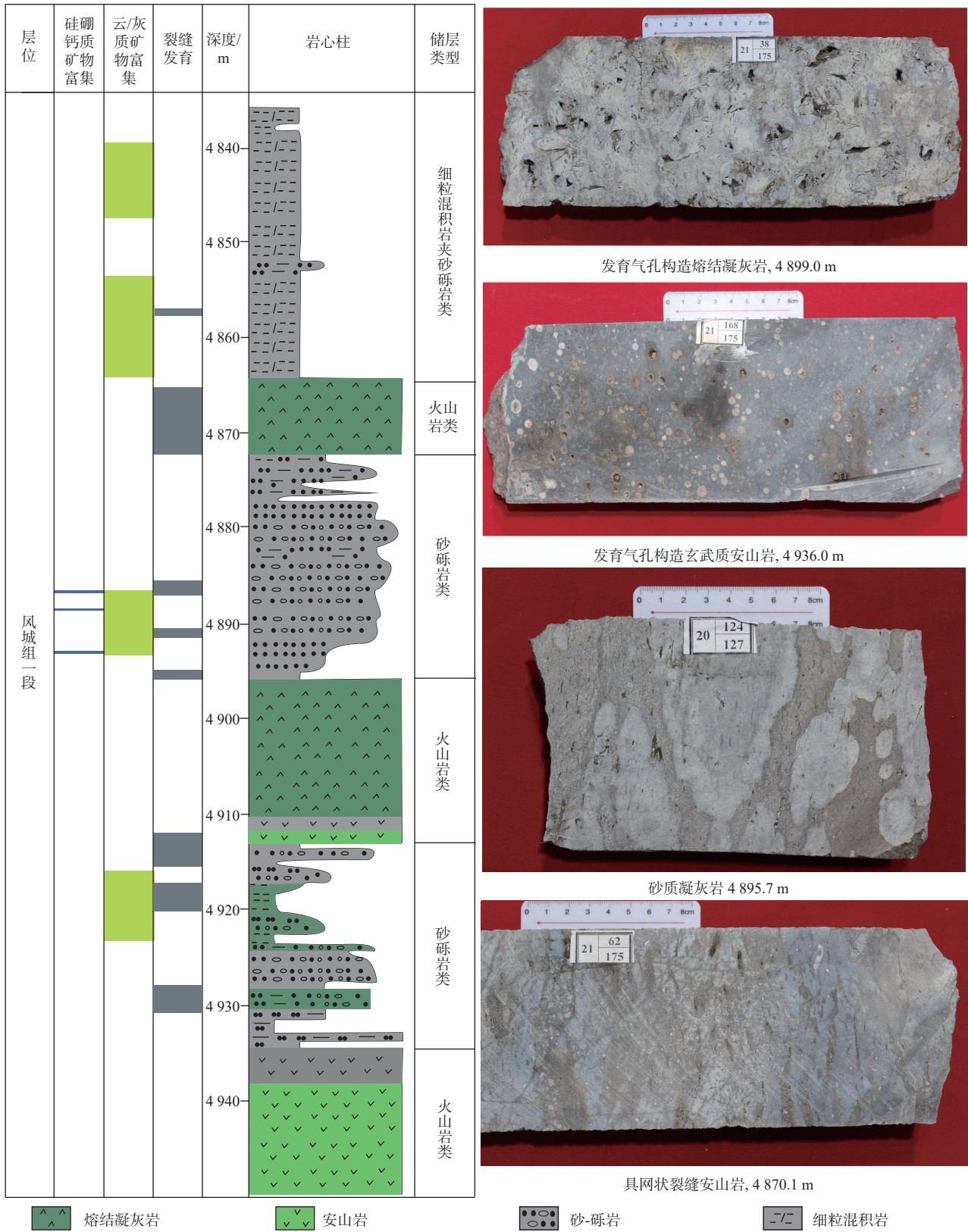
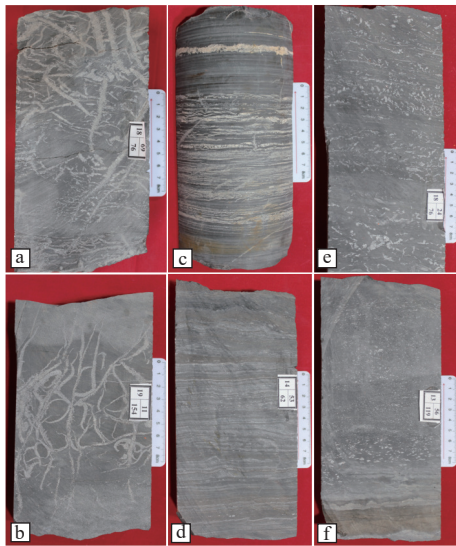


图3 风城组火山岩与砂砾岩储层发育特征图

Fig. 3 Characteristics of volcanic rock and conglomerate of Fengcheng Formation

砂岩夹层类储层平均孔隙度 5.4%。火山岩类储层其平均有效孔隙度可达 7.3%, 但较砂砾岩类储层而言,

其渗透率则较小, 主要靠构造裂缝连通各类型孤立的储集空间。



a~b.树根状/网状细粒混积岩, 内源矿物表现为网状富集, 穿插沉积于基质泥岩中; c.纹层状细粒混积岩, 内源矿物表现为纹层状产出特征, 一般厚度大于 0.3 mm; d.薄纹层状细粒混积岩, 内源矿物纹层呈薄纹层状产出, 厚度小于 0.3 mm; e~f.雪花状细粒混积岩, 内源矿物表现为孤立的点状、雪花/棉絮状

图 4 玛湖凹陷风城组页岩油储层细粒混积岩内源矿物富集样式

Fig. 4 Endogenous mineral enrichment patterns of fine-grained mixed rock from shale oil reservoir in Fengcheng Formation, Mahu Sag

不同类型储层高压压汞数据显示, 砂砾岩类最大进汞饱和度可达 95%(图 7), 平均汞饱和度约 80%, 玄武岩汞饱和度特征与混积泥岩类相似, 主要分布范围 60%~30%, 混积泥岩中不同构造类型汞饱和度特征具有明显的差异, 纹层状混积泥岩进汞饱和度较大, 60%~50%, 且排驱压力显著的小于树根状与雪花星

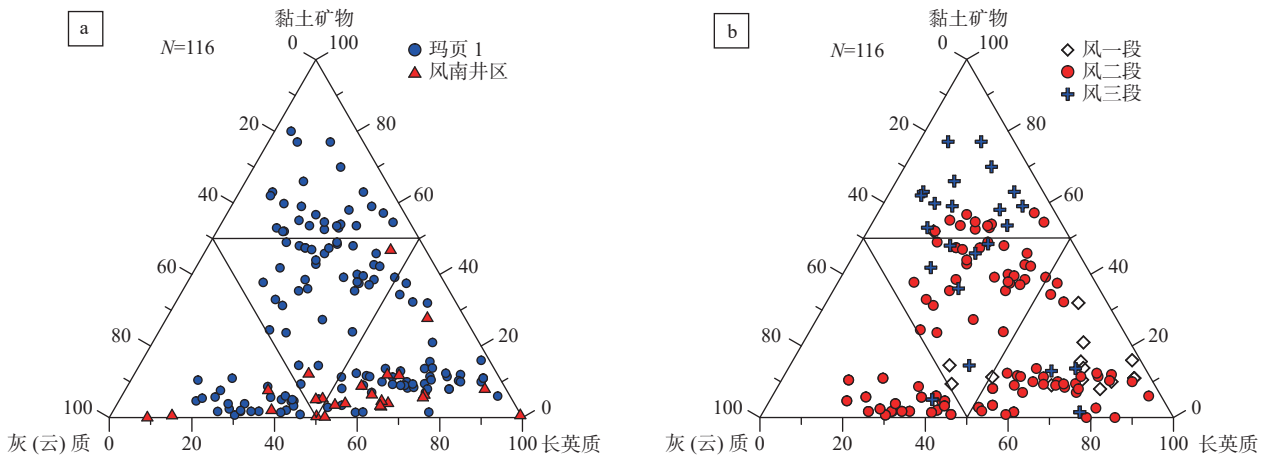
点状混积泥岩。

结合页理发育状态, 对不同类型细粒混积岩按内源矿物富集状态进行分类孔隙度分析(图 8)。页理发育的细粒混积岩孔隙度较集中, 有效孔隙度较大, 主要集中分布于 3%~6%。硅硼钙质纹层集中发育的细粒混积岩, 晶间孔隙发育较多, 局部孔隙度达 7%~8%, 有效孔隙度集中范围与纹层状-似纹层状细粒混积岩相似, 较为分散。树根状混积岩则表现出总孔隙度明显较小的特点。雪花状与星点状有效孔隙度的分布集中度高、孔隙度更小, 但雪花状混积泥岩的总孔隙度相对偏低, 而雪花状混积泥岩局部总孔隙度较高, 这可能与白云石含量差异具一定的联系。

3.4 储集空间特征

除火山岩类肉眼可见有较大的原生气孔与构造裂缝之外, 砂砾岩类储层、细粒混积岩类储层及云岩类储层的储集空间研究必须借助显微实验手段方法。因此, 结合亚离子抛光电镜以及薄片显微观察, 总结认为: 砂砾岩类储层储集空间类型主要有原生孔、晶间孔和次生溶孔 3 种类型; 细粒混积岩类储层相对较为丰富, 包括长石溶孔、白云石溶孔、自生矿物晶间孔、有机质孔以及微裂缝。

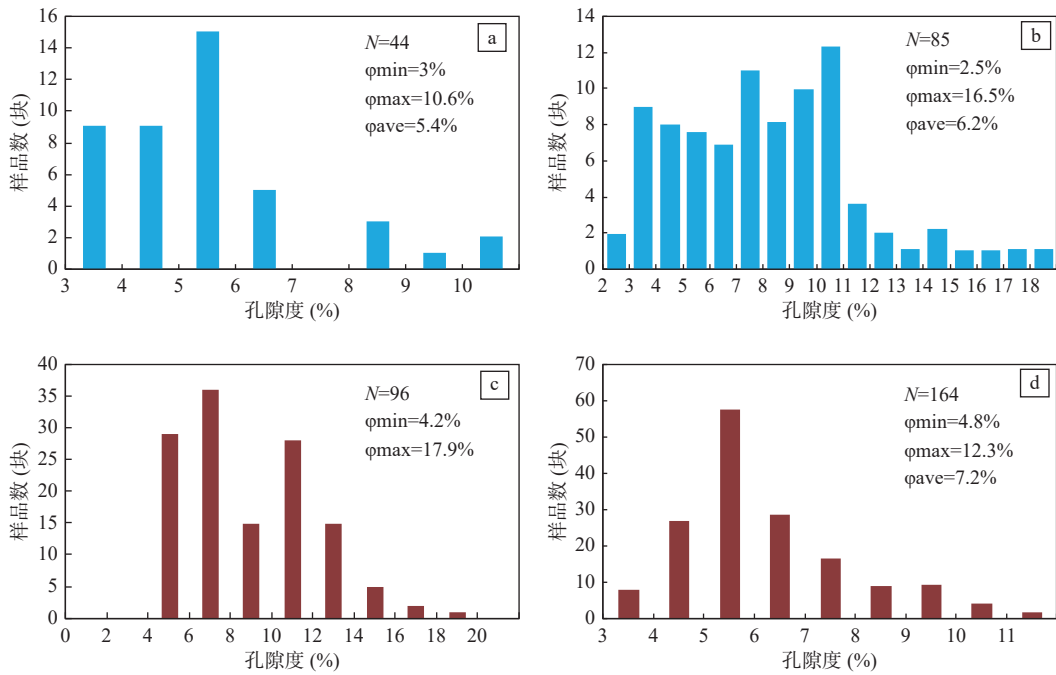
(1)砂砾岩类储层: 储集空间由于碎屑粒径以及成分的原因, 主要有粒间孔及次生溶蚀孔(图 9a~图 9c)。原生粒间孔集中发育时黏土矿物整体含量较低, 碎屑颗粒之间多为点到线接触, 残留的原生粒间孔中未充填或少量充填自生黏土矿物, 是该类型储层的重要储集空间类型。由于沉积期整体近物源且物源区火山作用强烈发育的影响, 成分中含大量的长石



a.数据来源于玛页 1 井与风南井区混积岩; b.数据来源于玛页 1 井

图 5 玛湖凹陷风城组细粒混积岩类岩性三角图

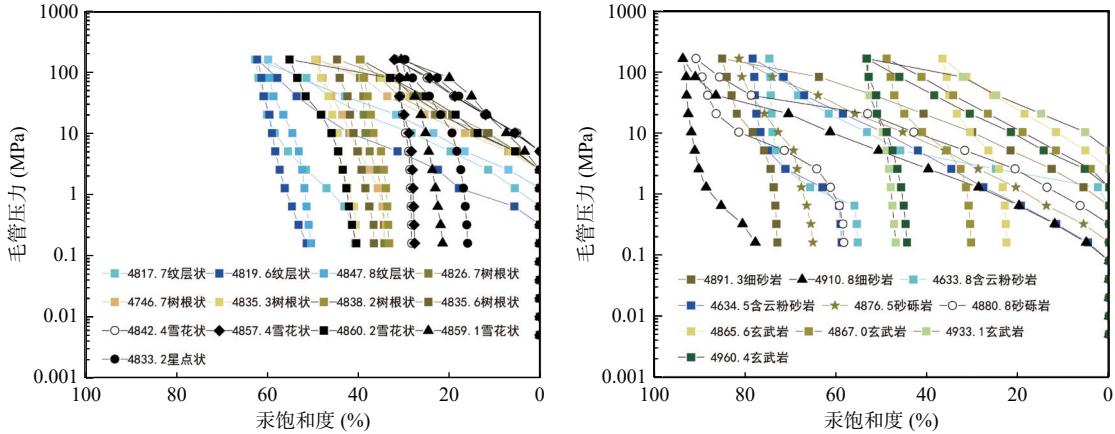
Fig. 5 Lithologic triangle diagram of fine-grained mixed rocks in Fengcheng Formation, Mahu Sag



a.风南14井区风城组粉砂岩; b.夏子街鼻凸风城组砂岩; c.玛页1井区风城组砂岩; d.克81井区风城组砂岩

图6 玛湖凹陷风城组砂砾岩类储层物性对比图

Fig. 6 Comparison of conglomerate reservoir properties in Fengcheng Formation, Mahu Depression



a.砂砾岩类与火山岩; b.混积泥岩类,包括纹层状、树根状、雪花状/点状; 压汞数据均来源于玛页1井

图7 玛湖凹陷风城组不同类型储层高压压汞特征对比图

Fig. 7 Comparison of high-pressure mercury injection characteristics of different types of reservoirs in Fengcheng Formation, Mahu Depression

类矿物,该类型矿物在后期的成岩演化过程中,有机酸的溶蚀作用形成了丰富的溶蚀孔隙,为优质储层的形成奠定了重要的基础。

(2)内源岩类储层:风城组蒸发岩型内源岩发育泥质云岩或灰岩的晶间孔储集空间,白云石晶粒之间孔隙表现为微米到纳米大小。盐碱湖沉积背景下沉积形成的碳钠钙石岩和苏打石岩常表现为透镜状,零星发育的特点,由于多以纹层状夹于细粒混积岩中,

薄片样品较难获取,手标本中晶体粗大,集合体呈板柱状,晶间孔相对较大,表现为微米到毫米级别。

(3)细粒混积岩储层:该类型储层由于陆源碎屑与内源矿物共生的特点,其储集空间兼具了碎屑岩与内源岩的储集空间特性。碎屑石英粒间孔相比砂砾岩储层而言,细粒混积岩中粒间孔孔径大小大幅缩小,主要表现为残留原生粒间孔隙以及粒间溶孔,原生粒间孔半充填黏土矿物,平均孔径分布范围:10~100 μm,

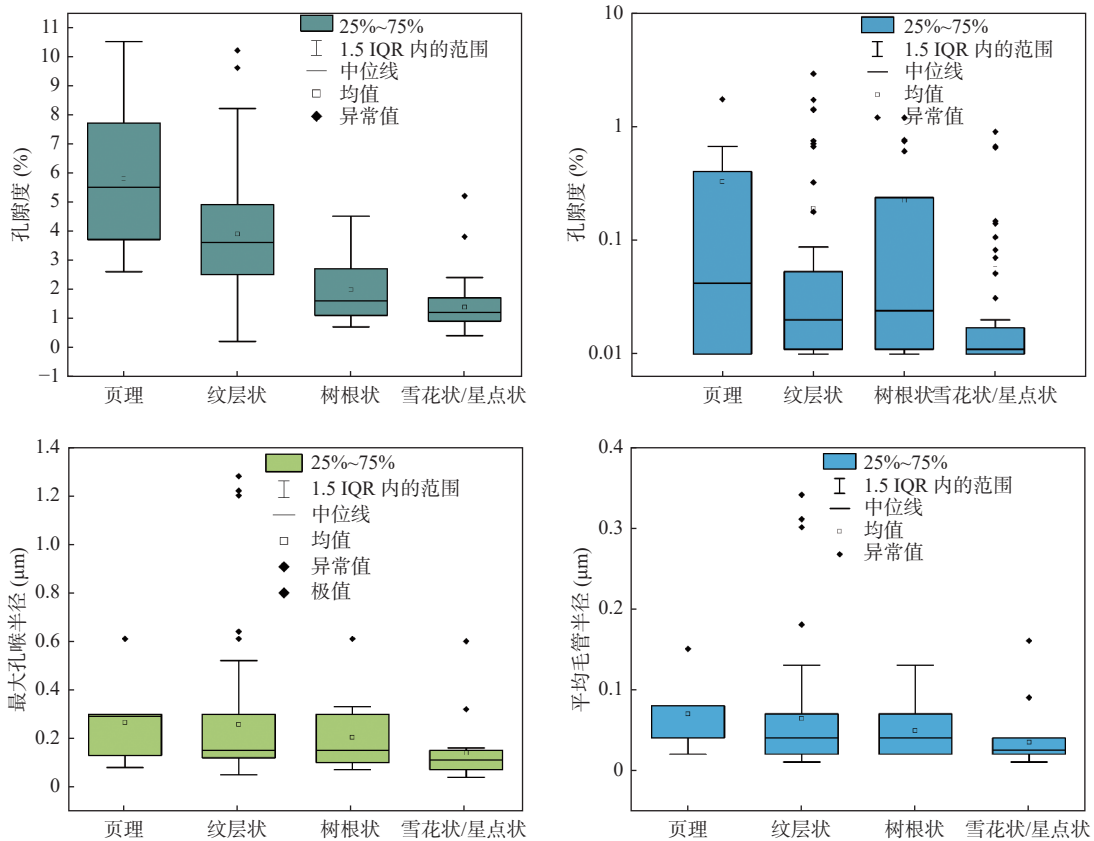


图 8 玛湖凹陷风城组细粒混积岩储层物性与孔喉发育特征图

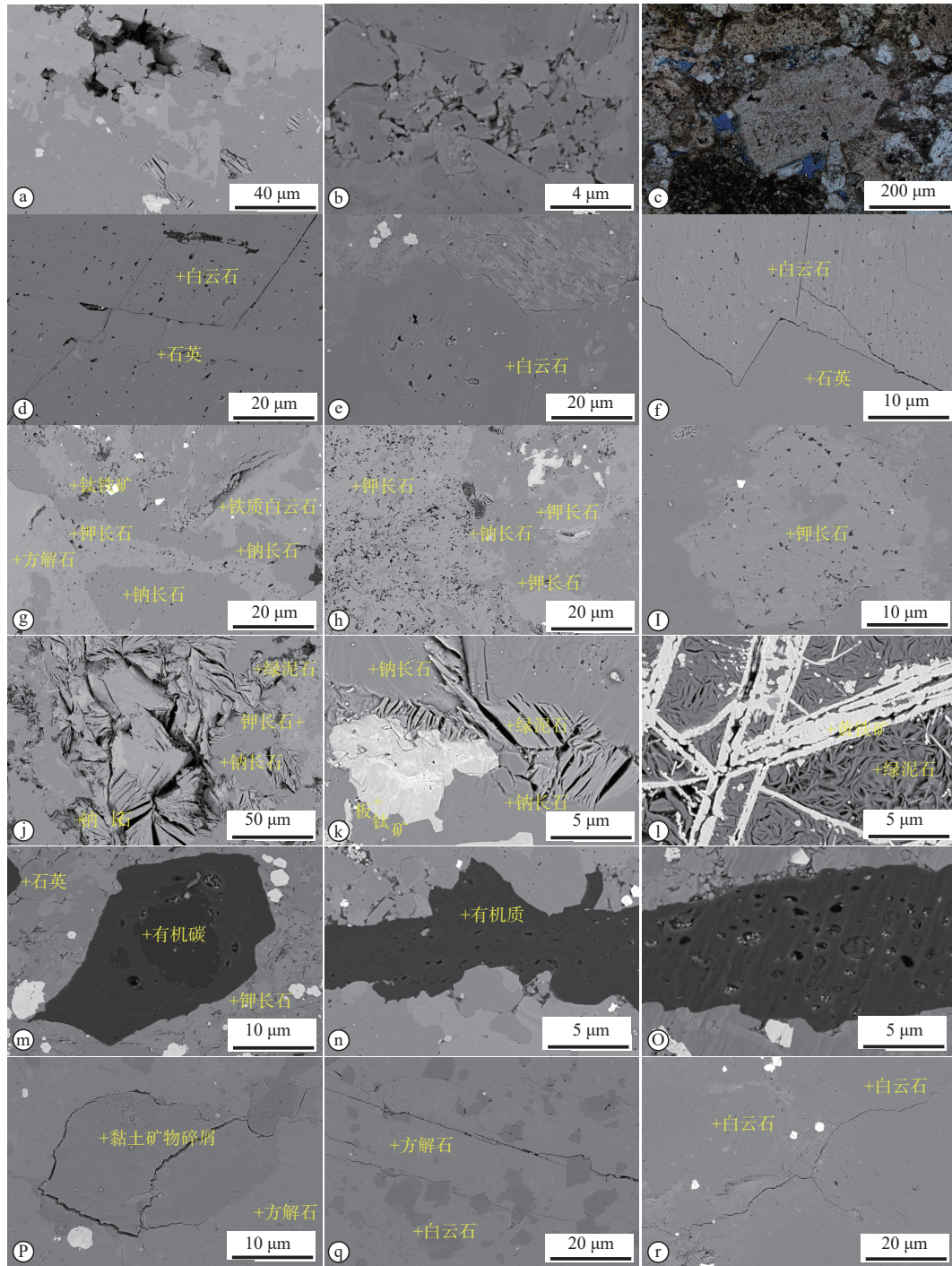
Fig. 8 Physical properties and pore-throat characteristics of fine-grained mixed rock of Fengcheng Formation in Mahu Sag

表现为微米级孔隙为主, 具有相对较好的连通性。次生溶孔(图 9d~图 9i): 表现为内源自生白云石颗粒溶蚀以及陆源碎屑长石颗粒溶蚀。孔隙孤立状分布, 其连通性较差。长石类溶孔主要赋存于钾长石颗粒中, 形成微米-纳米级连片分布的孔隙, 少量钠长石中也存在溶孔。有机质孔隙(图 9m~图 9o): 为纺锤状和气泡状、平面孤立状, 见多边形, 孔径范围多小于 2 μm。晶间孔以白云石晶间孔和自生黏土矿物晶间孔为主(图 9j~图 9l), 整体表现为密集发育的特点, 呈纺锤状, 孔隙平面连通性好。主要分布范围: 2~5 μm。微裂缝表现为碎屑粒缘缝、粒内缝(图 9p~图 9r)。裂缝延伸大于 10 μm。缝宽一般小于 1 μm, 裂缝中次生矿物充填物较少、开启程度较高, 可有效提高储层的渗透率, 对储层发育有利。

4 储层类型划分讨论

储层的综合评价是区域规模化开发的前提。风城组页岩油藏是典型的自生自储或近源成储的油藏

类型, 与页岩气储层评价类似, 岩石学、物性等储层基本特征以及能否被开采都是页岩油储层综合评价的重要考量因素(蒋裕强等, 2010; 于炳松, 2012; 王茂林等, 2017; 匡立春等, 2021)。以成分分析为基础, 结合粒度、层厚、构造发育特征, 将玛湖凹陷风城组储层总结为 4 大类、8 小类、29 种岩性(表 1、表 2)。4 大类分别是 I 类(砂砾岩类储层)、II 类(火山岩类储层)、III 类(混积岩类储层)以及 IV 类(内源岩类储层)。其中混积岩类由于其多源混积、粒级细小的特点, 以现场实用的原则, 将构造和层厚发育特点作为主要的参考要素对风城组页岩油储层进行岩相类型划分。细粒混积岩类储层根据页理是否发育可划分为混积页岩与混积泥岩。其中混积泥岩以硅硼钙质/灰质/云质矿物的富集为依据, 进一步划分为 3 个小类: 纹层-似纹层状混积泥岩、树根-网状混积泥岩、雪花-星点状混积泥岩(表 3)。综合储层物性、厚度、储集空间类型对风城组页岩油进行综合评价, 认为风城组页岩油储层砂砾岩类、火山岩类、细粒混积岩类、内源岩类储集条件逐渐变差, 其中细粒混积岩类由于其厚度大、



a. 粉细砂岩碎屑粒间孔, 夏 76 井, 3 646.6 m, 亚离子抛光片; b. 粉细砂岩碎屑粒间孔, 亚离子抛光片, 玛页 1 井, 4 875.3 m; c. 细砂岩原生粒间孔, 单偏光, 克 81 井, 4 307.6 m; d. 白云石晶内溶孔, 亚离子抛光片, 风南 14 井, 4 320.5 m; e. 白云石晶内溶孔, 亚离子抛光片, 玛页 1 井, 4 839.3 m; f. 白云石晶缘溶孔, 亚离子抛光片, 玛页 1 井, 4 802.2 m; g. 长石类矿物溶孔, 亚离子抛光片, 玛页 1 井, 4 924.6 m; h. 钾长石溶孔, 亚离子抛光片, 玛页 1 井, 4 928.7 m; i. 钾长石溶孔, 亚离子抛光片, 玛页 1 井, 4 704.8 m; j. 绿泥石晶间孔, 亚离子抛光片, 风南 1 井, 4 326 m; k. 绿泥石晶间孔, 亚离子抛光片, 风南 14 井, 4 165.1 m; l. 绿泥石与黄铁矿晶间孔, 亚离子抛光片, 玛页 1 井, 4 833.9 m; m~o. 孤立纺锤状有机质孔, 亚离子抛光片, 玛页 1 井, 4 853.08 m, 亚离子抛光; p. 黏土碎屑粒缘缝, 亚离子抛光片, 玛页 1 井, 4 862.1 m; q. 微裂缝, 亚离子抛光片, 风南 14 井, 4 167.5 m; r. 微裂缝, 亚离子抛光片, 风南 14 井, 4 166.5 m

图 9 玛湖凹陷风城组页岩油储层储集空间类型

Fig. 9 Reservoir space types of shale oil reservoirs in Fengcheng Formation, Mahu Sag

表 2 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组储层类型表

Tab. 2 Shale oil reservoir types of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin

储层类型	大类	小类	亚类	种	分布层位
I 类	砂砾岩类	砾岩	巨厚 (>1.0 m)	细砾岩 砂质细砾岩	风城组一段
			厚层 (1.0~0.3 m)		
			中层 (0.3~0.1 m)		
			薄层 (<0.1 m)		
		砂岩	巨厚 (>1.0 m)	含砾粗砂岩 中粗砂岩 细砂岩 粉细砂岩 钙/云质中细砂岩 泥质粉细砂岩	风城组三段 风城组二段 风城组一段
			厚层 (1.0~0.3 m)		
			中层 (0.3~0.1 m)		
			薄层 (<0.1 m)		
		粉砂岩	厚层 (1.0~0.3 m)	云质粉砂岩 含云泥质粉砂岩	风城组三段 风城组二段 风城组一段
			中层 (0.3~0.1 m)		
			薄层 (<0.1 m)		
		II 类	火山岩类	安山岩	巨厚 (>1.0 m)
凝灰岩	巨厚 (>1.0 m)			熔结凝灰岩	
III 类	混积岩类	页岩	无纹层	黏土质泥/页岩 云质泥/页岩 云质/粉砂质泥/页岩 含云粉砂质泥/页岩 含膏云质泥/页岩	风城组三段 风城组二段
			纹层状/似纹层状		
		泥岩	纹层/似纹层状		风城组三段 风城组二段 风城组一段
			树根状		
		雪花状/星点状			
IV 类	内源岩类	白云岩 蒸发岩	薄层 (<0.1 m)	砂屑白云岩、泥质白云岩、灰质白云岩 碳钠钙石岩、 苏打石岩	风城组三段 风城组二段

表 3 细粒混积岩类页岩油储层类型物性特征对比表

Tab. 3 Properties of mixed rock reservoirs

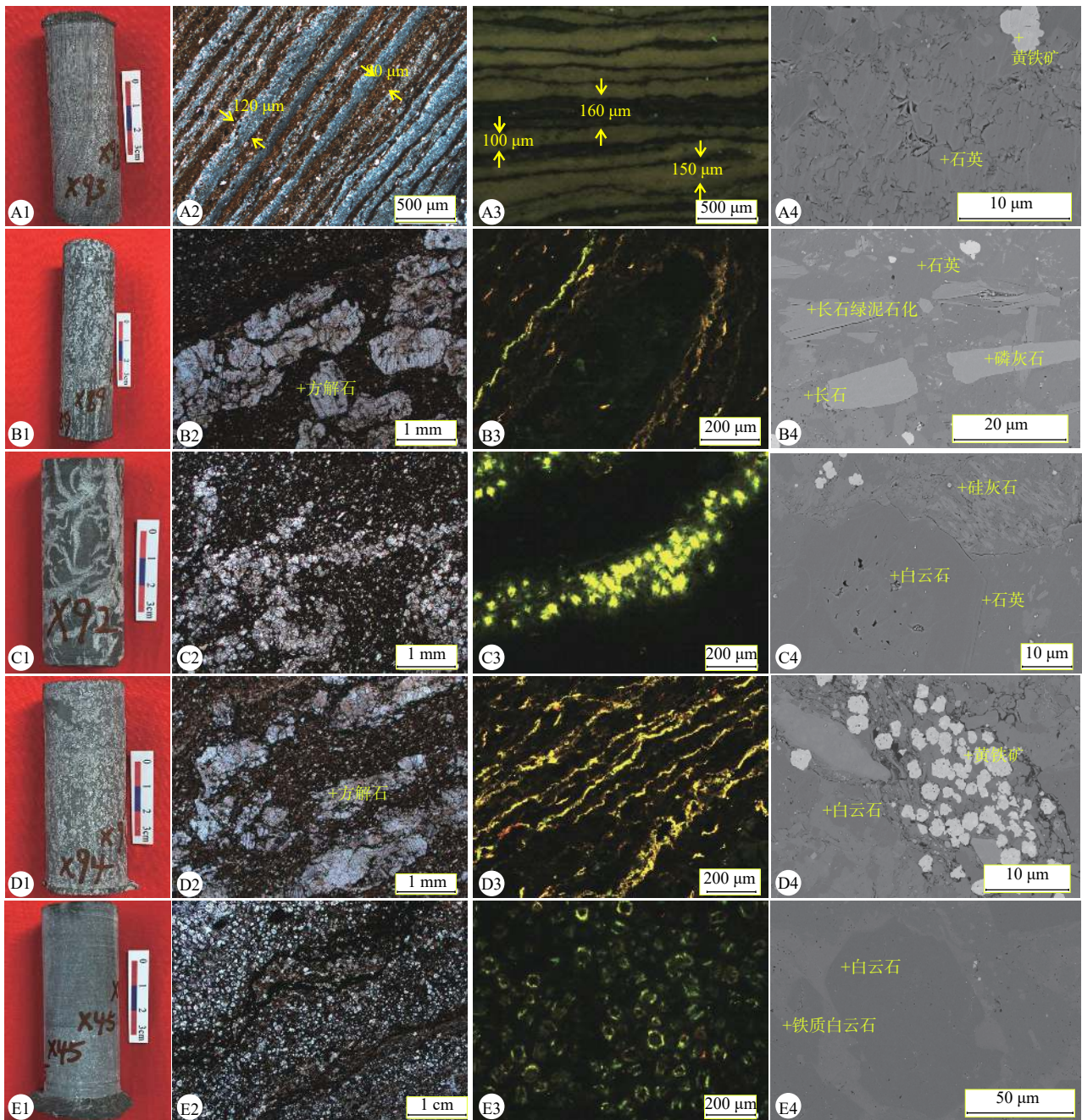
混积岩储层类型	构造特征	平均有效孔隙度 (%)	平均自由流体孔 (%)	平均总孔隙度 (%)	平均脆性	样品数 (个)
III 1 类	页理发育	3.93	1.77	6.39	4.62	137
III 2 类	纹层-似纹层状	3.04	1.38	4.93	5.15	518
	硅硼钙纹层富集	3.28	1.32	5.88	4.31	147
III 3 类	树根状/网状	2.92	1.27	5.33	4.54	53
III 4 类	星点状	2.32	1.16	5.35	4.33	54
	雪花状	2.64	0.95	5.51	4.17	234

范围广、自生自储的特点成为现目前勘探的重要目标。

以特殊矿物富集状态进行区分的细粒混积岩, 页理发育状态、矿物纹层是否发育等条件导致了孔渗物性以及油气储集状态的显著差别。各类型细粒混积岩的孔隙度表现为混积页岩、纹层-似纹层状混积泥

岩、树根状-网状混积泥岩、雪花-星点状混积泥岩逐渐降低的特点。

III 1 类混积岩储层: 具有丰富的页理发育特点, 页理表现为平直细缝状, 页理缝发育段整体孔渗物性相对较好, 平均总孔隙度达 6.39%。除此之外, 页理发育处脆性矿物含量也相对较高, 有利于后期的勘探开发。



A1~A4. 薄纹层状白云质泥岩, 玛页1井, 4 860.18 m; B1~B4. 似纹层状云灰质泥岩, 玛页1井, 4 755.34 m; C1~C4. 树根状白云质泥岩, 玛页1井, 4 839.33 m; D1~D4. 雪花状云灰质泥岩, 玛页井, 4 833.9 m; E1~E4. 雪花状白云质泥岩, 玛页1井, 4 773.91 m; 每种标本从左至右分别为岩心、单偏光、荧光、等离子质谱扫描

图 10 玛湖凹陷风城组不同类型细粒混积岩特征

Fig. 10 Characteristics of different types of fine-grained mixed rocks in Fengcheng Formation, Mahu Sag

Ⅲ2类混积岩储层的矿物纹层集中发育,与黏土质纹层或有机质纹层间互,矿物纹层多为长英质矿物、白云石和硅硼钙质矿物,纹层状(图 10A1~图 10A4)或似纹层状(图 10B1~图 10B4),在荧光下,矿物纹层集中含油,储集空间为矿物粒间孔和黏土质矿物晶间

孔。Ⅲ3类混积岩储层有机质含量小,纹层不明显(图 10C1~图 10C4),表现为不规则网状或树根状白云石矿物或硅硼钙质矿物,荧光特征显示,含油处主要为网状或树根状的白云石矿物富集处,而硅硼钙质类矿物均未显示明显的荧光特征。Ⅲ4类混积岩储层

白云石矿物与硅硼钙质矿物分散发育,整体呈雪花状(图10D1~图10D4)或星点状散布(图10E1~图10E4),有机质纹层少量发育,荧光下主要为白云石颗粒粒缘荧光显示的特点,少量有机质纹层荧光。

细粒混积岩微观特征表明,以矿物富集状态为依据进行的细粒混积岩储层类型划分具有较好的可对比性,然而也存其局限性。储层类型的划分目的在于更好的为油气勘探服务,常规研究方法认为储层类型的划分应结合测井曲线,对不同岩性储层类型进行对比及特征总结,以达到更广范围的使用为目的。然而,页岩油储层岩性成分复杂,尤其是细粒混积岩类储层,碎屑沉积作用以及内源化学沉积作用相互穿插,仅结合沉积构造与岩性成分变化来分析总结测井曲线对应特征难度较大,甚至无从下手,因此如何达到更为全面的应用效果还需要寻求更多的途径进一步研究。

5 结论

(1)玛湖凹陷风城组发育4大类、8小类、29种储层类型,砂砾岩类、火山岩类、混积岩类与内源岩类4类,储层储集性能逐渐减弱,细粒混积岩类页岩油储层以其厚度大、分布广的特点是后续页岩油勘探的主要目标。

(2)细粒混积岩类页岩油储层构造样式复杂,依据页理发育程度以及矿物富集状态细粒混积岩可进一步划分为4亚类:混积页岩、纹层-似纹层状混积泥岩、树根状-网状混积泥岩、雪花-星点状混积泥岩,4种类型细粒混积岩孔渗物性逐渐降低。

(3)风城组页岩油储层因岩石类型差异,储集空间类型变化丰富。火山岩类储层以气孔和微裂缝作为主要的储集空间类型,砂砾岩类储层则广泛发育次生溶蚀类孔隙,细粒混积岩类页岩油储层,除常规储层中常见的原生孔、晶间孔和次生溶孔之外,有机质孔隙的发育为优质甜点的形成创造了重要条件。

参考文献(References):

曹元婷,潘晓慧,李菁,等.关于吉木萨尔凹陷页岩油的思考[J].新疆石油地质,2020,41(05):622-630.

CAO Yuanting, PAN Xiaohui, LI Jing, et al. Discussion on Shale Oil in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(05): 622-630.

方欣欣,郭迎春,王朋,等.致密油成藏研究进展与待解决的重要科学问题[J].中国地质,2020,47(01):43-56.

FANG Xinxin, GUO Yingchun, WANG Peng, et al. The progress of research on tight oil accumulation and several scientific issues requiring further study[J]. Geology in China, 2020, 47(01): 43-56.

付金华,郭雯,李士祥,等.鄂尔多斯盆地长7段多类型页岩油特征及勘探潜力[J].天然气地球科学,2021,32(12):1749-1761.

FU Jinhua, GUO Wen, LI Shixiang, et al. Characteristics and exploration potential of multi-type shale oil in the 7th Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(12): 1749-1761.

付金华,李士祥,侯雨庭,等.鄂尔多斯盆地延长组7段II类页岩油风险勘探突破及其意义[J].中国石油勘探,2020,25(01):78-92.

FU Jinhua, LI Shixiang, HOU Yuting, et al. Breakthrough of risk exploration of Class II shale oil in Chang 7 member of Yanchang Formation in the Ordos Basin and its significance[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(01): 78-92.

郭旭光,何文军,杨森,等.准噶尔盆地页岩油“甜点区”评价与关键技术应用——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J].天然气地球科学,2019,30(08):1168-1179.

GUO Xuguang, HE Wenjun, YANG Sen, et al. Evaluation and application of key technologies of "sweet area" of shale oil in Junggar Basin: Case study of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(08): 1168-1179.

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.

何文渊,蒙启安,冯子辉,等.松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践[J].石油学报,2022,43(01):1-14.

HE Wenyuan, MENG Qi'an, FENG Zihui, et al. In-situ accumulation theory and exploration & development practice of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(01): 1-14.

黄玉越,王贵文,宋连腾,等.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩储集层裂缝测井识别与有效性分析[J].古地理学报,2022,24(03):540-555.

HUANG Yuyue, WANG Guiwen, SONG Lianteng, et al. Fracture logging identification and effectiveness analysis of shale reser-

- voir of the Permian Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(03): 540–555.
- 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. *天然气工业*, 2010, 30(10): 7–12.
- JIANG Yuqiang, DONG Dazhong, QI Lin, et al. Development trend of marine shale gas reservoir evaluation and a suitable comprehensive evaluation system[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(10): 7–12.
- 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. *石油学报*, 2014, 35(01): 184–196.
- JIANG Zaixing, ZHANG Wenzhao, LIANG Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(01): 184–196.
- 匡立春, 侯连华, 杨智, 等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J]. *石油学报*, 2021, 42(01): 1–14.
- KUANG Lichun, HOU Lianhua, YANG Zhi, et al. Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization [J]. 2021, *Acta Petrolei Sinica*, 42(01): 1–14.
- 雷海艳, 郭佩, 孟颖, 等. 玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层孔隙结构及分类评价[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(03): 142–153.
- LEI Haiyan, GUO Pei, MENG Ying, et al. Pore structure and classification evaluation of shale oil reservoirs of Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(3): 142–153.
- 黎茂稳, 金之钧, 董明哲, 等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(04): 489–505.
- LI Maowen, JIN Zhijun, DONG Mingzhe, et al. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(04): 489–505.
- 黎茂稳, 马晓潇, 蒋启贵, 等. 北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(01): 13–28.
- LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIANG Qigui, et al. Enlightenment from formation conditions and enrichment characteristics of marine shale oil in North America[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(01): 13–28.
- 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(02): 249–256.
- LU Shuangfang, HUANG Wenbiao, CHEN Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(02): 249–256.
- 马文忠, 王永宏, 张三, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区长7段页岩油储层微观特征及控制因素[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(12): 1810–1821.
- MA Wenzhong, WANG Yonghong, ZHANG San, et al. Microscopic characteristics and controlling factors of Chang 7 Member shale oil reservoir in northern Shaanxi area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(12): 1810–1821.
- 聂海宽, 张培先, 边瑞康, 等. 中国陆相页岩油富集特征[J]. *地学前缘*, 2016, 23(02): 55–62.
- NIE Haikuan, ZHANG Peixian, BIAN Ruikang, et al. Oil accumulation characteristics of China continental shale[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(02): 55–62.
- 沙庆安. 混合沉积和混积岩的讨论[J]. *古地理学报*, 2001, (03): 63–66.
- SHA Qing'an. Discussion on mixing deposit and hunji rock[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, (03): 63–66.
- 宋永, 杨智峰, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱湖型页岩油勘探进展[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(01): 60–72.
- SONG Yong, YANG Zhifeng, He Wenjun, et al. Exploration progress of alkaline lake type shale oil of the Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(01): 60–72.
- 孙超, 姚素平. 页岩油储层孔隙发育特征及表征方法[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(01): 153–164.
- SUN Chao, YAO Suping. Pore structure and characterization methods of shale oil reservoir[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(01): 153–164.
- 唐颖, 邢云, 李乐忠, 等. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J]. *地学前缘*, 2012, 19(05): 356–363.
- TANG Ying, XING Yun, LI Lezhong, et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(05): 356–363.
- 唐勇, 郑孟林, 王霞田, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组烃源岩沉积古环境[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(05): 677–692.
- TANG Yong, ZHENG Menglin, WANG Xiayan, et al. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Fengcheng Formation in Mahu Sag of Jungar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(05): 677–692.
- 王广昫, 王凤兰, 蒙启安, 等. 古龙页岩油战略意义及攻关方向[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(03): 8–19.
- WANG Guangyu, WANG Fenglan, MENG Qi'an, et al. Strategic significance and research direction for Gulong shale oil[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(03): 8–19.
- 王茂林, 程鹏, 田辉, 等. 页岩油储层评价指标体系[J]. *地球化学*, 2017, 46(02): 178–190.
- WANG Maolin, CHENG Peng, TIAN Hui, et al. Evaluation index system of shale oil reservoirs[J]. *Geochimica*, 2017, 46(02): 178–190.

- 178–190.
- 王倩茹, 陶士振, 关平. 中国陆相盆地页岩油研究及勘探开发进展[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(03): 417–427.
- WANG Qianru, TAO Shizhen, GUAN Ping. Progress in research and exploration & development of shale oil in continental basins in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(03): 417–427.
- 王小军, 冯右伦, 杨森, 等. 玛湖凹陷二叠系风城组细粒沉积岩米氏旋回识别及意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(01): 128–143.
- WANG Xiaojun, FENG Youlun, YANG Sen, et al. Identification and significance of Milankovitch astronomical cycles of fine-grained sedimentary rocks, Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(01): 128–143.
- 许琳, 常秋生, 冯玲丽, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层特征及控制因素[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(05): 649–660.
- XU Lin, CHANG Qiusheng, FENG Lingli, et al. The reservoir characteristics and control factors of shale oil in Permian Fengcheng Formation of Mahu sag, Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(05): 649–660.
- 于炳松. 页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J]. 地学前缘, 2012, 19(03): 252–258.
- YU Bingsong. Particularity of shale gas reservoir and its evaluation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(03): 252–258.
- 张安达, 王继平, 王永超, 等. 松辽盆地古龙页岩储集空间类型及油赋存状态[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(05): 68–77.
- ZHANG Anda, WANG Jiping, WANG Yongchao, et al. Reservoir space types and oil occurrence of Gulong shale in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(05): 68–77.
- 张建国, 姜在兴, 刘鹏, 等. 陆相超细粒页岩油储层沉积机制与地质评价[J]. *石油学报*, 2022, 43(02): 234–249.
- ZHANG Jianguo, JIANG Zaixing, LIU Peng, et al. Deposition mechanism and geological assessment of continental ultrafine-grained shale oil reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(02): 234–249.
- 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(05): 322–331.
- ZHANG Jinchuan, LIN Lamei, LI Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(05): 322–331.
- 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.
- 朱世发, 朱筱敏, 刘英辉, 等. 准噶尔盆地西北缘北东段下二叠统风城组白云质岩岩石学和岩石地球化学特征[J]. *地质论评*, 2014, 60(05): 1113–1122.
- ZHU Shifa, ZHU Xiaomin, LIU Yinghui, et al. Petrological and Geochemical Features of Dolomitic Rocks in the Lower Permian Fengcheng Formation in Wuerhe-Xiazijie Area, Junggar Basin[J]. *Geological Review*, 2014, 60(05): 1113–1122.
- 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(01): 14–26.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of non-marine shale oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(01): 14–26.
- Deng Y. Characteristics and Controlling Factors of Shale Oil Reservoir Spaces in the Bohai Bay Basin[J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 2020, 94(2): 253–268.
- Li W, Cao J, Zhi D, et al. Controls on shale oil accumulation in alkaline lacustrine settings: Late Paleozoic Fengcheng Formation, northwestern Junggar Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 129: 105107.
- Mount J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments[J]. *Geology*, 1984, 12(7).
- Tang Y, Cao J, He W, et al. Discovery of shale oil in alkaline lacustrine basins: The Late Paleozoic Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(5): 1281–1293.
- Xiao D, Cao J, Tan X, et al. Marine carbonate reservoirs formed in evaporite sequences in sedimentary basins: A review and new model of epeiric basin-scale moldic reservoirs[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 223: 103860.