

引用格式:王振林,刘国平,刘财广,等.玛湖凹陷二叠系混积型页岩储集空间系统发育特征及影响因素[J].油气藏评价与开发,XXXX,XX(X):1-14.

WANG Zhenlin, LIU Guoping, LIU Caiguang, et al. Development characteristics and controlling factors of the reservoir space system in Permian mixed shale of the Mahu Sag[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, XXXX, XX(X): 1-14.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.

玛湖凹陷二叠系混积型页岩储集空间系统发育特征及影响因素

王振林^{1,2}, 刘国平³, 刘财广¹, 于江龙¹, 鲁健康², 曹嵩², 张星³, 李雅荷³, 王相琴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. 中国石油大学(北京), 北京, 102249; 3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京, 100083; 4. 兰州大学, 甘肃, 兰州, 730000)

摘要:陆相混积型页岩储层孔缝结构复杂、非均质性强,是制约页岩油“甜点”段优选与高效开发的关键地质因素之一。为明确混积型页岩储集空间类型、孔缝系统结构及其主控因素,本文以准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组混积型页岩为研究对象,综合岩心观察、薄片分析、显微表征以及氮气吸附和高压压汞等实验测试手段,开展储集空间系统的综合表征与控制因素分析。研究表明,风城组混积型页岩储集空间以无机孔、有机质孔与微裂缝系统三类为主,无机孔包括粒间孔、粒内溶蚀孔与晶间孔,其中粒间孔占优势,主要发育于长英质矿物颗粒间;微裂缝以层理缝与构造微裂缝为主,开度以 10 - 30 μm 为主,对孔隙-微裂缝连通性与渗流能力贡献显著。全孔径联合表征显示孔径分布呈明显双峰特征(<100 nm 与 >2000 nm),总孔体积平均约 0.0085 cm^3/g ,不同岩相储集性整体表现为长英质页岩优于混合质页岩、粘土质页岩。矿物组分与纹层结构对孔-缝系统具有协同控制,主要通过溶蚀增孔、胶结减孔和脆性促裂机制影响储集空间演化:石英与斜长石溶蚀形成次生孔隙,粘土矿物晶间孔贡献微孔体积,而碳酸盐矿物胶结作用会降低孔喉连通性但在构造应力作用下有利于裂缝形成。长英质-混合质互层组合利于层理缝发育,粘土质纹层中有机-无机复合体可促进孔隙网络连通。综合结果表明,孔-缝耦合是决定混积型页岩有效性及差异性的重要机制,并为混积型页岩油储层评价体系构建与甜点段优选提供重要依据。

关键词:储集空间;发育特征;主控因素;混积型页岩;风城组;玛湖凹陷

中图分类号: 文献标识码:A

Development characteristics and controlling factors of the reservoir space system in Permian mixed shale of the Mahu Sag

WANG Zhenlin^{1,2}, LIU Guoping³, LIU Caiguang¹, YU Jianglong¹, LU Jiankang², CAO Song², ZHANG Xing³, LI Yahe³, WANG Xiangqin⁴

(1. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang, 834000, China; 2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 3. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China; 4. Lanzhou University, Lanzhou, Gansu, 730000)

Abstract: Continental mixed shale reservoirs commonly exhibit complex pore - fracture architectures and strong heterogeneity, which are key geological factors restricting sweet-spot prediction and efficient shale-oil development. To clarify reservoir-space types, pore - fracture system architecture, and their main controlling factors in mixed shale, this study focuses on the Permian Fengcheng Formation in the Mahu Sag, Junggar Basin, and integrates core observation, thin-section analysis, microscopic characterization, low-temperature N_2 adsorption, and high-pressure mercury intrusion to conduct a comprehensive characterization of the reservoir space system and an analysis of its controlling factors. Results show that the reservoir space system is dominated by inorganic pores, organic matter pores, and microfractures. Inorganic pores include intergranular pores, intragranular dissolution pores, and intercrystalline pores, among which intergranular pores are dominant and mainly occur between felsic mineral grains. Microfractures are primarily bedding-parallel fractures and tectonic microfractures, with

收稿日期:XXXX-XX-XX;修回日期:XXXX-XX-XX;录用日期:XXXX-XX-XX。

第一作者简介:王振林(1983-),男,博士研究生,高级工程师,主要从事非常规储层评价方面的研究。地址:克拉玛依市克拉玛依区准噶尔路29号,邮政编码:834000。E-mail: wzhenl@petrochina.com.cn

通信作者简介:刘国平(1989-),男,博士,副教授,主要从事非常规储层天然裂缝形成机理及表征预测、储层质量评价方面的研究。地址:北京市海淀区学院路29号,邮政编码:100083。E-mail: guoping.liu@cugb.edu.cn

基金项目:国家重大科技专项计划“混积型深层页岩油甜点评价与地质力学精细建模技术集成示范”(2025ZD1405001);中央高校基本科研业务费专项资金“陆相页岩多尺度天然裂缝发育模式及其对储层的影响”(2-9-2024-050);国家自然科学基金“陆相页岩有机质热演化对层理缝发育的控制机理研究”(No.42302148)。

apertures predominantly in the 10 – 30 μm range, and they contribute significantly to pore – microfracture connectivity and seepage capacity. Full-scale pore characterization indicates a distinct bimodal pore size distribution (<100 nm and >2000 nm), and an average total pore volume of about 0.0085 cm^3/g . Reservoir quality varies systematically among lithofacies, generally following the order: felsic shale > mixed shale > clay-rich shale. Mineral composition and lamination collectively exert strong controls on the pore – fracture system, mainly through pore enhancement by dissolution, pore reduction by cementation, and fracture promotion by brittleness: dissolution of quartz and plagioclase generates secondary pores; intercrystalline pores associated with clay minerals contribute substantially to micropore volume; whereas carbonate cementation reduces pore-throat connectivity but may facilitate fracture development under tectonic stress. Interbedded felsic – mixed laminae promote the development of bedding-parallel fractures, and organo – inorganic complexes within clay-rich laminae enhance pore-network connectivity. Overall, pore – fracture coupling is a key mechanism governing reservoir effectiveness and heterogeneity, and provides an important basis for constructing reservoir evaluation schemes and optimizing sweet-spot intervals in continental mixed shale oil systems.

Keywords: reservoir space; development characteristics; controlling factors; mixed shale; Fengcheng Formation; Mahu Sag

随着非常规资源逐渐成为全球能源结构的重要组成部分,陆相页岩油已成为获取原油和天然气产量的重要领域^[1-3]。陆相页岩地层通常具有混积型沉积特点,主要表现为岩性和矿物组成复杂、沉积相变化快、储层非均质性强等,并且由于以细粒沉积为主,储层物性相对较差^[4-5]。已有研究表明,在成岩演化及构造运动作用下,页岩储层储集空间发育多种孔隙和裂缝类型^[6],天然裂缝及微观孔隙共同构成的孔隙-裂缝系统为油气提供了储存空间和运移通道^[7-9]。因此,针对岩性与矿物组成复杂、纹层组合变化快且非均质性强的陆相页岩,孔隙-裂缝系统的类型组合、结构连通性及其主控因素是控制优质储层发育和甜点段评价的关键因素。

已有成果对于砂岩、碳酸盐岩等常规岩性储层以及陆相和海相页岩、火山岩、变质岩等非常规岩性储层的储集空间开展了系统的研究,基于岩心、薄片、扫描电镜等多种资料的观察分析以及氮气吸附、压汞、核磁以及 CT 等多种试验方法联测,形成了一系列理论成果与研究方法^[10-14]。然而,针对混积型陆相页岩的研究相对不足,其储集空间的典型特征与分布规律依然不明确。现有研究多聚焦于储层中不同成因孔隙空间的识别与表征,而对“孔隙-裂缝”系统的整体认识仍有欠缺。因此,天然裂缝对储集空间结构与连通性的贡献、以及裂缝与孔隙的耦合方式及控制因素,是混积型陆相页岩储层评价中仍需解决的关键科学问题。

陆相页岩受陆源细粒碎屑快速沉积影响,沉积物堆积紧密,原生孔隙度低且连通性差;纹层常呈横向不连续或组合变化快,导致矿物组分与结构非均质性显著^[15-16]。由于陆相盆地常经历多期构造运动,岩石常发育受区域应力场控制的高角度构造裂缝,但受控于较低含量的脆性矿物,陆相页岩普遍脆性较低,天然裂缝发育程度弱^[17-20]。以准噶尔盆地玛湖凹陷为代表,其发育了一套基于陆源物质的滨浅湖相沉积,具有陆相页岩储层的典型特征,微观非均质性强,孔隙类型多样,孔隙连通关系比海相页岩更加复杂,开发潜力巨大,具有很高的勘

探研究价值^[21-24]。在此背景下,混积型陆相页岩孔-缝系统的类型划分与结构表征框架仍有待完善,孔隙与裂缝耦合连通特征尚不清晰,矿物组分与纹层结构等因素对孔-缝系统发育的控制作用也有待进一步厘清。这些问题制约了对陆相页岩储集空间系统的精确认识,进而影响混积型页岩油气勘探生产部署与决策。

基于上述认识,本文选取玛湖凹陷风城组混积型陆相页岩为研究对象,重点聚焦混积型页岩储集空间系统类型划分、复杂孔-缝系统表征及主控因素识别等关键问题。本次研究基于岩心、薄片和成像测井资料,对玛湖凹陷陆相混积型页岩的孔-缝系统特征开展系统研究,建立陆相页岩储集空间系统的研究方案,并在此基础上结合氮气吸附与压汞实验,讨论不同影响因素对混积型储集空间孔-缝系统发育的影响。研究成果将完善陆相混积型页岩储层储集空间系统类型的划分,为进一步认识混积型页岩储集空间特征及其影响因素提供借鉴。

1 地质概况

玛湖凹陷位于准噶尔盆地西北缘,构造上属中央坳陷次级单元,呈 NE-SW 向椭圆状展布,面积约 5000 km^2 。其西北缘受克百断裂带与乌夏断裂带控制,西南接中拐凸起,东南邻达巴松凸起,东北与夏盐凸起、英西凹陷相接(黄玉越 等, 2022)。凹陷形成于前石炭纪褶皱基底,历经海西期、印支期、燕山期及喜马拉雅期多期构造运动,发育 NE-SW 向和近 E-W 向断层,形成西陡东缓的不对称箕状结构,地层厚度自西北向东南减薄^[25-26]。

受控于前陆盆地咸化碱湖的沉积环境,玛湖凹陷风城组主要发育扇三角洲-湖泊沉积体系,主体为滨浅湖至半深湖亚相,该套地层厚度变化显著(200–1000 m),最大埋深超过 5000 m,呈现西北厚、东南薄的楔状展布特征(张云钊 等, 2018)。沉积期湖湾咸化作用显著,岩性以白云质粉砂岩、泥质云岩与火山碎屑岩混积为特征,夹硅硼钠石、碳酸钠钙石等碱性矿物,为典型陆相混积型页

岩层系^[27-28]。

本文基于XRD测试结果对风城组样品矿物组成进行统计:长英质矿物含量较高,以钾长石和钠长石为主,含量多在30%以上;碳酸盐矿物以白云石为主,含量约为20%~30%,部分样品含方解石,平均为10%~20%,最

高可达40%;粘土矿物总体含量较低,以伊利石为主,局部可见伊蒙混层,含量低于10%(图2)。结合岩心和薄片特征将风城组样品划分为长英质页岩、混合质页岩、粘土质页岩、云质页岩和灰质页岩等五种岩相类型。

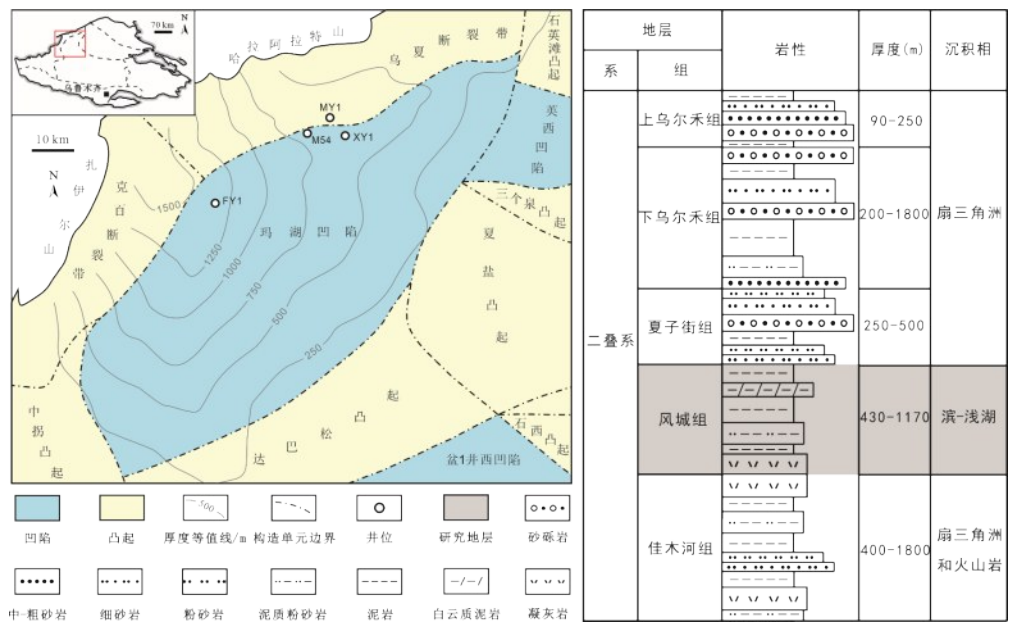


图1 玛湖凹陷构造位置及风城组地层特征
Fig. 1 Structural setting of the Mahu Sag and stratigraphic characteristics of the Fengcheng Formation

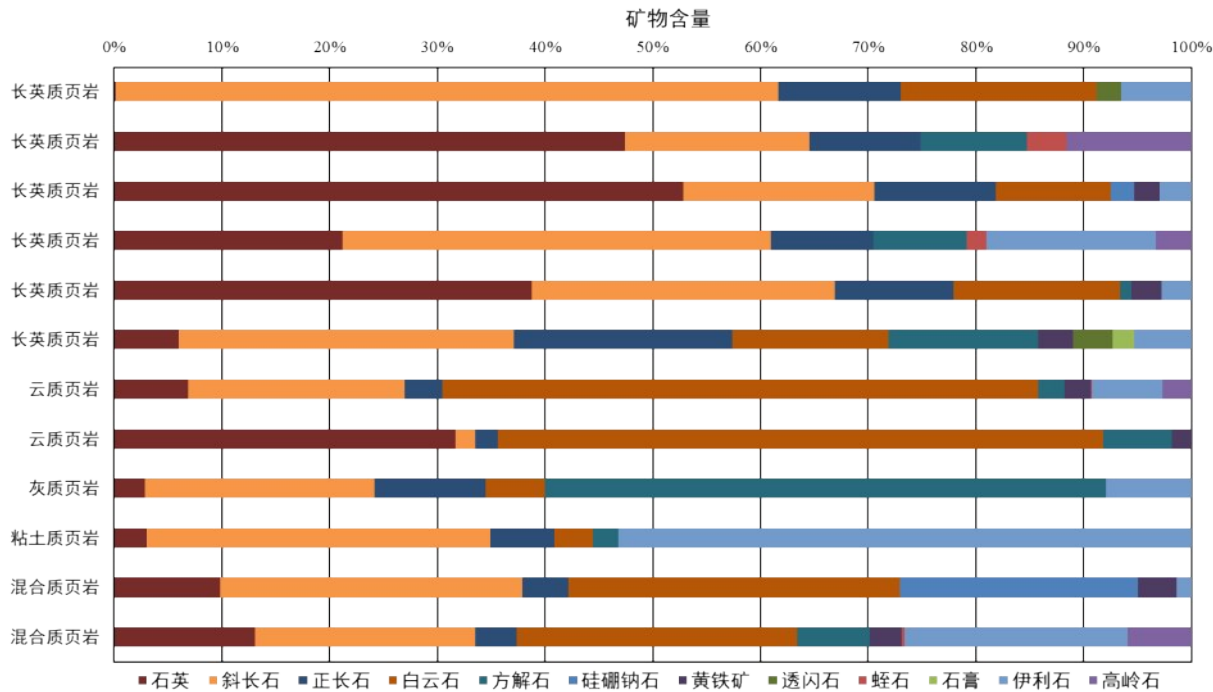


图2 玛湖凹陷风城组矿物含量图
Fig. 2 Mineral content map of Fengcheng formation in Mahu Sag

风城组储集空间以基质溶孔、白云石晶间孔及微裂缝(构造缝、层间缝)为主,孔隙度普遍小于5%,渗透率多

小于0.1 mD,属特低孔-特低渗储层^[29-30]。研究区发育NE-SW向构造裂缝及沿缝分布的孔隙特征,裂缝与孔隙

系统在储集空间组成及流体运移中具有重要意义^[31]。

2 实验样品与方法

本研究中,我们从玛页1井、玛页1H井、玛页2井、玛49井、玛湖54井、夏云1井、风云1井、风南14井、夏203井和夏207井,共10口井的风城组层段收集了30个页岩岩心。所有样品均进行了薄片和场发射扫描电镜观察、X射线衍射(XRD)分析,代表性样品被选取进行了氮气吸附和高压压汞测试。

3 储集空间系统类型及发育特征

3.1 储集空间系统类型

(1) 无机孔

无机孔隙是风城组混积型页岩孔隙体系的重要组成部分,按孔隙赋存位置与成因特征可概括为粒内孔、粒间孔与晶间孔三类。粒内孔隙主要位于无机矿物颗粒内部,根据其形成时期可以被划分为原生孔隙与次生孔隙两大类,其中大多数属于后期矿物(如长石、石英、岩屑等)内部不稳定成分在成岩流体作用下发生溶蚀并伴随交代改造形成的次生孔隙^[32]。通过扫描电镜观察发现,玛湖凹陷风城组储层中的粒内孔主要是由溶蚀作用形成的,在碳酸盐矿物、长石和碳钠镁石等矿物中均普遍发育。长石粒内溶蚀孔形态较为规则,呈蜂窝状、多边形或近圆形,且钠长石中溶蚀孔比钾长石更发育,多为纳米级孔隙(图3a和b)。在成岩过程中,矿物颗粒之间相互支撑形成的孔隙称为粒间孔。这类孔隙在风城组广泛分布,是页岩主要的储集空间。风城组陆相页岩粒间孔形态复杂多样,以三角形、不规则多边形为主,连通性较好,主要发育在钾长石、石英、硅硼钠石等脆性矿物之间,部分粒间孔被有机质、粘土矿物充填(图3c和d),从而降低有效孔隙度并削弱孔喉连通性。整体而言,玛湖凹陷风城组粒间孔较为发育,对页岩油储集与渗流具有重要作用。晶间孔是指在较为完整的矿物颗粒或矿物集合体的内部,由晶体间相互支撑形成的孔隙空间^[33]。玛湖凹陷风城组晶间孔主要发育在黄铁矿和粘土矿物中,整体以微米级孔径为主。黄铁矿多聚集分布,其晶体之间可见明显的晶间孔(图3e),粘土矿物晶间孔主要由粘土矿物脱水作用形成,孔隙形态不规则,常呈束状分布(图3f)。晶间孔多未充填,少部分被有机质矿物充填,其发育可增加有效储集空间并改善局部连通性。

(2) 有机质孔

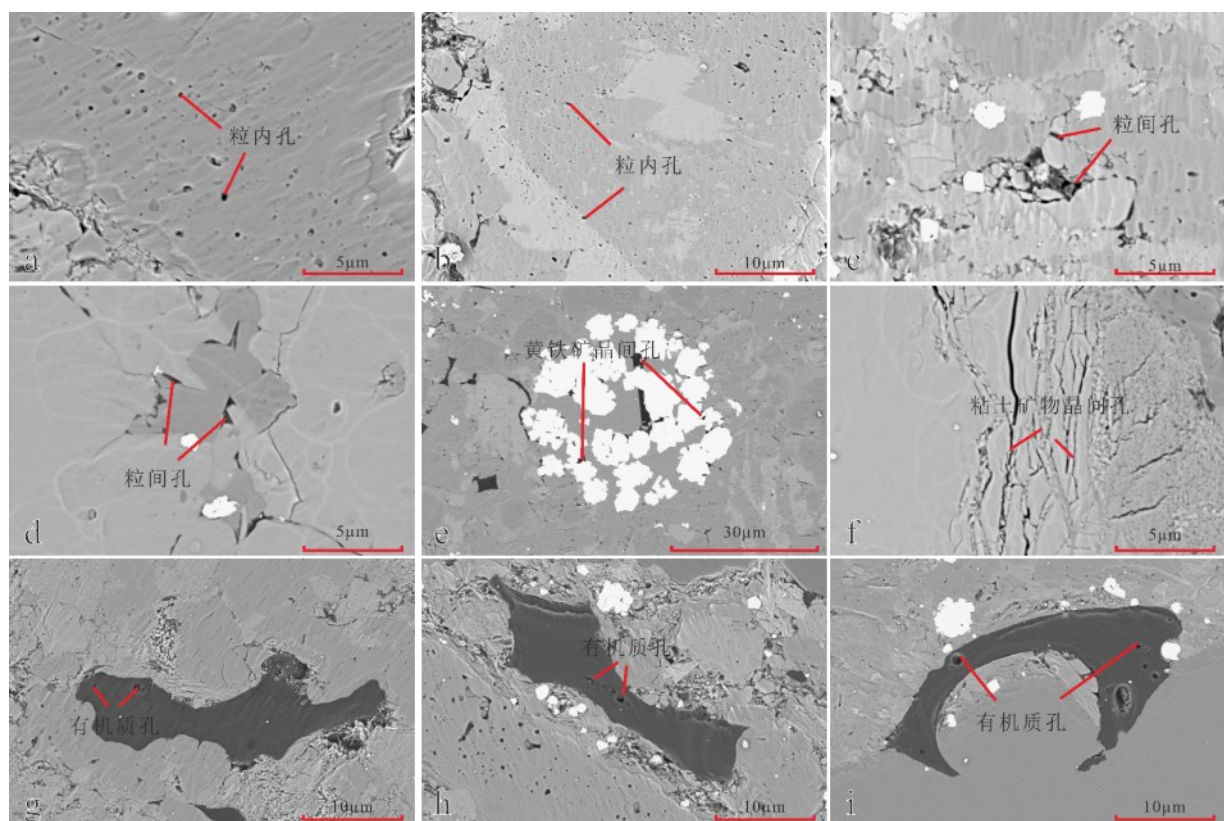
有机质内部发育的孔隙称为有机质孔,通常为与有机质热演化相关的次生孔隙,主要在干酪根热解、生烃-排烃过程中伴随体积收缩与脱水作用形成。扫描电镜观察表明,玛湖凹陷风城组页岩中有机质多呈孤立块状、条带状或层状分布,局部亦可作为裂缝充填物出现;有机质孔在有机质内部呈零散发育,孔形以圆形/近圆形孔和狭缝状孔为主(图3g-i)。其中,圆形与近圆形孔多以孤立孔为主,连通性相对较差;狭缝状孔延伸距离较大,局部可形成较好的孔隙连通。研究区有机质孔孔径主要分布于纳米至微米尺度,整体多为未充填;但其对储层物性贡献受有机质赋存方式与含量控制,相较于无机孔与微裂缝的贡献相对有限。

(3) 微裂缝

裂缝的发育可显著提升页岩油储层的有效渗流能力,是沟通各个储集空间的桥梁和油气运移的重要通道。岩心、薄片及扫描电镜观察表明,玛湖凹陷风城组裂缝在宏观上可见构造裂缝、成岩裂缝等类型^[12,39],在微观尺度下主要表现为层理缝、构造微裂缝及矿物边缘收缩缝(图4)^[34-36]。其中,层理缝沿层理面发育,产状与地层近似平行(图4a),开度较小而延伸长度相对较大。构造微裂缝与局部构造应力作用密切相关,常以高角度切穿矿物并相对层理呈斜交分布;其充填以微晶石英和有机质为主,局部可见粘土矿物和黄铁矿充填或保持未充填状态(图4b、c)。进一步看,受拉张作用形成的构造微裂缝更易被石英、硅硼钠石等脆性矿物充填,而受剪切作用形成的构造微裂缝则主要充填有机质与粘土矿物等。矿物边缘收缩缝多发育于碳钠钙石等矿物颗粒边缘,常被石英、长石、碳酸盐、有机质及粘土等细粒混合矿物充填(图3d);此外,在硅硼钠石内部可见微裂缝与解理缝,开度较小(图4e),碳钠镁石中可见穿粒缝,延伸较长并切穿矿物(图4f)。

综上,玛湖凹陷风城组混积型页岩的储集空间以无机孔为主体,其中粒间孔最为发育并构成主要有效孔隙的基础,粒内溶蚀孔与晶间孔对有效孔体积提供重要补充;有机质孔虽可在局部形成狭缝状连通,但受有机质赋存方式与含量控制,其对整体储层物性贡献相对有限。微裂缝则在不同孔隙类型之间发挥连通作用:层理缝提供沿层面延伸的优势通道,构造微裂缝与粒缘缝等可沟通粒间孔、溶蚀孔与晶间孔并改善局部连通性。

长英质页岩中储集空间以粒间孔、粒内溶蚀孔及层理缝、构造微裂缝为主。石英和长石含量较高,使其既具备较好的残余粒间孔保存条件,又易在构造作用下形成



注:a-粒内孔,风云1井,云质页岩,6017.12m;b-粒内孔,玛湖54井,灰质页岩,5302.54m;c-粒间孔,玛页1井,长英质页岩,4744.00m;d-粒间孔,玛页1井,混合质页岩,4713.3m;e-黄铁矿晶间孔,玛页1井,混合质页岩4713.3m;f-粘土矿物晶间孔,玛湖54井,粘土质页岩,4862.95m;g-有机质孔,风云1井,长英质页岩,5230.14m;h-有机质孔,夏云1井,混合质页岩,5372.89m;i-有机质孔,夏云1井,混合质页岩,5372.89m。

图3 玛湖凹陷风城组储集空间类型

Fig. 3 Reservoir space types of the Fengcheng Formation in the Mahu Sag

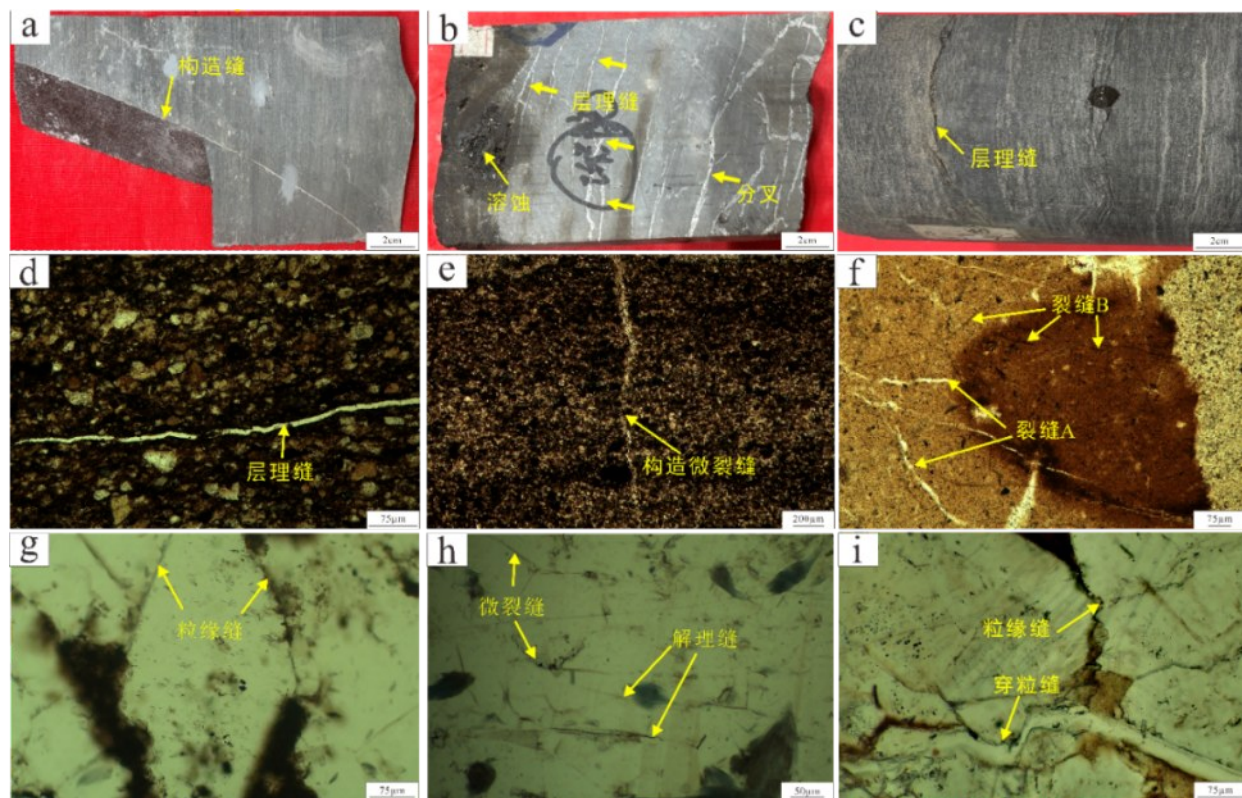
微裂缝,整体储集性最好。混合质页岩中孔—缝系统类型最丰富,粒间孔、粒内孔、黄铁矿和粘土矿物晶间孔以及层理缝、粒缘缝、构造微裂缝均较发育,反映出多组分矿物共同控制下的复杂储集空间特征。其孔隙结构和连通方式最复杂,是研究区内较有利的储层类型之一。粘土质页岩中以粘土矿物晶间孔为主,局部见粒内孔和少量粒间孔,但粒间孔常被粘土或有机质充填,有效性相对较差。该类岩相微孔发育、连通性有限,储集空间以纳米级孔隙为主。云质页岩中储集空间以白云石相关粒内溶蚀孔和晶间孔为主,局部可见解理缝或微裂缝。受白云石晶体发育和溶蚀作用影响,孔隙类型相对单一,整体储集性中等偏弱。灰质页岩中方解石相关粒内溶蚀孔、解理缝及粒缘缝较常见,但受碳酸盐胶结作用影响,孔体积和连通性整体较差。其储集空间更多体现为裂缝控制型特征,整体储集性在各岩相中最弱。

3.2 储集空间系统特征

(1) 微观孔隙形态及尺寸

陆相页岩微观孔隙形态多样,常见为圆形、狭缝形及其过渡形态,不同类型孔隙在形态与赋存位置上具有明

显差异。粒间孔为矿物颗粒之间相互支撑形成的孔隙,其形态受颗粒形态及堆积排列方式控制,常呈三角形、狭缝形或不规则多边形,在颗粒支撑作用下具有良好的抗压能力(图3c、3d);粒内溶蚀孔的形成与矿物类型及流体活动密切相关,孔形多为圆形、椭圆形或梭形,主要分布于钠长石、白云石、部分方解石及碱性矿物中(图3a、3b)。晶间孔主要与黄铁矿和粘土矿物有关:黄铁矿晶间孔多呈不规则圆形(图3e),粘土矿物晶间孔多为长条形或狭缝形(图3f)。有机质孔以孤立圆形孔、条带状孔及狭缝状孔为主,其中孤立圆孔多发育于有机质内部,狭缝状孔常位于有机质边缘与无机矿物的接触界面(图3g-i)。孔隙尺寸直接表征储集空间尺度。研究区微观孔隙孔径总体分布于纳米—微米级,不同孔隙类型的尺度范围存在差异:脆性矿物颗粒(如钾长石等)之间残余粒间孔的孔径主要集中在800–2000 nm(图3d);有机质孔多分布于100–1000 nm,局部可达数微米(图3g-i);粘土矿物脱水形成的晶间孔以100–1000 nm为主,常呈片状成簇出现(图3f);钠长石受碱性流体侵蚀形成的粒内溶蚀孔尺度变化较大,孔径主要分布在300–3000 nm(图3a)。



注:a-构造裂缝,夏203井,云质页岩,4804.47m;b-层理缝,夏207井,灰质页岩,4927.61m;c-层理缝,玛页1井,混合质页岩,4628.32m;d-层理缝,玛湖54井,长英质页岩,5134.04m;e-构造微裂缝,玛页1井,长英质页岩,4718.28m;f-构造微裂缝,玛页1井,长英质页岩,4824.60m;g-碳钠钙石中粒缘缝,夏云1井,混合质页岩,5384.09m;h-硅硼钠石中解理缝和微裂缝,玛湖54井,长英质页岩,5302.54m;i-碳钠镁石中粒内缝和穿粒缝,夏云1井,长英质页岩,5097.27m。

图4 玛湖凹陷风城组裂缝类型

Fig. 4 Fracture types of the Fengcheng Formation in the Mahu Sag

(2) 微观孔隙及裂缝有效性

微观孔隙与微裂缝的充填状态及充填程度是反映其有效性的重要依据。玛湖凹陷风城组储层孔隙整体以未充填为主,局部可见有机质、方解石及粘土矿物的全充填或半充填,不同孔隙类型的充填特征存在差异。长石粒内溶蚀孔多未充填;碳钠镁石粒内溶蚀孔部分未充填,部分被方解石半充填或全充填,该现象可能与碱湖咸化阶段的流体活动有关。粘土矿物晶间孔多未充填,局部被有机质充填。粒间孔充填性相对复杂,观察到的粒间孔多被粘土矿物、有机质及细粒混合矿物充填,从而降低有效孔隙度并削弱连通性。靠近有机质边缘的有机质孔易受矿物碎屑充填影响,而位于有机质内部的孤立孔多保持未充填状态。

对风城组微裂缝进行观察统计后,可按充填程度划分为全充填、半充填与未充填三类。薄片统计表明,微裂缝以半充填为主,全充填裂缝占比较低(图5a)。裂缝开度对油气运移与渗流贡献具有重要控制作用:风城组微裂缝开度主要集中于10~30 μm ,约占73%,该类裂缝以层理缝为主,多为半充填,整体有效性相对较好(图5b)。开度<10 μm 的微裂缝约占7.5%,主要包括矿物粒内微裂

缝、矿物边缘收缩缝以及有机质、粘土矿物中的微裂缝,通常未充填,具备连通潜力,但其对渗流的实际贡献仍受开度限制。开度>30 μm 的微裂缝约占19.5%,以构造微裂缝为主,多被石英、方解石等矿物充填,整体有效性相对较差。

4 储集空间定量表征

4.1 高压压汞表征孔径分布特征

不同岩相差异控制孔径结构与孔—缝特征,岩相孔隙结构差异在储层物性上具有明显响应。长英质页岩孔隙度和渗透率最高,表明其在较高长英质矿物含量条件下,残余粒间孔保存较好,且微裂缝对孔喉连通具有积极贡献,因此整体储渗能力最好。其次为混合质页岩,其孔隙度和渗透率高于粘土质页岩,说明其虽矿物组成复杂,但多类型孔—缝组合使储集空间类型更丰富,整体连通性优于粘土质页岩。粘土质页岩孔隙度和渗透率较低,反映其储集空间以粘土矿物晶间孔等微孔为主,孔径较小且粒间孔常被充填,渗流能力相对较弱。云质页岩与灰质页岩孔隙度和渗透率均较低,表明碳酸盐矿物胶结

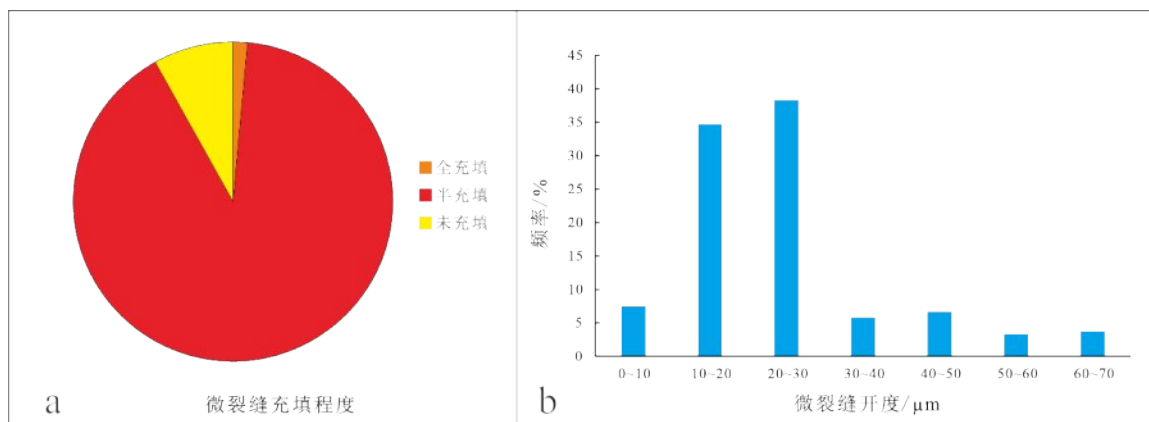


图5 微裂缝充填程度及开度分布范围

Fig. 5 Microfracture filling degree and aperture distribution

作用较强,孔喉连通性整体较差。

风城组陆相页岩不同岩相的汞饱和度曲线形态存在差异:长英质、粘土质与云质页岩曲线整体呈“平直形”,即在进汞初期随压力升高汞饱和度增长不明显,当压力超过门槛压力后汞饱和度才开始上升,并出现相对明显

的平台段,指示孔喉分布相对集中;混合质与灰质页岩曲线多呈“斜直线”,即在超过门槛压力后汞饱和度随压力快速增加,随后趋于平缓并在高压段仍有小幅变化,反映孔喉尺度分布更为分散,常对应多峰型孔径分布特征(图6)。

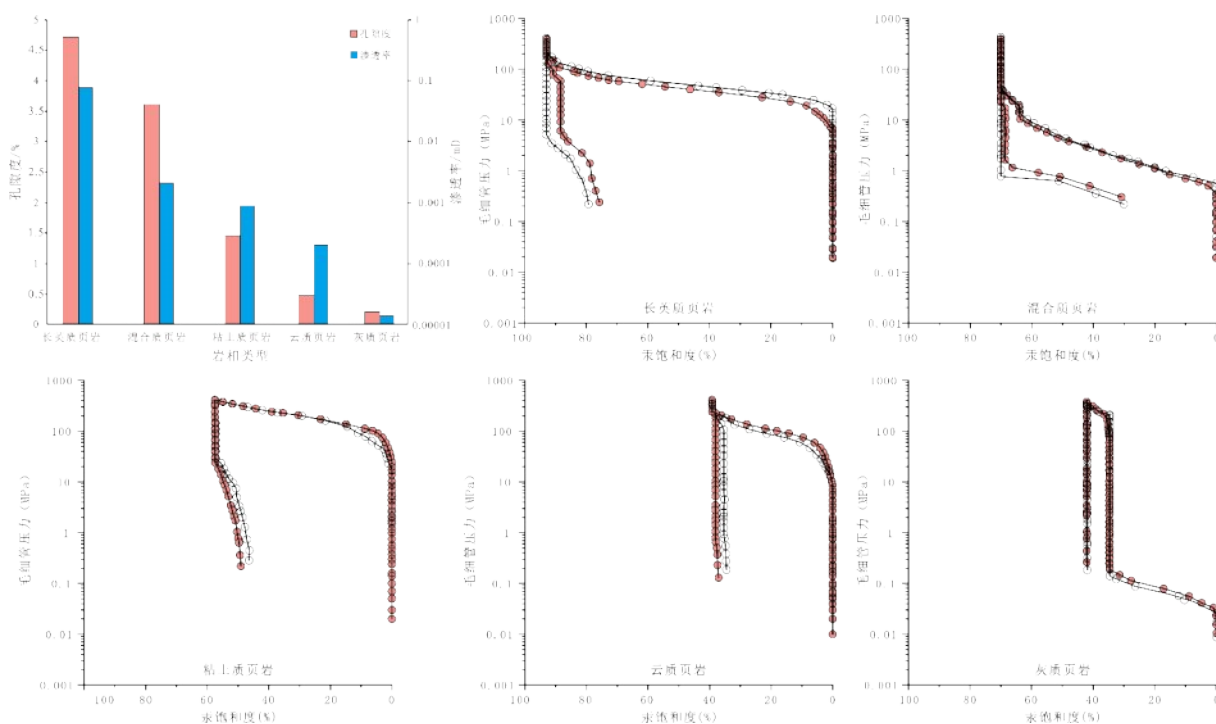


图6 玛湖凹陷风城组混积型页岩毛细管压力曲线

Fig. 6 Capillary pressure curves of mixed shale in the Fengcheng Formation, Mahu Sag

风城组混积型页岩最大进汞饱和度为 39.20% - 92.97%,平均为 60.36%。不同岩相的排驱压力差异显著:粘土质页岩为 103.54 MPa,混合质页岩为 81.36 MPa,长英质页岩为 23.20 MPa,碱矿层为 0.64 MPa,云质页岩为 0.19 MPa,灰质页岩为 0.03 MPa,平均排驱压力为 34.83 MPa。样品平均中值孔喉半径为 0.004 μm ,指示孔喉整体偏细;退汞效率为 0% - 57.13%,平均仅

14.43%,表明孔喉连通性较差、汞滞留效应显著。鉴于压汞对纳米孔识别存在局限,纳米尺度孔隙占主导的判断将结合氮气吸附与全孔径联合表征结果综合约束。

4.2 氮气吸附表征孔径分布特征

根据IUPAC的分类标准,介孔回滞环被划分为四种类型。玛湖凹陷风城组页岩油储层的吸附曲线主要为Ⅲ

型,随着相对压力升高,吸附量先缓慢增加;当相对压力达到0.4时,吸附速率显著加快,同时吸附曲线与脱附曲线发生分离,形成了明显的回滞环;当相对压力接近0.8时,吸附曲线呈指数变化上升;相对压力达到1.0时,吸附曲线未显示出吸附平台,说明样品存在部分大孔以及微裂缝,孔隙结构非均质性较强,且孔隙类型多样。

不同岩性的吸附量与滞后环形态差异显著:长英质页岩最大吸附量可达 $8.5\text{ cm}^3/\text{g}$,滞后环以H3型为主的叠合形态,孔隙类型以粒内溶蚀孔与粒间孔为主;粘土质页岩

岩最大吸附量可达 $13.5\text{ cm}^3/\text{g}$,滞后环以H2型为主,孔隙类型主要为粘土矿物相关孔隙;混合质页岩最大吸附量为 $10.1\text{ cm}^3/\text{g}$,滞后环表现为H2型与H3型叠合特征;云质页岩最大吸附量为 $5.9\text{ cm}^3/\text{g}$,滞后环以H3型为主,孔隙类型主要为晶间孔与粒内溶蚀孔,局部发育解理缝;灰质页岩最大吸附量为 $1.5\text{ cm}^3/\text{g}$,滞后环以H3型为主,孔隙类型以粒缘缝与粒内溶蚀孔为主,局部发育解理缝(图7)。

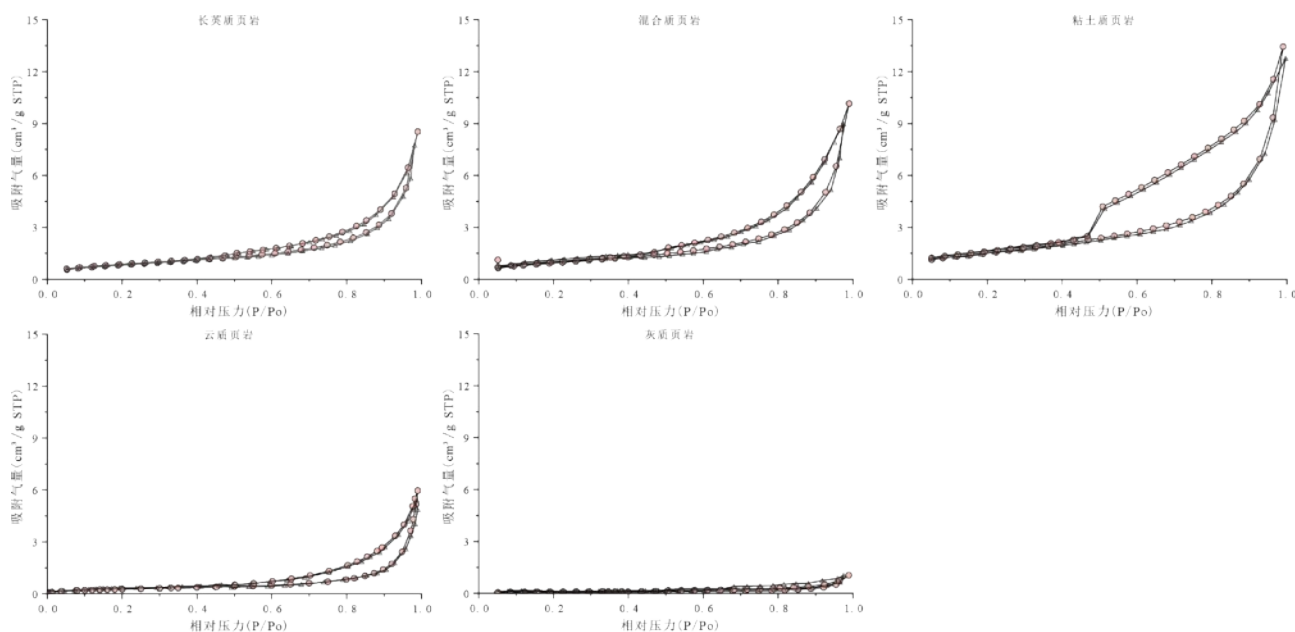


图7 玛湖凹陷风城组混积型页岩低温氮气吸附—脱附曲线

Fig. 7 Low-temperature N_2 adsorption - desorption isotherms of mixed shale in the Fengcheng Formation, Mahu Sag

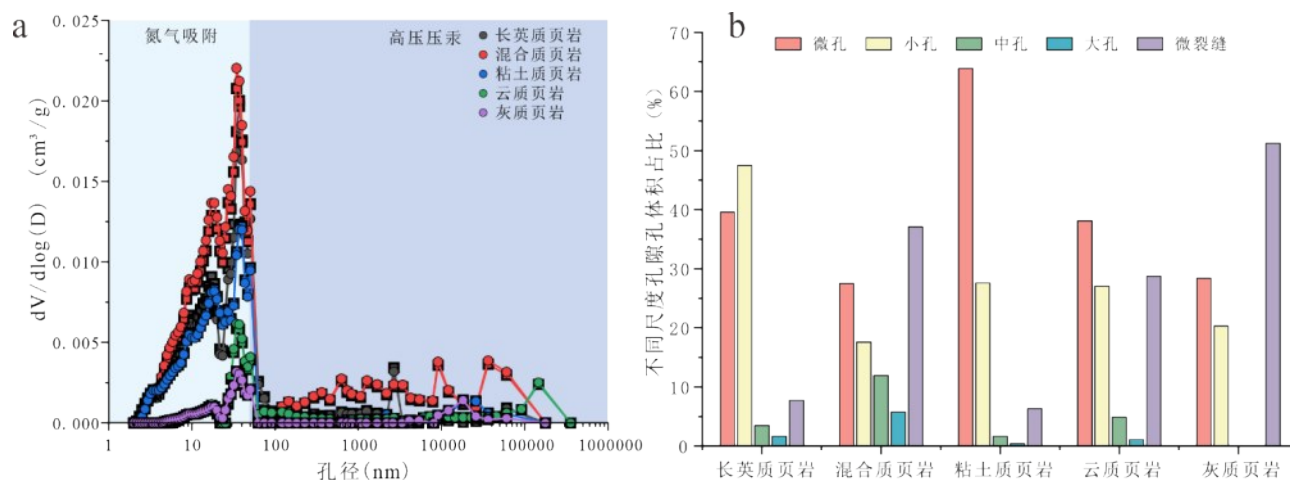
4.3 全孔径分布联合表征

混积型页岩储层孔隙-裂缝系统孔径分布具有多尺度性,孔径从纳米尺度到微米尺度都有分布。而目前进行孔隙结构表征的不同实验对页岩孔隙测试范围都具有一定的限制,单一实验方法难以实现全尺度孔隙结构的完整表征。因此本文联合高压压汞和氮气吸附的方法,对玛湖凹陷风城组混积型页岩储层孔-缝系统进行全孔径表征。结果表明,风城组孔隙分布相对集中,孔径主要分布在 $<100\text{ nm}$ 和 $>2000\text{ nm}$ 两个范围内,指示储集空间主要以微孔、小孔和微裂缝为主。其中, $<100\text{ nm}$ 的峰值段主要对应粘土矿物晶间孔、有机质孔及部分粒间孔等纳米级孔隙单元;而 $>2000\text{ nm}$ 的峰值段更可能反映微裂缝(如层理缝、构造微裂缝)及较大尺度溶蚀孔,从而体现孔-缝系统的全尺度特征。

不同岩相在全孔径分布曲线上的峰型特征存在明显差异。混合质页岩因长英质矿物、碳酸盐矿物和粘土矿物共同发育,孔隙来源和裂缝类型更为复杂,常表现出多

峰叠加特征;长英质页岩以 $<100\text{ nm}$ 和小-中孔段贡献较稳定,粘土质页岩以 $<100\text{ nm}$ 峰占优,云质和灰质页岩则整体峰型响应相对较弱,但裂缝相关峰段相对突出。上述差异表明,不同岩相的孔径结构受矿物组合和孔-缝系统共同控制,并进一步影响储层储集能力与连通性。对孔径分布曲线积分计算得到孔体积分布特征,玛湖凹陷风城组页岩总孔体积分布在 $0.0028\text{ cm}^3/\text{g}$ ~ $0.0125\text{ cm}^3/\text{g}$ 之间,平均值为 $0.0085\text{ cm}^3/\text{g}$ (图8)。

不同岩相储层中孔隙体积和不同尺度孔隙占比存在较大差异(图8b),反映出不同岩相在储集空间发育方式和孔-缝组合特征上的明显分异。长英质页岩孔体积最高,为 $0.0125\text{ cm}^3/\text{g}$,储集空间体积主要以微孔、小孔贡献,其占比分别为39.6%和47.5%,孔喉结构相对均衡;混合质页岩总孔体积为 $0.0118\text{ cm}^3/\text{g}$,微孔和微裂缝占比分别为27.53%和37.11%,且中孔和大孔的比例相对更高,体现出多尺度孔隙与裂缝共同发育的特征;粘土质页岩总孔体积为 $0.0116\text{ cm}^3/\text{g}$,微孔占比为63.9%,以纳米级孔隙体系为主,连通性相对受限;云质页岩总孔体积为



注:a.全孔径孔径分布曲线;b.不同岩相不同尺度孔隙孔体积占比

图8 玛湖凹陷风城组混积型页岩全孔径分布及孔体积组成特征

Fig. 8 Full-pore-size distribution and pore-volume composition characteristics of mixed shale in the Fengcheng Formation, Mahu Sag

0.0056 cm³/g,微孔和微裂缝分别占38.11%和28.76%,整体储集性中等偏弱;灰质页岩总孔体积为0.0014 cm³/g,微裂缝占比为51.26%,基质孔隙不发育,储集能力最弱。综合总孔体积及孔隙类型占比,不同岩性储集性依次为长英质页岩>混合质页岩>粘土质页岩>云质页岩>灰质页岩。

5 储集空间系统影响因素

5.1 岩相及矿物组分对储集空间系统发育的影响

矿物组分是混积型页岩储层储集空间发育的物质基础,岩相类型是矿物组分及其组合特征的综合反映。不同岩相中硅质、碳酸盐和粘土矿物含量差异,决定了岩石力学性质、成岩反应方式及孔—缝系统发育特征。长英质页岩以石英和长石为主,云质页岩以白云石为主,灰质页岩以方解石为主,粘土质页岩以伊利石等粘土矿物为主,混合质页岩则表现为多组分矿物共存。不同岩相中孔—缝系统发育差异,本质上是矿物组分差异对储集空间系统影响的宏观体现。本次研究通过不同类型矿物含量与不同尺度孔隙孔体积占比之间的相关性热度图,分析矿物组分对孔—缝系统发育的控制作用(图9)。

(1) 硅质矿物

玛湖凹陷风城组中硅质矿物主要以石英和长石为主,其中石英平均含量为21%,长石矿物以斜长石和钾长石为主,其中斜长石平均含量为29.09%,钾长石平均含量为6.93%。图9表明,石英含量与孔隙度呈正相关且与中孔和大孔孔体积占比呈较强正相关关系,指示石英含量更有利于较大孔喉的形成与保存。这可能与石英作为脆性矿物在压实过程中具有较强抗压能力有关,同时在玛湖凹陷碱性成岩流体条件下,长英质矿物的溶蚀作用

可形成次生孔隙,从而在长英质页岩中表现为残余粒间孔与溶蚀孔相对发育。

长石矿物中斜长石与孔隙度整体呈弱正相关,而钾长石与孔隙度呈强负相关关系。进一步分析显示,斜长石含量与小孔孔体积占比呈强正相关关系,说明斜长石是小孔发育的重要贡献者,这主要是因为其在碱性成岩环境中易发生溶蚀并形成大量的粒内溶蚀孔隙。已有模拟实验验证了斜长石在PH=8的碱性流体中溶解速度是在PH=6的酸性流体下的3~5倍^[38-39]。相比之下,钾长石在成岩过程中易发生蚀变并转化为粘土矿物,进而对原生孔隙进行填充使得孔隙体积遭到破坏,因此表现出钾长石含量与中孔及大孔孔体积占比呈现出较强的负相关关系。综合来看,石英和斜长石整体对混积型页岩储层储集空间起建设作用,虽然钾长石对储层起破坏作用,但是玛湖凹陷风城组钾长石矿物含量整体较低,限制了其对储层的破坏作用,因此硅质矿物总体上有利于混积型页岩储集空间的形成与保存。

(2) 碳酸盐矿物

玛湖凹陷风城组碳酸盐矿物较为发育,主要包括白云石和方解石,其中白云石含量较高,平均含量为21.63%,方解石平均含量为11.51%。图9显示方解石含量和白云石含量均与孔隙度呈负相关,即在玛湖凹陷风城组混积型页岩储层中,碳酸盐矿物对储层空间类型整体起破坏作用。进一步分析表明,方解石含量与微孔、小孔、中孔及大孔孔体积均呈负相关,而与微裂缝体积占比呈现出较强的正相关;白云石含量与微孔和小孔体积占比呈负相关,与中孔与微裂缝体积占比呈弱正相关。

在玛湖凹陷风城组中不同岩相页岩中均含碳酸盐矿物,其对储集空间的改造受溶蚀与胶结作用的共同控制。早期成岩过程中,有机质热演化产生的酸性流体可促使

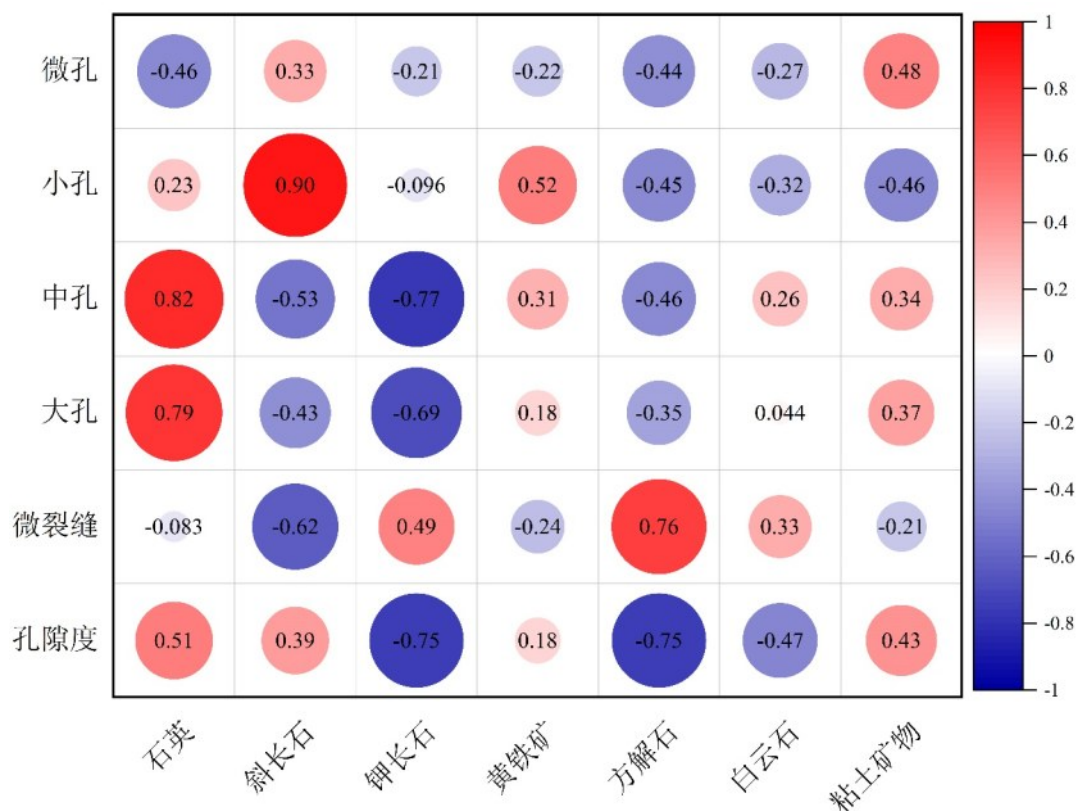


图9 玛湖凹陷风城组混积型页岩矿物组分与孔隙体积参数相关性热度图

Fig. 9 Correlation heatmap between mineral composition and pore-volume parameters of mixed shale reservoirs in the Fengcheng Formation, Mahu Sag

白云石与方解石发生溶蚀,从而形成粒内溶蚀孔并贡献一定的次生孔隙;而在后期成岩阶段,碳酸盐矿物的再沉淀与胶结作用会对原生粒间孔以及中期形成的溶蚀孔产生充填与封堵,导致孔体积降低并削弱孔喉连通性。与此同时,碳酸盐矿物脆性相对较高,在构造应力作用下更易发生破裂形成微裂缝,从而在一定程度上提升局部渗流通道与孔缝连通。总体而言,碳酸盐矿物对储集空间的影响表现为以胶结致密化为主、溶蚀增孔与脆性促裂为辅的作用。

(3)粘土矿物

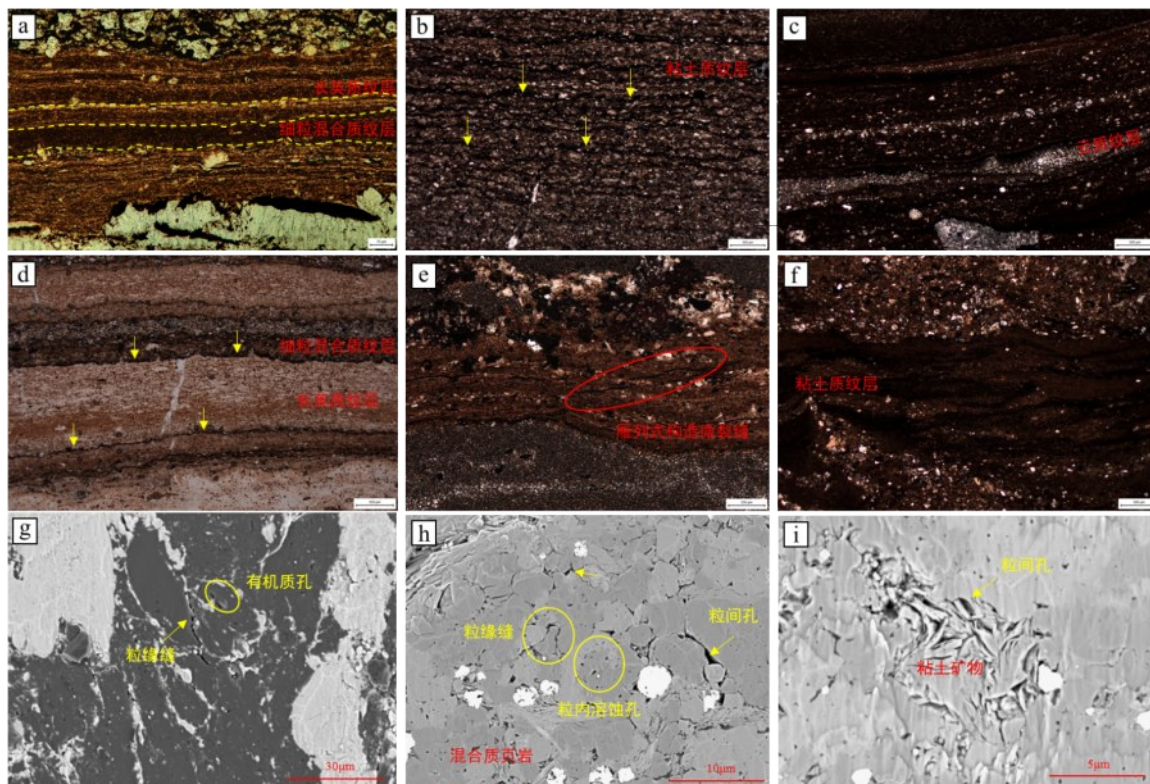
玛湖凹陷风城组页岩中粘土矿物含量整体较低,以伊利石为主,伴生少量高岭石,其中伊利石平均含量为9.0%,高岭石平均含量为5.89%。图9显示粘土矿物含量与总孔隙度具有正相关关系,粘土矿物含量与微孔、中孔、大孔和微裂缝占比均呈现出正相关关系,而与小孔体积呈负相关关系。扫描电镜观察显示,伊利石多呈片状或纤维形态,其晶面堆叠可形成稳定的纳米级晶间孔网络^[40],该类孔隙孔径较小,多集中于50nm以下,因此在玛湖凹陷风城组混积型页岩中,粘土矿物是微孔体积的重要贡献者。在粘土质页岩中,微孔孔体积占比最高(>60%),尽管粘土矿物孔径较小,但通常呈集群分布,大量的粘土矿物晶间孔发育能够显著增加有效孔隙体

积。在粘土质页岩中通常能见到有机质和粘土矿物混合共生,形成有机质-粘土复合体。该复合体内孔隙非常发育,在有机-无机协同作用下,有机孔和粘土矿物晶间孔多发生连通,对孔隙大小进行扩展,从而提高孔隙网络连续性并改善局部连通性。

5.2 纹层结构对储集空间系统发育的影响

玛湖凹陷风城组整体纹层非常发育,通过薄片观察和扫描电镜分析,玛湖凹陷纹层类型按照其组分组成可以分为长英质纹层、粘土质纹层、碳酸盐纹层、细粒混合质纹层和碱矿纹层五类。在纹层状页岩段,层理缝广泛发育,主要发育在纹层界面附近。层理缝开度多小于0.01mm,延伸长度相对较长,通常大于4mm。层理缝以未充填或半充填为主,整体连通性较好;局部可见方解石或有机质-黄铁矿-粘土混合充填,但充填物内部常伴生微孔发育,使层理缝-孔隙共同构成孔-缝系统(图10)。

不同纹层类型及其组合方式控制孔-缝系统的发育特征,导致储层孔-缝结构在不同纹层中表现出显著差异。长英质纹层为风城组最常见纹层类型,长石与石英含量通常>50%,多与细粒混合质纹层互层发育;其内部黄铁矿较常见,局部可见构造微裂缝发育,而纹层边界处



注: a:玛湖 54 井,4862.95m,长英质纹层与混合质纹层互层; b:玛页 1 井,4778.2m,粘土质纹层; c:风云 1 井,6017.12m,云质纹层; d:玛页 1 井,4852.59m,长英质纹层与混合质纹层互层; e:玛页 2 井,4430.01m,长英质纹层; f:玛页 1H 井,4565.92m,粘土质纹层; g:风云 1 井,5230.14m,有机质中发育粒缘缝和有机质孔; h:玛页 1 井,4713.3m,混合质页岩中粒缘缝、粒间孔十分发育,粒内溶蚀孔较发育; i:玛页 1 井,4744m,粘土矿物中晶间孔与粒间孔发育。

图 10 风城组纹层类型及孔-缝特征

Fig. 10 Laminae types and pore - fracture characteristics of the Fengcheng Formation

层理缝相对更为集中。细粒混合质纹层中长石、石英、白云石和方解石等矿物含量均小于 50%,矿物颗粒小且排列紧密,孔隙类型以粒间孔为主并伴生构造微裂缝。碳酸盐纹层中白云石和方解石含量大于 50%,碳酸盐矿物相对较高的脆性使其在压实作用下更有利于残余粒间孔的保存,扫描电镜观察显示,碳酸盐纹层中构造微裂缝十分发育,主要以粒缘缝为主。粘土质纹层中粘土矿物含量大于 50%,以伊利石为主,常与有机质和黄铁矿伴生;孔隙类型以粒间孔和晶间孔为主,同时有机质内部可见有机质孔,并在有机质—无机矿物边界处发育粒缘缝等微裂缝。碱矿纹层主要以碳钠钙石和碳钠镁石伴生纹层为主,该纹层主要发育在长英质基底中。

玛湖凹陷风城组地层有机质整体含量偏低,但在长英质页岩、粘土质页岩与混合质页岩中仍可见其赋存。显微观察表明,有机质多呈孤立块状、薄层状分布,局部以裂缝充填物形式出现。孤立块状有机质内部常发育条带状有机质孔及微裂缝,可在一定程度上增加有效储集空间并改善局部连通性。在纹层发育段,有机质主要以有机质纹层或裂缝充填物形式出现;有机质纹层常与薄层长英质纹层或混合质纹层互层,形成明暗相间的纹层

组合。由于相邻纹层之间力学性质差异显著,该类纹层组合的界面更易产生应力集中,从而促进层理缝的形成与发育。对于有机质充填裂缝,充填后的有机质在脱水收缩过程中可能在充填体—围岩界面形成收缩裂缝,从而对储层孔-缝系统具有积极贡献。

风城组混积型页岩孔-缝系统受矿物组分和纹层结构共同控制。长英质矿物有利于残余粒间孔保存和溶蚀孔形成,碳酸盐矿物既可因胶结作用降低孔喉连通性,也可因较高脆性促进微裂缝形成,粘土质纹层中的有机—无机复合体则有助于局部孔隙连通。纹层组合进一步控制裂缝发育部位和连通方式,其中长英质—混合质互层界面更易形成层理缝,并与粒间孔、溶蚀孔共同构成有效孔-缝系统。

基于上述认识,玛湖凹陷风城组页岩甜点段优选应突出岩相组合、孔径结构和裂缝有效性的综合评价。平面上可优先关注长英质页岩与混合质页岩连续发育、且裂缝较发育的区带;纵向上应重点优选总孔体积较高、全孔径双峰结构明显、层理缝与构造微裂缝较发育且以未充填或半充填为主的层段;层内则应关注长英质纹层—混合质纹层互层及纹层界面密集发育区段。该类层段

更易形成“有效孔隙基础—微裂缝连通通道”协同配置,可作为风城组混积型页岩油甜点段识别与分层部署的重点目标。

6 结论

1、风城组混积型页岩储集空间系统具有典型孔-缝系统,其中,无机孔构成主要储集基础,粒间孔为优势孔隙类型,粒内溶蚀孔和晶间孔对有效孔体积具有补充作用;有机质孔发育相对有限,其贡献主要受有机质赋存状态和含量控制;层理缝和构造微裂缝是改善储层连通性的关键裂缝类型,开度主要集中在 10 - 30 μm ,对孔隙连通与渗流能力提升具有重要作用。

2、全孔径联合表征揭示了风城组混积型页岩孔径结构的非均质性。孔径分布整体具有<100 nm 和>2000 nm 双峰特征,分别反映纳米级孔隙储集空间和微裂缝的贡献。不同岩相孔体积和孔径组合差异明显,储集性整体表现为长英质页岩>混合质页岩>粘土质页岩>云质页岩>灰质页岩。其中,混合质页岩由于长英质矿物、碳酸盐矿物和粘土矿物共同发育,孔径分布更为复杂,常表现出多峰叠加特征,体现出多类型孔隙与微裂缝共同控制的储集空间结构。

3、矿物组分和纹层结构共同控制孔-缝系统的形成与演化。长英质矿物有利于残余粒间孔保存,并可通过溶蚀形成次生孔隙;粘土矿物晶间孔是微孔体积的重要来源,但孔径较小,连通性相对受限;碳酸盐矿物对储集空间具有双重影响,一方面胶结作用会降低孔喉连通性,另一方面其较高脆性有利于构造应力作用下微裂缝形成。

4、纹层组合是影响储集空间非均质性和有效连通性的重要因素。长英质-混合质互层及含有机质细纹层组合界面处易发生应力集中,有利于层理缝形成,并促进溶蚀孔、粒间孔与微裂缝之间的连通。综合孔体积、孔径结构和裂缝有效性,长英质页岩与混合质页岩连续发育、层理缝和构造微裂缝较发育的层段,可作为风城组混积型页岩油甜点段优选的重点目标。

参考文献

- [1] CURTIS John B. Fractured Shale-Gas Systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] GHOSH Sayantan, GALVIS-PORTILLA Henry A, KLOCKOW Colleen M, et al. An application of outcrop analogues to understanding the origin and abundance of natural fractures in the Woodford Shale[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 164: 623-639.
- [3] JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xinping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1471-1484.
- [4] 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(4): 489-505.
- LI Maowen, JIN Zhijun, DONG Mingzhe, et al. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation[J]. Experimental Petroleum Geology, 2020, 42(4): 489-505.
- [5] SI Shanghua, HE Junhao, ZHAO Yutao, et al. Diagenesis of tight sandstone and its influence on reservoir properties: A case study of Fuyu reservoirs in Songliao Basin, China[J]. Unconventional Resources, 2023, 3, 84-92.
- [6] 金之钧,朱如凯,梁新平,等.当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J].石油勘探与开发,2021,48(6): 1276-1287.
- JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xinping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1276-1287.
- [7] GAO Chao, CHEN Yiyi, YIN Jintao, et al. Experimental study on reservoir characteristics and oil-bearing properties of Chang 7 lacustrine oil shale in Yan'an area, China[J]. Open Geosciences, 2022.
- [8] ZHANG Yunzhao, ZENG Lianbo, LUO Qun, et al. Effects of diagenesis on natural fractures in tight oil reservoirs: A case study of the Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Geological Journal, 2020, 55(9): 6562-6579.
- [9] ZHANG Yunzhao, ZENG Lianbo, LUO Qun, et al. Influence of Natural Fractures on Tight Oil Migration and Production: A Case Study of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Journal of Earth Science, 2021, 32(4): 927-945.
- [10] 王濡岳,胡宗全,董立,等.页岩气储层表征评价技术进展与思考[J].石油与天然气地质,2021,42(1): 54-65.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, DONG Li, et al. Advancement and trends of shale gas reservoir characterization and evaluation[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 54-65.
- [11] WANG Junpeng, WANG Hongyan, ZHANG Ronghu, et al. Improvement of reservoir quality of ultra-deep tight sandstones by tectonism and fluid: A case study of Keshen gas field in Tarim Basin, western China[J]. Petroleum, 2023, 9(1): 124-134.
- [12] 王濡岳,胡宗全,周彤,等.四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控储意义[J].石油与天然气地质,2021,42(6): 1295-1306.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, ZHOU Tong, et al. Characteristics of fractures and their significance for reservoirs in Wufeng-Longmaxi shale, Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1295-1306.
- [13] 巩磊,曾联波,杜宜静,等.构造成岩作用对裂缝有效性的影响——以库车前陆盆地白垩系致密砂岩储层为例[J].中国矿业大学学报,2015,44(3): 514-519.
- GONG Lei, ZENG Lianbo, DU Yijing, et al. Influences of structural diagenesis on fracture effectiveness: a case study of the Cretaceous tight sandstone reservoirs of Kuqa foreland basin[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, 44(3): 514-519.
- [14] 曾联波,巩磊,祖克威,等.柴达木盆地西部古近系储层裂缝有效性的影响因素[J].地质学报,2012,86(11): 1809-1814.

- ZENG Lianbo, GONG Lei, ZU Kewei, et al. Influence factors on fracture validity of the Paleogene Reservoir, Western Qaidam Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86 (11): 1809–1814.
- [15] CAO Jian, XIA Liuwen, WANG Tingting, et al. An alkaline lake in the Late Paleozoic Ice Age (LPIA): A review and new insights into paleoenvironment and petroleum geology[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 202: 103091.
- [16] 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(5): 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 (5): 649–660.
- [17] LIU Guoping, JIN Zhijun, ZENG Lianbo, et al. Laminar controls on bedding-parallel fractures in Permian lacustrine shales, Junggar Basin, northwestern China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2025, 137(7–8): 3512–3526.
- [18] LIU Guoping, JIN Zhijun, ZENG Lianbo, et al. Natural fractures and their effectiveness in deep tight sandstone reservoirs of foreland thrust belts in the southern Junggar Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 2025, 22(8): 3086–3100.
- [19] ZHANG Chen, LIU Dong Dong, JIANG Zhen Xue, et al. Mechanism for the formation of natural fractures and their effects on shale oil accumulation in Junggar Basin, NW China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2022, 254: 103973.
- [20] ZHANG Yunzhao, ZHANG Rongjun, QU Le, et al. Development characteristics of natural fractures in tight sandstone reservoirs and their controlling factors: upper Triassic Xujiahe Formation, western Sichuan Basin[J]. *Frontiers*, 2024, 12.
- [21] DU Xiaoyu, JIN Zhijun, ZENG Lianbo, et al. Characteristics and controlling factors of natural fractures in deep lacustrine shale oil reservoirs of the Permian Fengcheng Formation in the Mahu Sag, Junggar Basin, China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2023, 175: 104923.
- [22] 刘国平, 金之钧, 曾联波, 等. 玛湖凹陷二叠系风城组深层陆相页岩储层天然裂缝及其有效性[J]. *地球科学*, 2024, 49(7): 2346–2358.
- LIU Guoping, JIN Zhijun, ZENG Lianbo, et al. Natural fractures and their effectiveness in deep continental shale reservoirs of Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag[J]. *Earth Science*, 2024, 49(7): 2346–2358.
- [23] 金之钧, 梁新平, 王小军, 等. 玛湖凹陷风城组页岩油富集机制与甜点段优选[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(6): 631–639.
- JIN Zhijun, LIANG Xinping, WANG Xiaojun, et al. Shale oil enrichment mechanism and sweet spot selection of the Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(6): 631–639.
- [24] 刘羽汐, 王秀娟, 白斌, 等. 陆相富含有机质页岩氮气孔隙度测定的关键问题与思考[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 1–17.
- LIU Yuxi, WANG Xiujuan, BAI Bin, et al. Key issues and reflections on the helium porosity determination of continental organic-rich shales [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 1–17.
- [25] JIAO Yifan, TANG Xianglu, HE Wenjun, et al. Characteristics and Genesis of Pore - Fracture System in Alkaline Lake Shale, Junggar Basin, China[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(12): 5239.
- [26] TANG Yong, LV Zhengxiang, HE Wenjun, et al. Characteristics and Genesis of Alkaline Lacustrine Tight Oil Reservoirs in the Permian Fengcheng Formation in the Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Minerals*, 2022, 12(8): 979.
- [27] TANG Yong, LYU Zhengxiang, HE Wenjun, et al. Origin of dolomites in the Permian dolomitic reservoirs of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(1): 43–56.
- [28] 王剑, 周路, 刘金, 等. 湖相热液白云岩成因机理——以准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组为例[J]. *沉积学报*, 2024, 42(1): 130–141.
- WANG Jian, ZHOU Lu, LIU Jin, et al. Genetic mechanism of the Huxiang Hydrothermal Dolomite: A case study of the Permian Fengcheng Formation in the Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(1): 130–141.
- [29] HUANG Yuyue, WANG Guiwen, ZHANG Yan, et al. Logging evaluation of pore structure and reservoir quality in shale oil reservoir: The Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 156: 106454.
- [30] LI Caijun, HU Tao, CAO Tingting, et al. Pore Structure and Geochemical Characteristics of Alkaline Lacustrine Shale: The Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Minerals*, 2023, 13(10): 1248.
- [31] YOUSEF Ibrahim, V. P. Morozov, MOHAMMAD El Kadi, et al. Porosity enhancement potential through dolomitization of carbonate reservoirs, a case of study from the Euphrates Graben fields, East Syria[J]. *Petroleum*, 2023, 9(02): 183–198.
- [32] 王朋飞, 姜振学, 李卓, 等. 渝东北下寒武统牛蹄塘组页岩微纳孔隙结构特征[J]. *地球科学*, 2017, 42(7): 1147–1156.
- WANG Pengfei, JIANG Zhenxue, LI Zhuo, et al. Micro-Nano pore structure characteristics in the Lower Cambrian Niutitang Shale, Northeast Chongqing[J]. *Earth Science*, 2017, 42 (7): 1147–1156.
- [33] 纪文明, 宋岩, 姜振学, 等. 四川盆地东南部龙马溪组页岩微-纳孔隙结构特征及控制因素[J]. *石油学报*, 2016, 37(2): 182–195.
- JI Wenming, SONG Yan, JIANG Zhenxue, et al. Micro-Nano pore structure characteristics and their control factors of shale in the Longmaxi Formation, southeastern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(2): 182–195.
- [34] 李中超, 姜淑霞, 张纪喜, 等. 川东北马路背背斜-通江向斜地区须家河组储层特征及主控因素研究[J]. *矿物岩石*, 2025, 45(04): 106–116.
- LI Zhongchao, JIANG Shuxia, ZHANG Jixi, et al. Study on the reservoir characteristics and maincontrolling factors of the xujiahe formation in themalubei anticline-tongjiang syncline area of northeastern sichuan[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2025, 45(04): 106–116.
- [35] 贾承造, 姜林, 赵文. 全油气系统理论研究进展[J]. *石油学报*, 2025, 46(07): 1217–1234+1307.
- JIA Chengzao, JIANG Lin, ZHAO Wen. Research progress in the Whole Petroleum System theory[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46 (07): 1217–1234+1307.
- [36] 曾联波, 吕文雅, 徐翔, 等. 典型致密砂岩与页岩层理缝的发育特

- 征 ■ 形成机理及油气意义[J]. 石油学报, 2022, 43(02): 180–191.
- ZENG Lianbo, LYU Wenya, XU Xiang, et al. Development characteristics, formation mechanism and hydrocarbon significance of bedding fractures in typical tight sandstone and shale[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(02): 180–191.
- [37] 曾联波, 吕鹏, 屈雪峰. 致密低渗透储层多尺度裂缝及其形成地质条件[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(03): 449–454.
- ZENG Lianbo, LYU Wenya, QU Xuefeng. Characteristics of fractures and their significance for reservoirs in Wufeng–Longmaxi shale, Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1295–1306.
- [38] 张永旺, 曾溅辉, 郭建宇. 低温条件下长石溶解模拟实验研究[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 134–142.
- ZHANG Yongwang, ZENG Jianhui, GUO Jianyu. Simulated experimental study of feldspar dissolution in low temperature. [J]. Geological Review, 2009, 55 (1): 134–142.
- [39] 远光辉. 成岩过程中长石和碳酸盐矿物溶蚀机理及其物性响应[D]. 中国石油大学(华东), 2015.
- YUAN Guanghui. Genetic mechanism of dissolution of feldspars and carbonate minerals during diagenesis and its impact on reservoir poroperm[D]. China University of Petroleum (East China), 2015.
- [40] 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 301.
- YANG Feng, NING Zhengfu, HU Changpeng, et al. Characterization of microscopic pore structures in shale reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 301.