

文章编号: 1000-0747(2023)02-0297-12 DOI: 10.11698/PED.20220525

孔喉微观润湿性对页岩油赋存的控制作用 ——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组纹层状页岩为例

蒯克来¹, 张媛媛², 操应长¹, 官剑飞³, 李克¹, 林救若¹

(1. 中国石油大学(华东)深层油气重点实验室, 山东青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257000; 3. 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257000)

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072161; 41821002); 中央高校基本科研业务经费项目(22CX07008A)

摘要: 针对页岩不同类型储集空间中孔喉微观润湿性对其控制作用仍不明确的问题, 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油储集层为例, 综合运用扫描电镜、多阶热解、储集层定量荧光、核磁共振等分析方法, 开展纹层状页岩储集空间特征及孔喉微观润湿性对页岩油赋存控制作用的研究。结果表明: 芦草沟组主要发育“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩和“富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩, 其中“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩发育长石溶蚀孔隙和粒间孔隙, 孔喉周缘矿物组分主要为长英质矿物组分, 呈亲水性特征, 主要控制游离态页岩油。“富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩发育碳酸盐晶间孔和有机质孔隙, 孔喉周缘矿物组分主要呈亲油性特征, 控制吸附态页岩油。孔喉周缘主要为油润湿碳酸盐组分时, 利于原油的聚集, 但使得游离态的油含量比例下降。芦草沟组页岩游离油主要赋存于“富火山物质+陆源长英质”纹层组合的陆源长英质纹层中, 成熟度较高、油质较轻。

关键词: 页岩纹层; 孔喉润湿性; 原油赋存状态; 页岩油储集层; 二叠系芦草沟组; 吉木萨尔凹陷; 准噶尔盆地

中图分类号: TE122 文献标识码: A

Control of micro-wettability of pore-throat on shale oil occurrence: A case study of laminated shale of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China

XI Kelai¹, ZHANG Yuanyuan², CAO Yingchang¹, GONG Jianfei³, LI Ke¹, LIN Miruo¹

(1. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China; 3. Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China)

Abstract: The control of micro-wettability of pore-throat on shale oil occurrence in different types of reservoir spaces remains unclear. With the shale oil reservoir of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusar Sag, the Junggar Basin, as an example, the reservoir space in laminated shale and the control of micro-wettability of pore-throat on shale oil occurrence were studied by using scanning electron microscope (SEM), multi-stage pyrolysis, quantitative fluorescence, nuclear magnetic resonance (NMR) and other techniques. The results show that there are mainly two types of laminated shale in the Lucaogou Formation, namely laminated shale rich in volcanic materials + terrigenous feldspar-quartz, and laminated shale rich in volcanic materials + carbonate. The former type contains feldspar dissolution pores and intergranular pores, mainly with feldspar-quartz mineral components around the pore-throats, which are water-wet and control the free shale oil. The latter type contains carbonate intercrystalline pores and organic pores, mainly with oil-wet mineral components around the pore-throats, which control the adsorbed shale oil. The oil-wet mineral components around the pore-throats are conducive to oil accumulation, but reduce the proportion of free oil. In the Lucaogou Formation, free oil mainly occurs in the laminated shale rich in volcanic materials + terrigenous feldspar-quartz, with high maturity and light quality.

Key words: shale lamina; pore-throat wettability; oil occurrence state; shale oil reservoir; Permian Lucaogou Formation; Jimusar Sag; Junggar Basin

引用: 蒯克来, 张媛媛, 操应长, 等. 孔喉微观润湿性对页岩油赋存的控制作用: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组纹层状页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 297-308.

XI Kelai, ZHANG Yuanyuan, CAO Yingchang, et al. Control of micro-wettability of pore-throat on shale oil occurrence: A case study of laminated shale of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 297-308.

0 引言

页岩油具有源储一体、滞留聚集、连续分布的特征,储集层储集性能是决定其高效勘探开发的基础与关键^[1]。陆相页岩物质组分复杂、页理发育、纹层类型多样,导致其储集空间类型及其分布非均质性强,从而决定了页岩油的充注过程与赋存状态极其复杂^[1-3]。页岩油储集层以微—纳米级孔喉系统为主,液态烃主要以吸附态和游离态赋存于其中,不同类型储集空间中吸附态和游离态含量比例差异明显,孔喉内原油含量与赋存状态直接决定了页岩油勘探开发的有效性^[4]。同时,原油的运移取决于孔喉中所需充注动力的大小,在相同的孔隙结构条件下,孔喉若表现为亲油性,原油的充注阻力则会减小,形成原油优势聚集,但吸附态原油含量可能会增加,从而影响开发效率^[5-8]。因此,明确孔喉微观润湿性对石油赋存特征的控制作用,对预测页岩油有利分布区,指导其高效勘探开发具有重要的指导意义。

页岩油储集层埋藏演化过程中经历复杂的有机—无机相互作用过程,导致不同组分类型的纹层中孔喉空间类型、大小及其周缘矿物类型发生变化,从而可能造成孔喉润湿性发生改变,特别在微观尺度上形成复杂的润湿性分布特征,直接影响页岩油的含量与赋存状态^[2, 4, 8],加大了对页岩油富集机理认识的难度。本文通过扫描电镜、自动矿物参数定量分析(AMICS)、多阶热解、储集层定量荧光、核磁共振等分析方法,从储集空间特征及原油赋存特征等方面入手,对准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩储集层孔喉微观润湿性及其对页岩油赋存的控制作用进行研究,能够对页岩油富集机理的认识提供良好的理论指导。

1 区域地质概况

吉木萨尔凹陷是位于准噶尔盆地东南缘的一个二级构造单元(见图1a),其北、西、南分别以吉木萨尔断裂、老庄湾断裂和西地断裂、三台断裂和后堡子断裂为界,向东逐渐抬升与古西凸起连接,整体为中石炭统褶皱基底之上形成的一个西断东超的箕状凹陷(见图1b)^[9-10]。海西期为吉木萨尔凹陷的发育阶段,在中二叠世晚期,凹陷封闭并且整体下沉,芦草沟组发育1套咸化湖盆细粒沉积,地层厚度为200~350 m,成为吉木萨尔凹陷的主力烃源岩层^[11-12]。在此期间,伴随湖盆周围的火山较长时间内持续频发大规模活动,火山喷发物质的飘落以及地表水将凹陷周缘早期

沉降的火山物质携带入湖沉积,使得单旋回地层沉积厚度较薄,形成了火山物质、陆源碎屑和内源碳酸盐混合的多组分来源细粒沉积物,广泛发育纹层构造^[13-14],主要包括“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩和“富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩两类,其矿物成分极其复杂^[15-17],储集空间类型多样、含油非均质性强^[18-19]。该套沉积物富含有机质,TOC值高(2.0%~11.8%),有机质类型好,整体处于中低成熟阶段,具备页岩油形成的有利条件,是准噶尔盆地主要的页岩油勘探层段^[11]。

2 研究方法

本次研究的样品来源于芦草沟组7口取心井(J174井、J176井、J251井、J31井、J32井、J34井和J37井)中的页岩典型层段(见图1c)。首先开展岩石薄片观察、X-衍射分析(EDX)、扫描电镜观察(SEM)、大视域电镜拼图(MAPS)、自动矿物参数定量分析(AMICS)、低温氮气吸附、高压压汞等实验,明确不同纹层状页岩的储集空间类型、大小及其周缘基质组分的分布特征。开展多阶热解、储集层定量荧光、核磁共振实验,明确石油赋存特征及其含油量差异,结合储集空间特征,探究吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组纹层状页岩孔喉微观润湿性对页岩油赋存的控制作用。

自动矿物参数定量系统(AMICS)是一项结合扫描电镜、能谱分析与背散射高分辨率成像的分析技术,可获得样品大面积的矿物种类、粒度、元素含量以及接触关系等信息,对样品中不同组分进行原位定量分析^[2, 6]。将样品表面采取氦离子抛光及镀碳处理,制成样品靶,放入扫描电镜中,选取研究区域后进行连续电镜扫描并自动拼接,获取MAPS分析图像,明确储集空间超大视域的分布特征,结合AMICS分析软件,对该区域进行原位矿物参数定量分析,明确孔隙周缘不同类型矿物的比例。基于游离油和吸附油具有不同的分子热挥发能力,多阶热解实验是一种采取合理的加热条件进行不同赋存状态页岩油的定量测定方法。将粉末状样品以25 °C/min的升温速度,分别在200, 350, 450, 600 °C条件下恒温1 min进行检测,产物分别为S₁₋₁、S₁₋₂、S₂₋₁和S₂₋₂。其中,(S₁₋₁+S₁₋₂)代表游离油量,S₂₋₁代表吸附油量,S₂₋₂代表干酪根裂解油量^[20-21]。储集层定量荧光技术针对页岩油储集层的研究,主要包括储集层萃取液定量荧光(QGF-E)和全息扫描荧光(TSF),通过萃取颗粒表面的原油后开展定量检测,获得原油成熟度和含油丰度等信息。QGF-E技术与

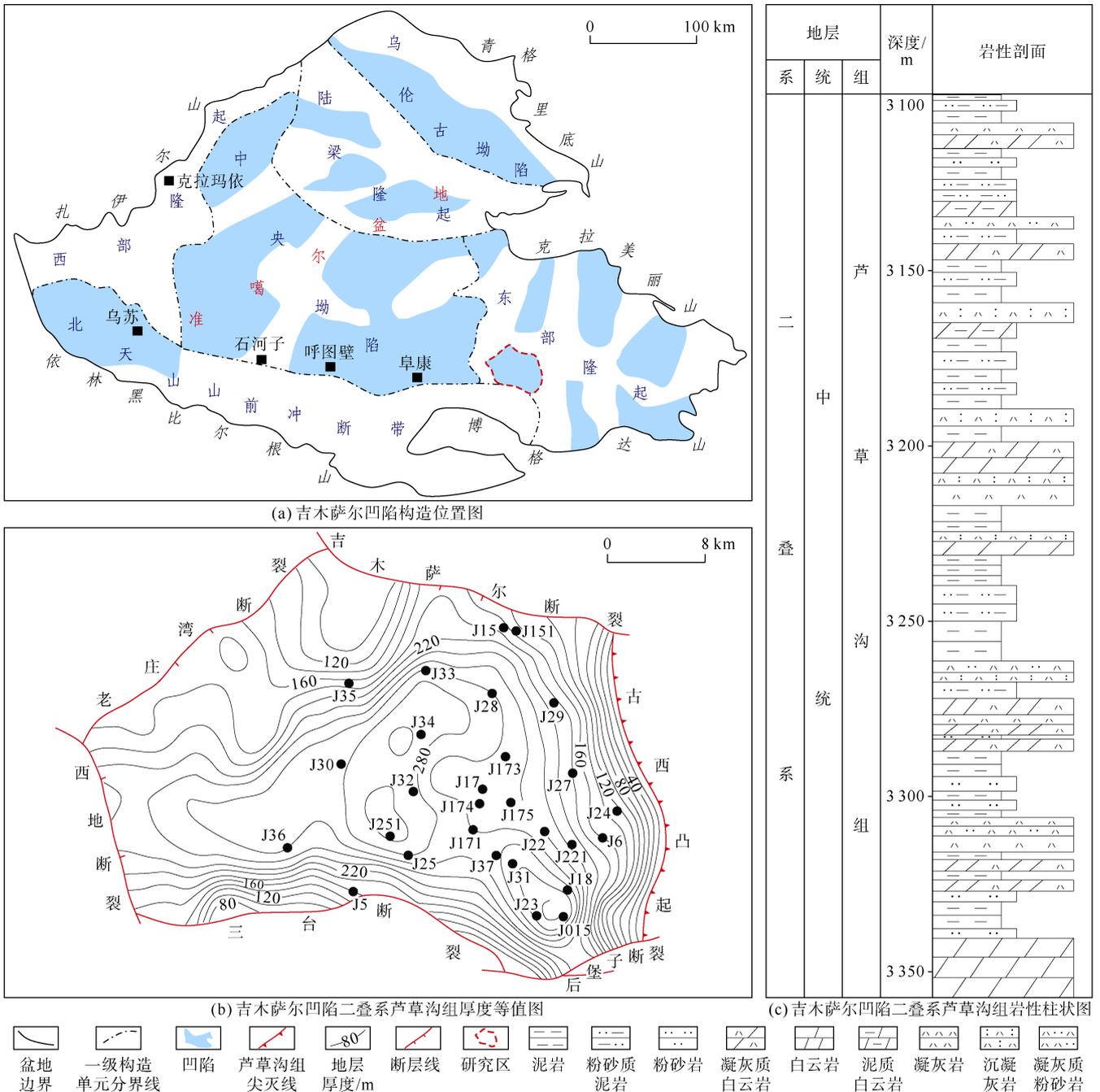


图1 吉木萨尔凹陷构造位置及芦草沟组特征 (据文献[13]修改)

TSF 技术均可测得萃取液荧光强度,可以反映原油丰度的高低。TSF 技术还可获得用以反映原油成熟度的 R_1 参数, R_1 值越小,表明原油成熟度越高、油质越轻^[22]。

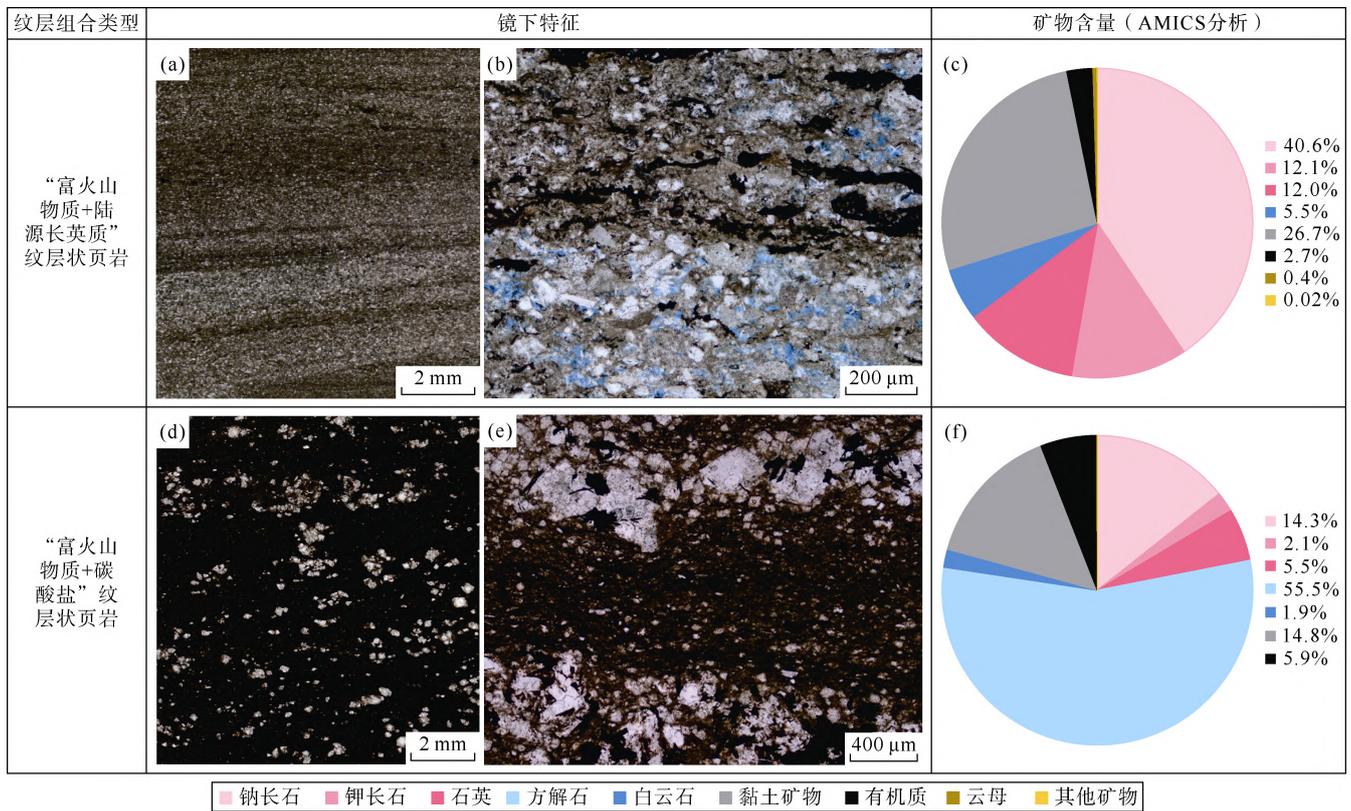
3 页岩纹层组合及其储集空间特征

3.1 纹层组合特征

3.1.1 “富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩

该类页岩是由陆源长英质纹层和富火山物质纹层所构成。在显微镜下陆源长英质纹层颜色较浅,厚度

为 100~150 μm ;富火山物质纹层颜色较深,厚度为 100~150 μm ,两种纹层呈现出规律性的频繁互层(见图 2a)。陆源长英质纹层中颗粒较大,粒径多为粉砂级;在富火山物质纹层内部发育有机质,呈断续条带状和分散团块状分布,同时局部可见较大的陆源碎屑团块(见图 2b)。通过 AMICS 分析表明,其矿物成分以长英质矿物为主,钠长石含量为 40.6%,钾长石和石英的含量均在 12.0%左右;发育的碳酸盐矿物为白云石,含量为 5.5%;黏土矿物含量高达 26.7%;有机质含量为 2.7%(见图 2c)。



(a) J37 井, 2 843.55 m, 显微镜下薄片特征, 单偏光; (b) J37 井, 2 843.55 m, 显微镜下文层组合特征, 单偏光; (c) J37 井, 2 843.55 m, 全矿物成分平均组成, AMICS; (d) J174 井, 3 319.35 m, 显微镜下薄片特征, 单偏光; (e) J174 井, 3 319.35 m, 显微镜下文层组合特征, 单偏光; (f) J174 井, 3 319.35 m, 全矿物成分平均组成, AMICS

图 2 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩纹层组合与矿物组分特征

3.1.2 “富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩

该类页岩是由富火山物质纹层和碳酸盐矿物纹层所构成。碳酸盐矿物纹层内部发育大量晶粒较大的亮晶方解石, 颜色较浅, 厚度为 100~150 μm; 富火山物质纹层的颜色较深, 内部发育的碳酸盐矿物颗粒粒径较小, 有机质呈连续状条带分布 (见图 2d、图 2e)。通过 AMICS 分析表明, 该类页岩的矿物成分以方解石为主, 含量为 55.5%, 白云石含量为 1.9%; 钠长石、钾长石和石英矿物含量分别为 14.3%、2.1%和 5.5%; 黏土矿物含量为 14.8%; 有机质含量较高, 达到 5.9% (见图 2f)。

3.2 储集空间特征

“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩储集空间主要为陆源长英质纹层内的粒内溶蚀孔隙与粒间孔隙 (见图 3a) 以及富火山物质纹层内的黏土矿物晶间孔隙 (见图 3b)。陆源长英质纹层中的长石和石英质颗粒含量高, 为储集空间的发育提供了有利的物质基础。利用扫描电镜结合 X 射线能谱分析发现, 钾长石颗粒普遍发生溶蚀, 部分颗粒被完全溶蚀成蜂窝状 (见图 3c、图 3d)。粒间孔隙主要发育在钠长石颗粒和石英颗

粒之间, 孔隙边缘平直, 呈规则多边形 (见图 3e), 两种孔隙直径主体为微米级, 最大直径可达 50 μm。孔隙之间具有较好的连通性。富火山物质纹层主要发育微—纳米级黏土矿物晶间孔隙, 多位于刚性颗粒之间和有机质周围 (见图 3b、图 3f、图 3g)。纹层中可见局部混入的陆源碎屑团块, 刚性颗粒之间能够保存孔径相对较大的孔隙 (见图 3b、图 3f), 最大约 10 μm, 为该类纹层提供了较好的储集空间。纹层中可见有机质孔隙, 在有机质内部多发育为椭圆状, 有机质与无机颗粒之间形成狭缝状的边缘孔隙 (见图 3g), 孔径多为纳米级, 最大可达微米级。

“富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩的储集空间发育程度中等, 矿物基质孔隙和有机质孔隙并存 (见图 4a—图 4c)。该类纹层状页岩的有机质丰度高, 富火山物质纹层中团块状、连续条带状有机质内部孔隙极其发育, 呈椭圆状和蜂窝状两种形态, 主要为纳米级 (见图 4d、图 4e), 少见长石溶蚀孔隙 (见图 4e)。碳酸盐矿物纹层中多见方解石重结晶所形成的三角形态和规则多边形形态的晶间孔隙 (见图 4f、图 4g), 孔径介于微—纳米级, 少见长石粒内溶蚀孔隙 (见图 4g)。该类页

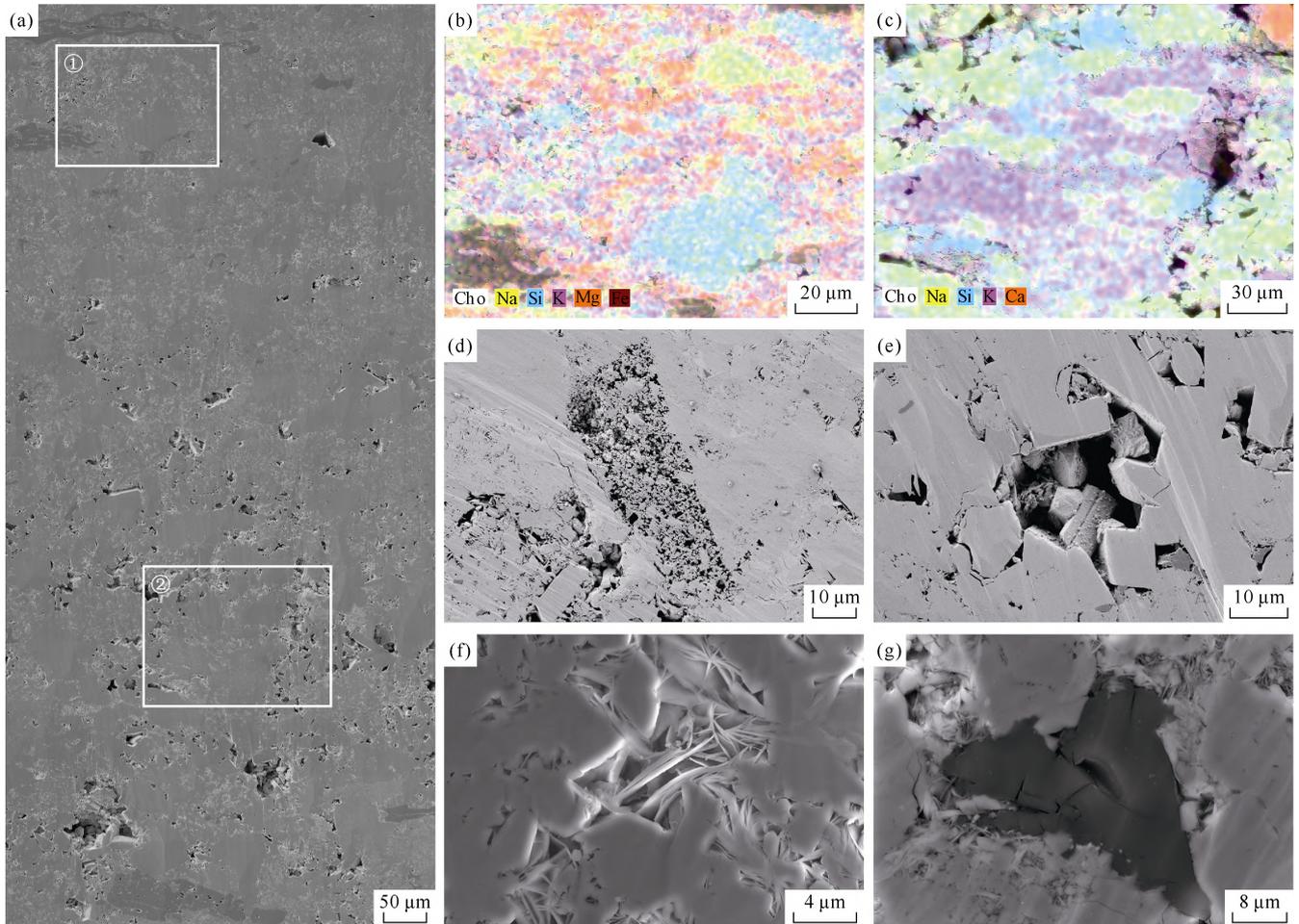


图3 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩储集空间类型及分布特征
 (a) J37井, 2 843.55 m, 不同纹层中孔隙分布特征, 分辨率: 10 nm, 样品尺寸: 1 101.2 μm×500.0 μm, MAPS; (b) J37井, 2 843.55 m, 对应图 a 位置①处, 富火山物质纹层元素分布特征, EDX; (c) J37井, 2 843.55 m, 对应图 a 位置②处, 陆源长英质纹层元素分布特征, EDX; (d) J37井, 2 843.55 m, 长石颗粒溶蚀成蜂窝状, SEM; (e) J37井, 2 843.55 m, 粒间孔隙, SEM; (f) J37井, 2 843.55 m, 刚性颗粒之间充填黏土矿物, SEM; (g) J37井, 2 843.55 m, 有机质边缘分布有黏土矿物, SEM

图3 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩储集空间类型及分布特征

岩的两种纹层中, 有机质与刚性颗粒接触处均广泛发育微米级的狭缝状有机质边缘孔隙(见图4a、图4c), 纹层间发育宽度达微米级的纹层缝(见图4a)。

4 页岩油赋存特征及其差异性

荧光薄片观察表明, 芦草沟组页岩储集层中原油呈现黄色和蓝色两种荧光类型。蓝色荧光的原油主要分布于陆源长英质纹层中的长石溶蚀孔隙和粒间孔隙内部(见图5a、图5b), 原油成熟度较高。黄色荧光的原油则多分布于碳酸盐矿物纹层与富火山物质纹层中(见图5c), 原油成熟度相对较低, 以油膜形态吸附在方解石和白云石矿物的表面(见图5d—图5f), 在直径较大的碳酸盐矿物晶间孔隙内, 原油易呈粘状形态存在(见图5e)。

芦草沟组页岩有机质丰度高, 两类纹层状页岩的有机碳含量存在一定差异, “富火山物质+碳酸盐”纹

层状页岩的有机质丰度高于“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩, 但总含油量表现出相近的特征。多阶热解实验表明, “富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩的总含油量为 3.7~30.8 mg/g, 主要分布范围为 15~30 mg/g, 平均值为 18.5 mg/g, 储集空间以有机质边缘孔隙为主, 吸附态原油含量高达 81.1%, 游离油含量仅为 18.9%。“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩的总含油量为 1.0~24.9 mg/g, 主要分布范围为 15~25 mg/g, 平均值为 14.2 mg/g, 该类页岩多为粒径较大的长英质颗粒, 储集空间主要为溶蚀孔隙和粒间孔隙, 游离态与吸附态页岩油含量分别为 51.1%与 48.9%, 两种赋存状态原油的含量相当。页岩油可动性与其赋存状态密切相关, 游离态是勘探开发关注的更有利赋存状态。对于纹层状页岩, 不同纹层类型的基质组分不同, 所发育的储集空间特征及其控制的原油赋存状态相应发生改变。

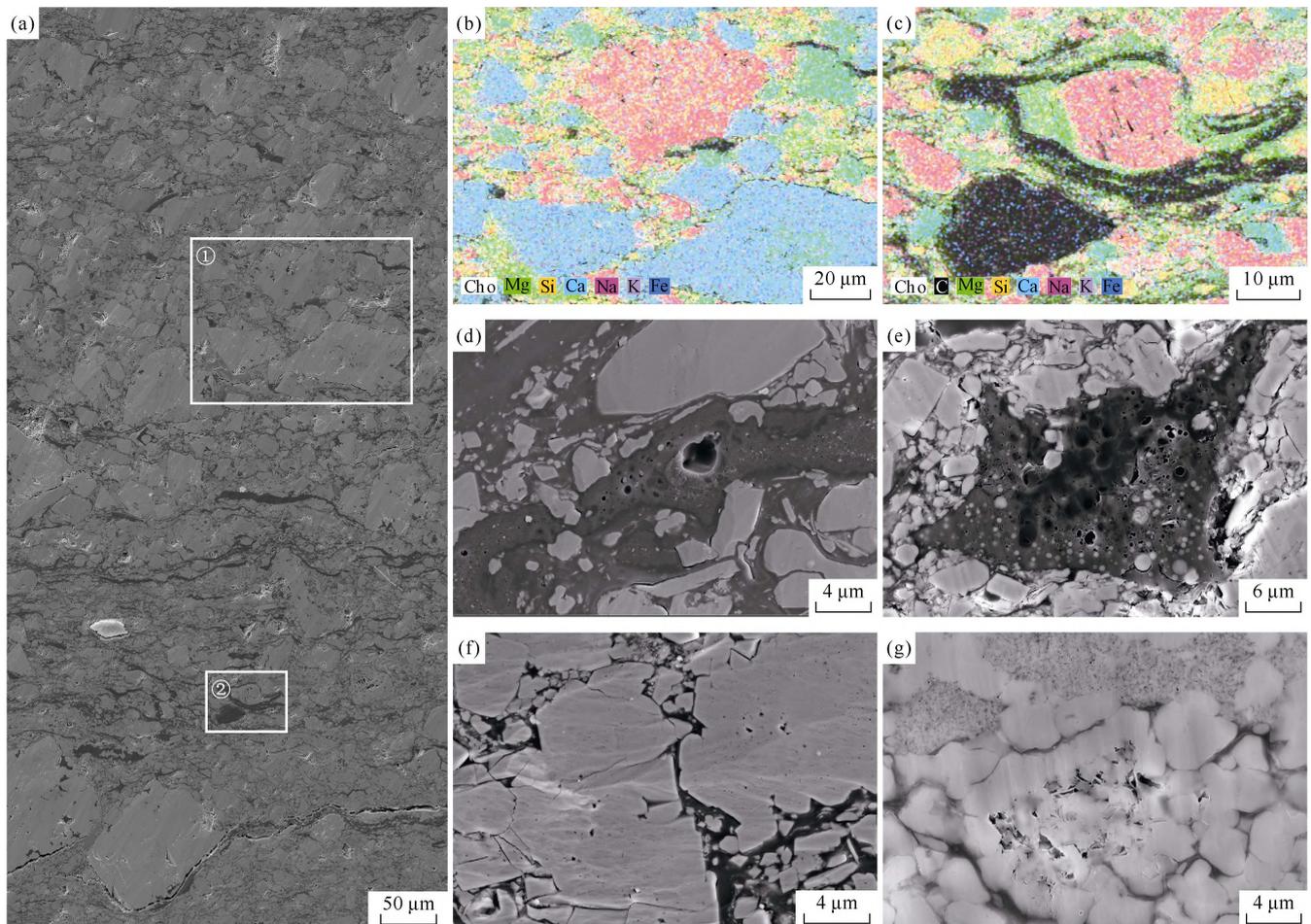


图4 J174井, 3319.35 m, 不同纹层中孔隙分布特征, 分辨率: 10 nm, 样品尺寸: 809.4 μm \times 390.9 μm , MAFS; (b) J174井, 3319.35 m, 对应图a位置①处, 碳酸盐矿物纹层元素分布特征, EDX; (c) J174井, 3319.35 m, 对应图a位置②处, 富火山物质纹层元素分布特征, EDX; (d) J174井, 3319.35 m, 有机质孔隙, SEM; (e) J174井, 3319.35 m, 有机质孔隙, SEM; (f) J174井, 3319.35 m, 方解石晶间孔隙, SEM; (g) J174井, 3319.35 m, 方解石晶间孔隙, SEM

图4 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组“富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩储集空间类型及分布特征

基于多阶热解测试无法进行纹层尺度的原油赋存特征研究, 而储集层定量荧光技术可以通过钻取岩心原位粉末样品, 开展原油组成及其丰度的定量分析。为明确储集层定量荧光测试所萃取的原油赋存类型, 利用研究区块状岩石样品的萃取液荧光强度与多阶热解结果进行相关性分析, 结果表明萃取液中所获得的原油主要为储集层中的游离态页岩油, QGF-E 荧光强度与游离油含量呈现出更好的正相关性, 说明储集层定量荧光测试可用于表征芦草沟组页岩储集空间中游离态页岩油的含量及组分特征。

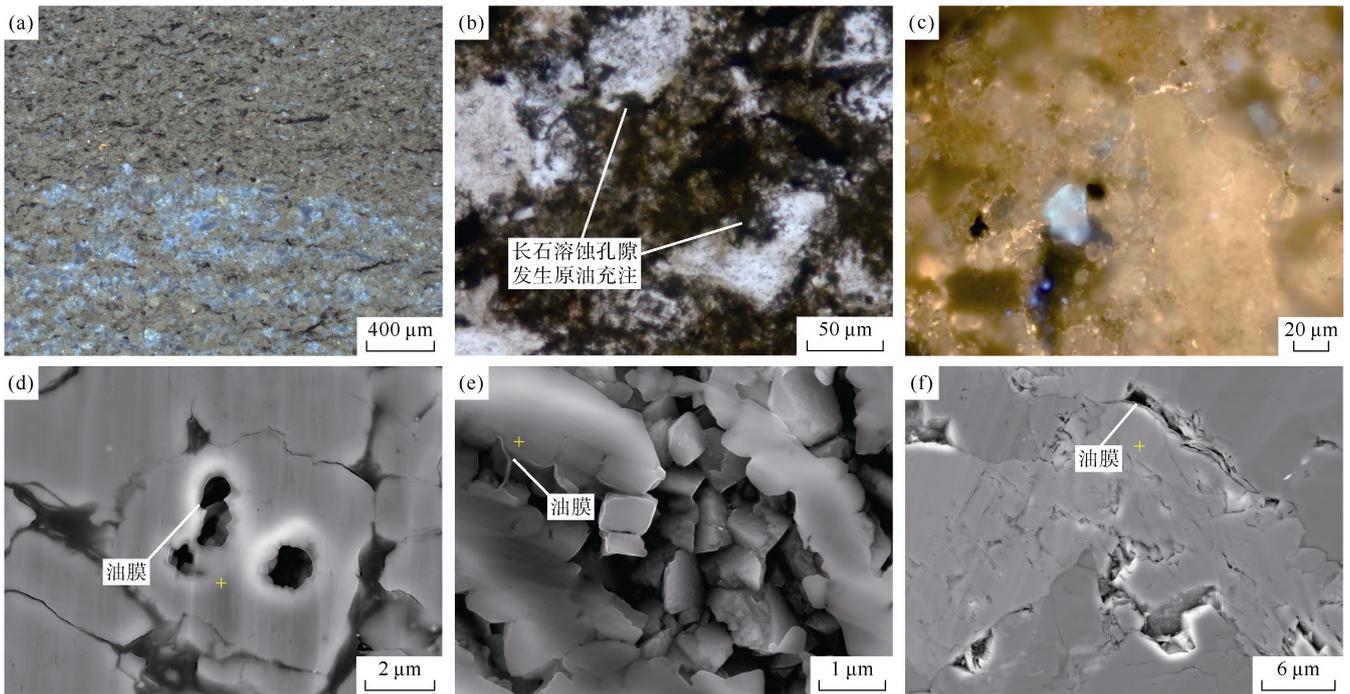
利用显微微钻取样技术, 分别钻取“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩不同纹层的粉末样品, 开展储集层定量荧光分析, 结果表明不同纹层中所赋存的游离油定量荧光参数差别较大。富火山物质纹层中和陆源长英质纹层中的游离油 TSF 荧光强度分别约为 1.3×10^4 (见图 6a)、 7.0×10^4 (见图 6b), 两者的 R_1 参

数主要分别位于 8 以上以及 8 以下 (见图 7), 表明该类纹层状页岩中游离油主要赋存于陆源长英质纹层中, 原油成熟度较高、油质较轻。

5 微观润湿性对原油赋存的控制

5.1 孔喉微观润湿性原位表征

孔喉周缘基质组分的润湿性是影响原油充注的重要因素, 并进一步控制原油的赋存特征。吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油储集层主要发育有机质组分和长英质、碳酸盐、黏土等无机矿物组分。其中, 利用 X-衍射、扫描电镜和 AMICS 共同确认黏土矿物主要为伊利石。储集层中有机质组分表现为亲油性^[5, 23], 无机矿物润湿性取决于地质条件下矿物界面的电荷性质。由于原油分子表面带有负电荷, 矿物表面表现为正电荷的则为亲油矿物, 反之则为亲水矿物^[5]。如石英和长石矿物在酸性环境中, 其表面带有正电荷; 碳酸



(a) J37井, 2 843.55 m, “富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩荧光特征, 荧光; (b) J37井, 2 843.55 m, 陆源长英质纹层中长石溶蚀孔隙与原油充注, 单偏光; (c) J174井, 3 319.35 m, “富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩, 方解石晶间孔中原油呈黄色荧光, 荧光; (d) J174井, 3 319.35 m, “富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩, 白云石晶间孔内原油以油膜形式赋存; (e) J174井, 3 319.35 m, “富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩, 白云石晶间孔内原油以油膜-粘连态形式赋存; (f) J174井, 3 319.35 m, “富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩, 方解石晶间孔内原油以油膜形式赋存

图5 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩储集层原油赋存特征

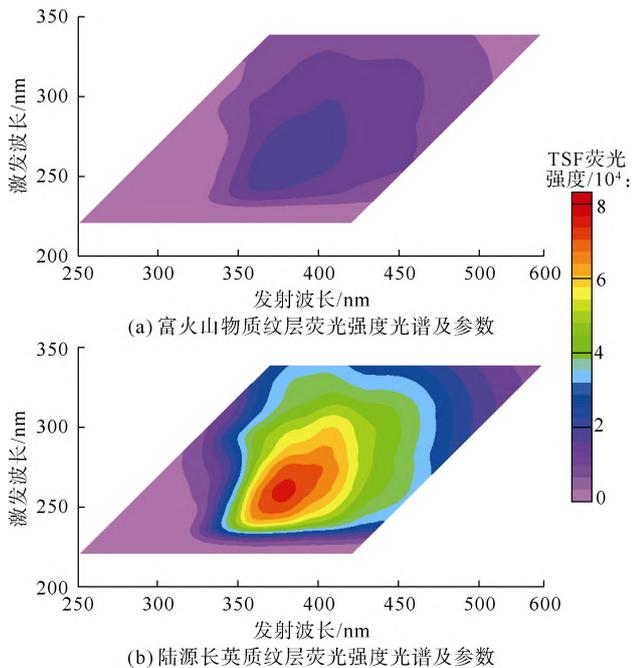


图6 芦草沟组页岩储集层 TSF 荧光强度特征

盐矿物在碱性条件下, 其表面带有正电荷^[24-25]。结合芦草沟组页岩油储集层沉积时期处于干旱气候下相对咸化的湖盆环境, 其地层水整体偏弱碱性的地质条件, 分析表明芦草沟组亲水矿物主要包括长英质矿物(石

英、钠长石、钾长石等)和黏土矿物, 亲油矿物主要包括碳酸盐矿物和有机质组分两种类型^[24-25], 结合电镜下原油实际赋存特征(见图5d、图5e)可以得到证实。

AMICS分析表明, 孔隙周缘基质组分含量不同, “富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩内陆源长英质纹层孔隙周缘主要为长石、石英和黏土等水润湿性矿物(见图8a—图8d), 富火山物质纹层中发育的少量碳酸盐矿物晶间孔隙和有机质孔隙周缘分布油润湿基质组分(见图8e、图8f)。定量统计表明, 该类页岩的

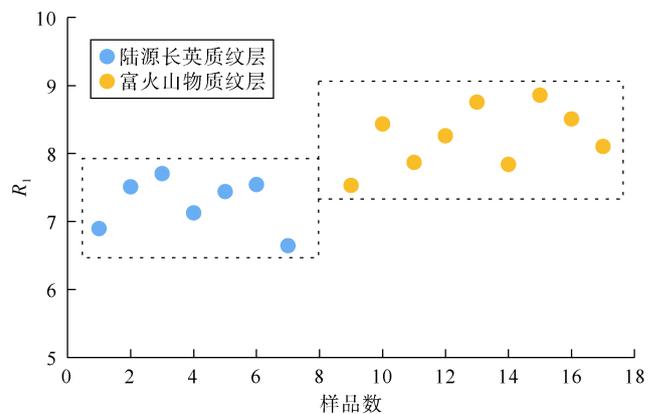
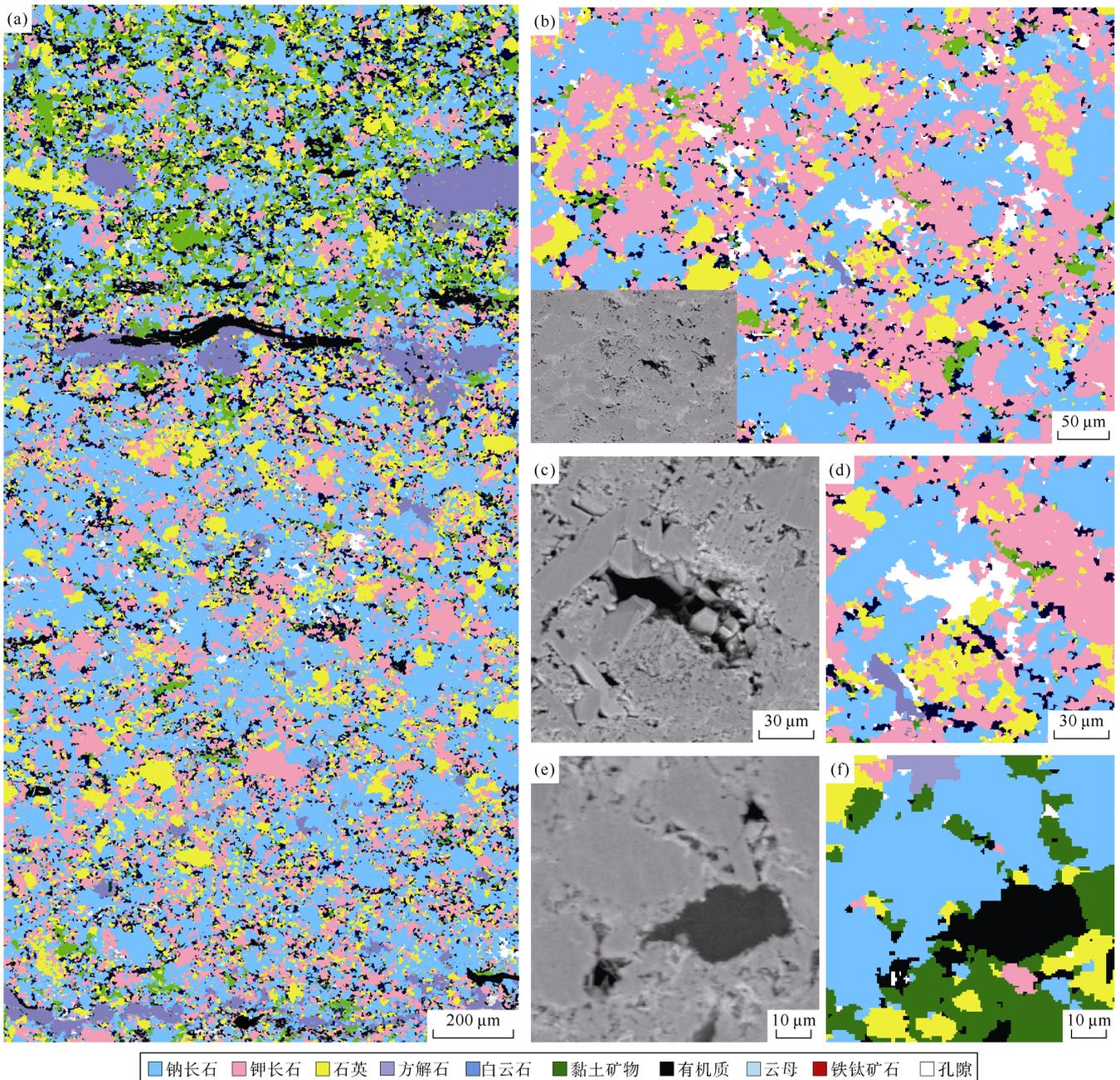


图7 芦草沟组页岩储集层 R_1 参数分布特征



(a)“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩大视域矿物分布特征, AMICS; (b) 陆源长英质纹层孔隙边缘矿物分布特征, AMICS; (c) 陆源长英质纹层中主要发育的孔隙类型, SEM; (d) 对应 c 图孔隙边缘接触矿物特征, AMICS; (e) 富火山物质纹层中主要发育的孔隙类型, SEM; (f) 对应 e 图孔隙边缘接触矿物特征, AMICS

图 8 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩孔隙边缘矿物组分特征 (J37 井, 2 843.55 m)

孔隙边缘所接触碳酸盐矿物和有机质组分接触占比分别为 14.1%和 11.5%，油润湿组分共计为 25.6%；长英质矿物和黏土矿物的接触占比分别为 48.0%和 16.0%，水润湿组分总体达到 64.0%（见图 9），储集空间整体呈现亲水性特征。“富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩组分主要为方解石和有机质，储集空间类型包括方解石晶间孔隙和有机质孔隙，有机质和方解石接触处的狭缝状有机质收缩孔隙以及纹层缝占据了储集空间周

缘主要的接触面积（见图 10a—图 10d）。定量统计表明，该类页岩碳酸盐矿物纹层内孔隙边缘方解石接触占比达到 45.3%，其次为有机质组分，接触占比为 32.1%，油润湿组分共计 77.4%（见图 9）；富火山物质纹层中的部分长石溶蚀孔隙和黏土矿物晶间孔隙边缘呈现出水润湿的特征（见图 10e、图 10f），但接触面积较小，仅为 19.7%（见图 9），储集空间整体呈现亲油性特征。

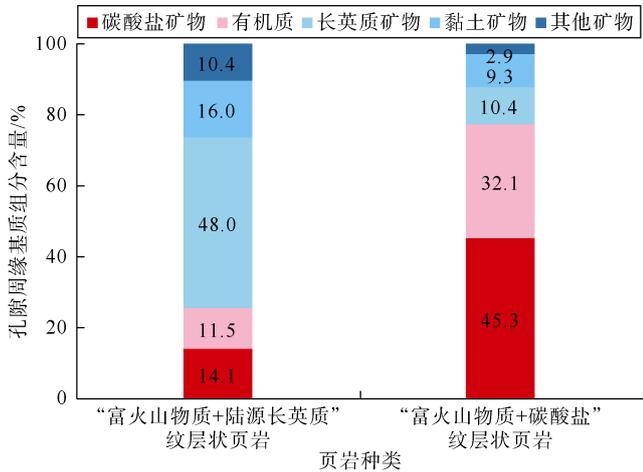


图9 芦草沟组页岩储集层孔隙边缘矿物组分占比特征

5.2 微观润湿性对原油赋存的影响

芦草沟组页岩孔喉微观润湿性对原油的赋存具有

明显的影响，油润湿组分接触占比越大，越易于原油的聚集，页岩油含量随亲油性组分的比表面积增大而增加。当亲油性组分存在时，毛细管力压差方向指向小孔径一侧，原油进入孔隙时所需的充注动力有所减小，岩石中小孔径的孔隙更易被动用，导致在储集空间的孔隙结构相同条件下，呈亲油性特征的小孔隙相比于亲水性特征的小孔隙，更容易实现原油的运聚。利用核磁共振，对两种页岩组合进行饱和煤油离心实验发现，在较小孔径范围内（横向弛豫时间小于2ms），呈亲油性特征的“富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩，比亲水性特征的“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩中的原油含量更高（见图11），孔隙边缘油润湿组分降低了原油充注的孔径下限，导致在孔隙结构相同条件下，呈油润湿特征的小孔隙相较于水润湿特征的小孔隙，更容易实现原油的运聚。

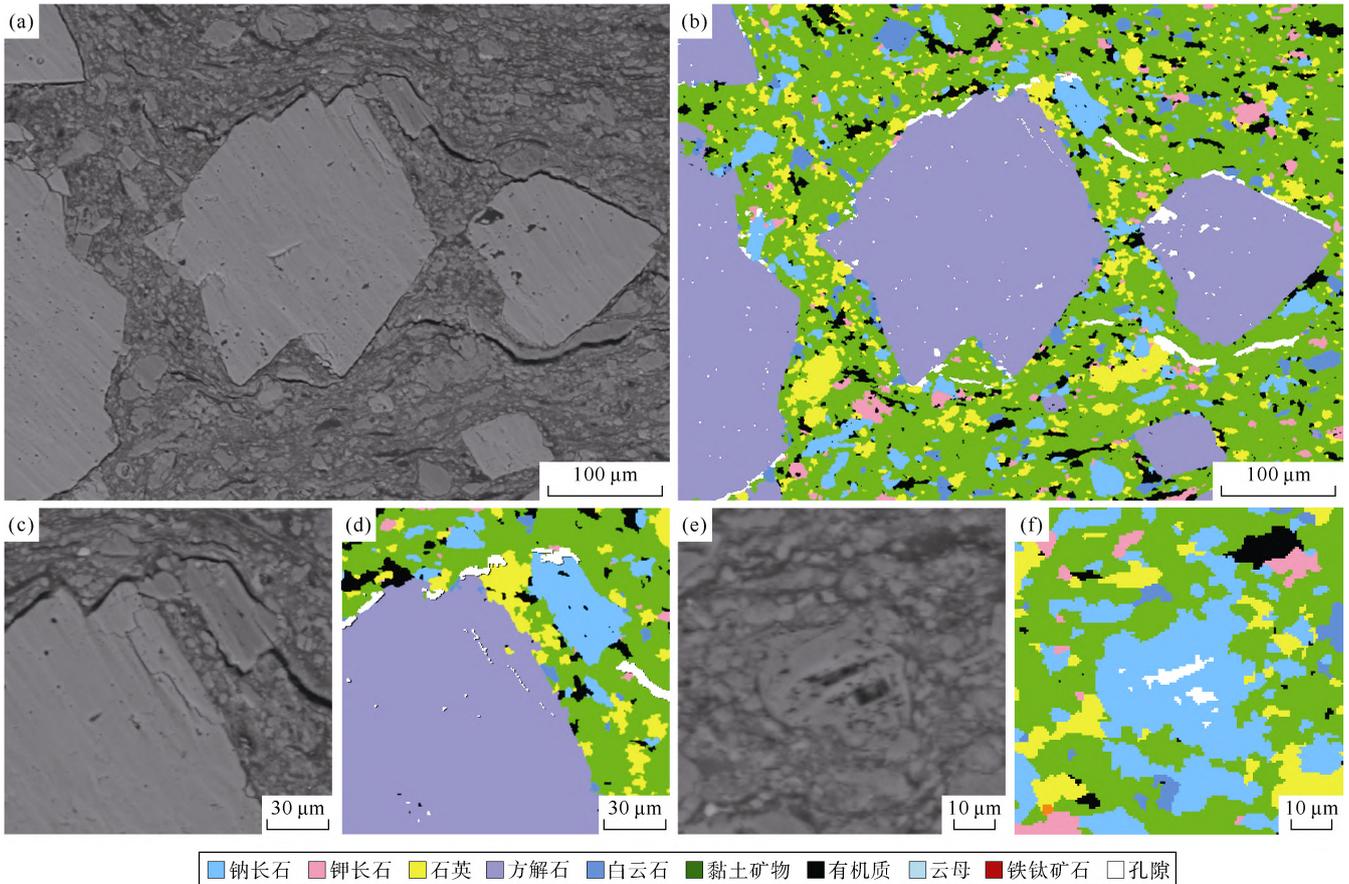


图10 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组“富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩孔喉边缘矿物组分特征 (J174井, 3 319.35 m)

芦草沟组页岩吸附油含量与孔隙比表面积关系呈现出“高比表面积低吸附，低比表面积高吸附”的特

征（见图12a、图12b）。①“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩的孔喉边缘接触组分主体表现为水润湿特

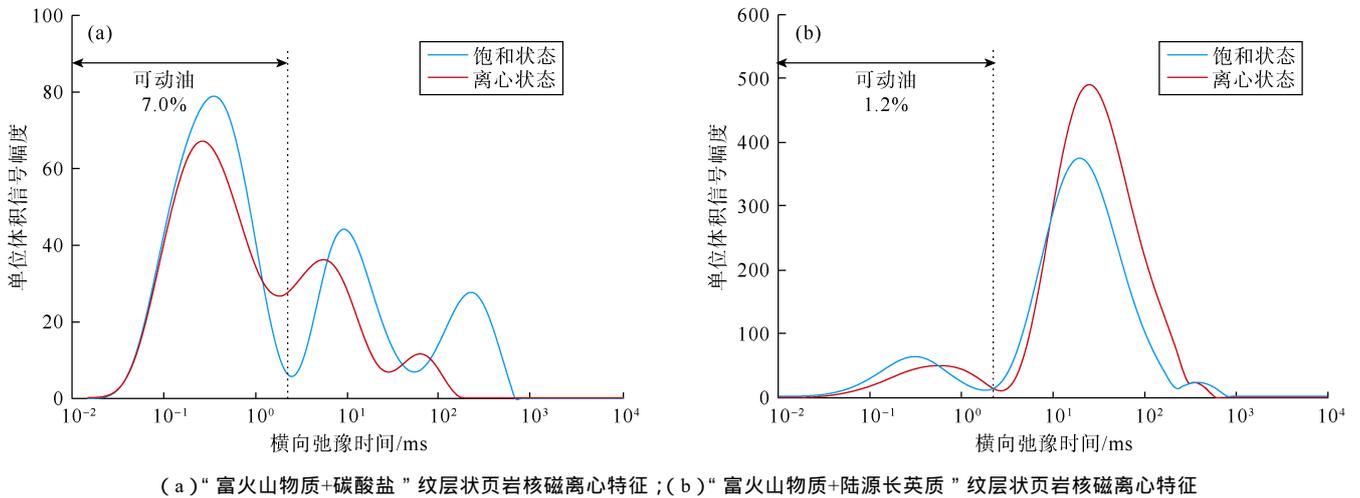


图 11 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩核磁离心特征（饱和和煤油）

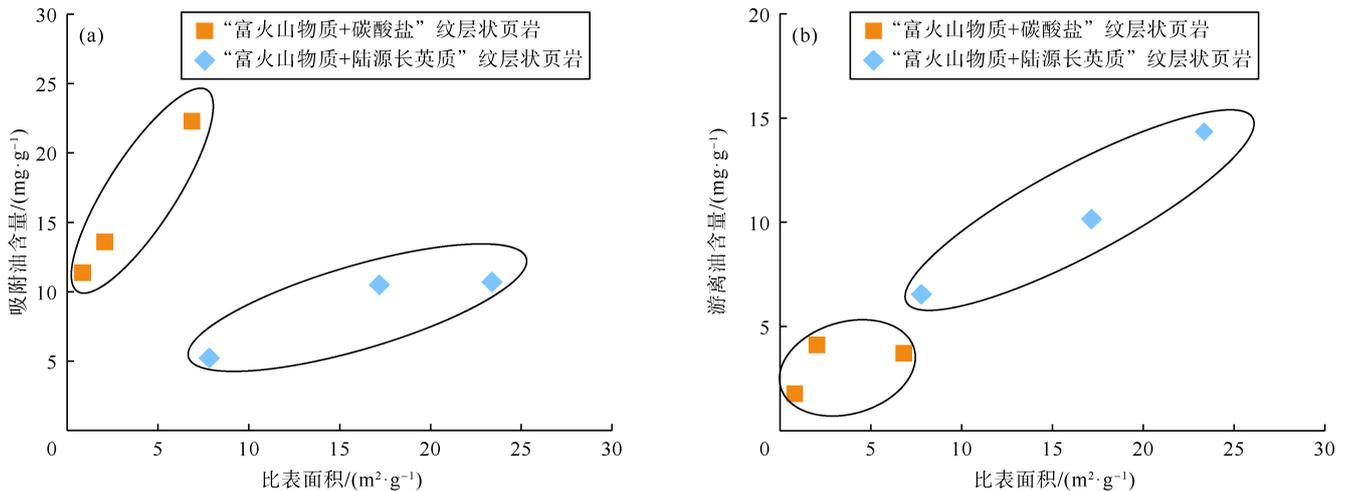


图 12 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩孔隙微观润湿性与页岩油赋存状态关系

征，油润湿组分含量小，孔隙比表面积较高，主要范围为 $10\sim 25\text{ m}^2/\text{g}$ ，但所控制的吸附态页岩油含量有限，含量为 $5\sim 10\text{ mg/g}$ （见图 12a），原油更多以游离态的形态赋存，并且游离油含量随比表面积增加而增加（见图 12b）。②对于孔隙主要呈油润湿特征的“富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩，在孔隙比表面积相对较低，范围为 $0\sim 10\text{ m}^2/\text{g}$ 时，仍具有较高含量的吸附油，集中分布于 $10\sim 25\text{ mg/g}$ （见图 12a），而游离油含量较低，并且游离油含量与比表面积无明显相关关系（见图 12b）。这是由于原油运移至孔隙中时，受到润湿性的影响，优先以吸附态的形式赋存在亲油基质颗粒表面。原油赋存状态在从向粘连态或游离态转变之前，需要满足颗粒表面吸附的油膜达到一定的厚度，使得原油足够克服固液两相界面之间的黏滞力；另一方面，由于孔隙周缘基质的油润湿性，原油充注的孔径下限变得更低，更小的孔隙成为原油充注且储存的空间，有

效储集空间的增大可以使原油能够附着的基质颗粒比表面积相应增大，油膜厚度在未达到原油克服黏滞力之前，更多倾向于铺展在油润湿基质表面。

6 结论

纹层类型及其组合特征影响吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩储集空间类型差异。“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩的储集空间以陆源长英质纹层中的长石溶蚀孔隙和粒间孔隙为主；“富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩储集空间以碳酸盐晶间孔隙和有机质孔隙为主。页岩储集空间周围的矿物类型及其分布影响孔隙微观润湿性特征。“富火山物质+陆源长英质”纹层状页岩的孔隙周缘接触组分主要为石英、长石及黏土矿物，呈亲水性特征；“富火山物质+碳酸盐”纹层状页岩则为碳酸盐矿物和有机质组分，呈亲油性特征。

页岩孔隙微观润湿性对原油的赋存具有明显的影

响, 孔喉周缘主要为油润湿碳酸盐矿物组分时, 利于原油的聚集。吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩中亲油性碳酸盐矿物组分在孔隙周围占比越高, 吸附油含量越高, 亲水性长石和石英组分占比越高, 游离油含量越高。芦草沟组页岩储集层中游离油主要赋存于陆源长英质纹层中, 原油成熟度较高、油质较轻。

参考文献:

- [1] 赵文智, 朱如凯, 胡素云, 等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1079-1089.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, HU Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1079-1089.
- [2] 葱克来, 李克, 操应长, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长₇亚段富有机质页岩纹层组合与页岩油富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1244-1255.
XI Kelai, LI Ke, CAO Yingchang, et al. Laminae combination and shale oil enrichment patterns of Chang₇ sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1244-1255.
- [3] ZHANG Y Y, XI K L, CAO Y C, et al. The application of machine learning under supervision in identification of shale lamina combination types: A case study of Chang₇ sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Science, 2021, 18(6): 1619-1629.
- [4] 支东明, 唐勇, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规-非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 38-51.
ZHI Dongming, TANG Yong, HE Wenjun, et al. Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 38-51.
- [5] XI K L, CAO Y C, LIU K Y, et al. Authigenic minerals related to wettability and their impacts on oil accumulation in tight sandstone reservoirs: An example from the Lower Cretaceous Quantou Formation in the southern Songliao Basin, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 178: 173-192.
- [6] 王忠楠, 罗晓容, 刘可禹, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组致密砂岩储层绿泥石对润湿性的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(7): 1123-1134.
WANG Zhongnan, LUO Xiaorong, LIU Keyu, et al. Impact of chlorites on the wettability of tight oil sandstone reservoirs in the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences, 2021, 64(6): 951-961.
- [7] 徐学敏, 杨佳佳, 孙玮琳, 等. 页岩油气勘探中热解分析与总有机碳预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(4): 22-29.
XU Xuemin, YANG Jiajia, SUN Weilin, et al. Pyrolysis analysis and total organic carbon prediction in shale oil and gas exploration[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(4): 22-29.
- [8] 李潮流, 闫伟林, 武宏亮, 等. 富黏土页岩储集层含油饱和度计算
- 方法: 以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1168-1178.
LI Chaoliu, YAN Weilin, WU Hongliang, et al. Calculation of oil saturation in clay-rich shale reservoirs: A case study of Qing 1 Member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1168-1178.
- [9] 杨智, 侯连华, 林森虎, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油、页岩油地质特征与勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(4): 76-85.
YANG Zhi, HOU Lianhua, LIN Senhu, et al. Geologic characteristics and exploration potential of tight oil and shale oil in Lucaogou Formation in Jimusar Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(4): 76-85.
- [10] 匡立春, 王霞田, 郭旭光, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油地质特征与勘探实践[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(6): 629-634.
KUANG Lichun, WANG Xiayan, GUO Xuguang, et al. Geological characteristics and exploration practice of tight oil of Lucaogou Formation in Jimusar Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(6): 629-634.
- [11] 支东明, 唐勇, 杨智峰, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 524-534.
ZHI Dongming, TANG Yong, YANG Zhifeng, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 524-534.
- [12] 葱克来, 操应长, 朱如凯, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层岩石类型及特征[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1495-1507.
XI Kelai, CAO Yingchang, ZHU Rukai, et al. Rock types and characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimusar Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1495-1507.
- [13] 曲长胜, 邱隆伟, 杨勇强, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组火山活动的环境响应[J]. 地震地质, 2019, 41(3): 789-802.
QU Changsheng, QIU Longwei, YANG Yongqiang, et al. Environmental response of the Permian volcanism in Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin, northwest China[J]. Seismology and Geology, 2019, 41(3): 789-802.
- [14] 毛翔, 李江海, 张华添, 等. 准噶尔盆地及其周缘地区晚古生代火山机构分布与发育环境分析[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2381-2391.
MAO Xiang, LI Jianghai, ZHANG Huatian, et al. Study on the distribution and developmental environment of the Late Paleozoic volcanoes in Junggar Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2381-2391.
- [15] 王璟明, 肖佃师, 卢双舫, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩储层物性分级评价[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 172-183.
WANG Jingming, XIAO Dianshi, LU Shuangfang, et al. Classification evaluation of shale oil reservoir physical properties in Lucaogou Formation, Jimusar Sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 172-183.
- [16] LIN M R, XI K L, CAO Y C, et al. Petrographic features and diagenetic alteration in the shale strata of the Permian Lucaogou Formation, Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 203: 108684.
- [17] ZHANG S M, CAO Y C, LIU K Y, et al. Characterization of lacustrine mixed fine-grained sedimentary rocks using coupled

- chemostratigraphic-petrographic analysis: A case study from a tight oil reservoir in the Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 99: 453-472.
- [18] 操应长, 朱宁, 张少敏, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层成岩作用与储集空间特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(3): 253-266.
CAO Yingchang, ZHU Ning, ZHANG Shaomin, et al. Diagenesis and reservicing space characteristics of tight oil reservoirs of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag of Junggar Basin, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(3): 253-266.
- [19] 田伟, 刘慧卿, 何顺利, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层岩石微观孔隙结构表征[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(4): 24-32.
TIAN Wei, LIU Huiqing, HE Shunli, et al. Characterization of microscopic pore structure of tight oil reservoirs in Lucaogou Formation, Jimusar Sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(4): 24-32.
- [20] ZINK K G, SCHEEDER G, STUECK H L, et al. Total shale oil inventory from an extended Rock-Eval approach on non-extracted and extracted source rocks from Germany[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 163: 186-194.
- [21] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(6): 842-849.
JIANG Qigui, LI Maowen, QIAN Menhui, et al. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence states and its application[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2016, 38(6): 842-849.
- [22] LIU K Y, EADINGTON P. Quantitative fluorescence techniques for detecting residual oils and reconstructing hydrocarbon charge history[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(7): 1023-1036.
- [23] 余志远, 章新文, 谭静娟, 等. 泌阳凹陷页岩油赋存特征及可动性研究[J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(1): 42-46.
YU Zhiyuan, ZHANG Xinwen, TAN Jingjuan, et al. Occurrence characteristics and mobility of shale oil in Biyang Sag[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2019, 33(1): 42-46.
- [24] PERNYESZI T, PATZKÓ Á, BERKESI O, et al. Asphaltene adsorption on clays and crude oil reservoir rocks[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1998, 137(1/2/3): 373-384.
- [25] BARCLAY S A, WORDEN R H. Geochemical modelling of diagenetic reactions in a sub-arkosic sandstone[J]. *Clay Minerals*, 2000, 35(1): 57-67.

第一作者简介: 蔻克来(1988-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院教授、博士生导师, 主要从事常规与非常规油气储集层地质学方面的教学和科研工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号, 邮政编码: 266580。E-mail: xikelai@upc.edu.cn
收稿日期: 2022-07-26 修回日期: 2023-02-06

(编辑 衣英杰)

(上接第284页)

- [15] 马新华, 杨雨, 文龙, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(1): 1-13.
MA Xinhua, YANG Yu, WEN Long, et al. Distribution and exploration direction of medium-and large-sized marine carbonate gas fields in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 1-13.
- [16] GAO Zhiqian, FAN Tailiang. Carbonate platform-margin architecture and its influence on Cambrian-Ordovician reef-shoal development, Tarim Basin, NW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68(Part A): 291-306.
- [17] 严威, 罗冰, 周刚, 等. 川中古隆起寒武系沧浪铺组下段天然气地质特征及勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(2): 290-302.
YAN Wei, LUO Bing, ZHOU Gang, et al. Natural gas geology and exploration direction of the Cambrian Lower Canglangpu Member in central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 290-302.
- [18] 曾富英, 杨威, 孙爱, 等. 四川盆地川中地区震旦系灯影组台地边缘相带地震识别及其分段特征[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1079-1086.
ZENG Fuying, YANG Wei, SUN Ai, et al. Seismic recognition and zonation of the platform margin facies of the Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1079-1086.
- [19] 刘艺妮, 胡明毅, 张三, 等. 碳酸盐缓坡沉积微相特征及其对储集层发育的制约: 以塔里木盆地古城地区中一下奥陶统为例[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 93-105.
LIU Yini, HU Mingyi, ZHANG San, et al. Characteristics and impacts on favorable reservoirs of carbonate ramp microfacies: A case study of the Middle-Lower Ordovician in Gucheng area, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 93-105.
- [20] 杨雨, 汪泽成, 文龙, 等. 扬子克拉通西北缘震旦系油气成藏条件及勘探潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(2): 238-248.
YANG Yu, WANG Zecheng, WEN Long, et al. Sinian hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential at the northwest margin of the Yangtze region, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 238-248.

第一作者简介: 曾富英(1979-), 女, 四川威远人, 硕士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事油气勘探与综合研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院石油天然气地质研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: zfy69@petrochina.com.cn

联系作者简介: 杨威(1971-), 男, 湖北天门人, 博士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事沉积储集层与油气地质综合研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院石油天然气地质研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: yangw69@petrochina.com.cn

收稿日期: 2022-11-13 修回日期: 2023-01-15

(编辑 谷江锐)