

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.415>



准噶尔盆地吉木萨尔凹陷致密油 储层纳米孔隙特征及其含油性

靳 军, 杨 召*, 依力哈木·尔西丁, 李璐璐, 刘 明

中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆克拉玛依 834000

摘要: 纳米技术在非常规油气致密储层微观孔隙结构表征、油气赋存等研究中发挥着重要的作用. 以准噶尔盆地东部吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层为例, 综合运用高压压汞分析、场发射扫描电镜及纳米 CT 扫描等纳米分析技术, 对吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层微纳米孔隙特征与结构进行研究, 并结合宏微观特征分析了原油在孔隙中的赋存状态. 结果表明: 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组储层为中低孔、特低渗储层, 孔隙以微纳米级为主, 类型多样, 主要有粒间孔(隙)、粒间溶孔、晶间孔及微裂隙等, 纳米孔隙是吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层主要储集空间之一, 纳米孔隙中普遍含油, 且多以吸附状态存在, 赋存在纳米孔隙中的油气, 改变了微米级孔隙是油气储层唯一微观孔隙的传统认识, 是未来石油工业的发展方向.

关键词: 纳米技术; 芦草沟组; 致密油储层; 纳米孔隙; 油气地质.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2018)05-1594-08

收稿日期: 2018-04-30

Nanopore Characteristics and Oil-Bearing Properties of Tight Oil Reservoirs in Jimsar Sag, Junggar Basin

Jin Jun, Yang Zhao*, Yilihamu·Erxiding, Li Lulu, Liu Ming

Research Institute of Experiment and Detection, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China

Abstract: Nanotechnology plays an important role in the study of microscopic pore structure characterization and hydrocarbon accumulation in unconventional oil and gas tight reservoirs. This paper takes the tight oil reservoir of Permian Lucaogou Formation Jimsar sag in eastern Junggar basin as an example, comprehensively using high pressure mercury analysis, field emission scanning electron microscope (SEM) and nano CT scanning analysis technology to study micronano pore characteristics and structure of Lucaogou Formation tight oil reservoir in Jimsar sag. In addition, the occurrence state of crude in nanopores is analyzed combined with macro and micro characteristics. The results show that nanopore space is one of the main reservoir spaces in the Permian Lucaogou Formation tight oil reservoir in Jimsar sag of Junggar basin. On the whole, the main reservoir pore structure is micron and nano level, showing the characteristics of micron and nano pore throat. Nanopores are generally oil-bearing, and exist mostly in the adsorption state, which changes the traditional cognition that micron pore is the only microscopic pore in reservoir. It is the development direction of the future petroleum industry.

Key words: nanotechnology; Lucaogou Formation; tight reservoir; nanometer pore; petroleum geology.

基金项目: 国家科技重大专项“准噶尔盆地致密油形成条件、资源潜力及有利区优选”(No.210017553003).

作者简介: 靳军(1970), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授级高工, 主要从事石油实验地质研究. E-mail: jinjun@petrochina.com.cn

*** 通讯作者:** 杨召, E-mail: yzhao_1027@163.com

引用格式: 靳军, 杨召, 依力哈木·尔西丁, 等. 2018. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷致密油储层纳米孔隙特征及其含油性. 地球科学, 43(5): 1594-1601.

0 引言

被石油工业誉为“黑金”的致密油储层作为非常规油气储层的主要类型之一,已成为继页岩气储层之后的又一“热点领域”与“亮点类型”(贾承造等, 2012a, 2012b; 邹才能等, 2012a, 2012b, 2012c; 郭秋麟等, 2013; 杨华等, 2013; 王社教等, 2014), 非常规油气资源越来越受到重视(李玉喜和张金川, 2011; 胡文瑞, 2012)。在新理论、新技术的创新推动下, 非常规油气勘探开发不断获得重大突破, 已成为全球油气供应的重要组成部分(贾承造等, 2012a; 邹才能等, 2012a, 2013), 也是未来油气增储上产的重要接替资源。因此, 致密油的研究和开发近年来受到广泛关注(邹才能等, 2010, 2013)。致密油的储层特征, 尤其是微观孔隙结构与常规低渗透储层有显著的差异, 给勘探和开发工作带来了一系列难题。而且致密油储层微观孔隙结构特征与油气赋存规律、成藏模式、渗流机理以及储层保护等关系密切(据宜文等, 2016), 运用纳米技术研究微观结构、油气赋存等是今后非常规储层勘探开发研究中的重要手段(Matteo *et al.*, 2012; 卢双舫等, 2016)。开展致密油藏不同岩性微观孔隙结构特征及可动用性研究具有十分重要的意义(熊生春等, 2017)。

中国致密油储层分布范围广, 类型多, 其储层石油地质资源量大, 具有良好的勘探前景(李建忠等, 2012; 赵靖舟, 2012)。其中, 准噶尔盆地东部的西南段吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组是致密油勘探开发的重点区块, 近年来勘探工作取得了重要突破, 已有多口井获得工业油流(向宝力等, 2013; 章敬等, 2013; 王成云等, 2014)。芦草沟组时期发育一套典型的源储一体、原位成藏致密油储层。地层岩性主要为一套沉积于咸化湖泊, 受机械沉积、化学沉积及生物沉积和热液喷流作用影响的粉细砂、泥、碳酸盐岩的细粒级混积岩。储层夹于互层分布的优质烃源岩层系中, 岩性多样, 非均质性强, 储层孔隙度主要为 3.07%~9.64%, 平均为 5.58%; 渗透率主要为 0.009~1.550 mD, 平均为 0.38 mD, 属于中低孔、超低渗储集层, 具有典型的致密油特征。微观孔隙结构特征是致密油储层研究的重要内容, 开展致密油储层微观孔隙结构特征研究, 对于发现有利勘探目标, 有效开展储层评价, 实施储层改造及储层保护, 实现致密油有效动用具有重大意义。

通过高压压汞、场发射扫描电镜及纳米 CT 扫描等分析技术, 分析吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油

储层的上、下两个“甜点体”的储层空间类型、分布及发育特征, 分析结果表明, 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储集空间可以分为原生孔隙、次生孔隙及裂缝 3 大类 11 小类。主要为粒间溶孔、剩余粒间孔、晶间孔及裂隙, 另外还发育了可观的微、纳米级孔隙, 且孔隙以纳米孔喉占主体。通过特殊的制样技术和扫描电镜相结合, 可以观察到纳米级别的孔隙微观特征, 如 FIB-SEM(离子束聚焦—扫描电镜)。通过扫描电镜可观察有机孔隙(杨永飞等, 2016), 通过高精度的 Micro-CT 或 Nano-CT 技术(Guillaume *et al.*, 2011)也可以实现纳米级别的微观孔隙观察和测试。因此, 厘清储层的微米级和纳米级孔隙, 对于认识储层的发育规律和空间特征、揭示致密油在微纳米孔隙中的运移机理、深化非常规油气勘探具有重要的现实意义(张天付等, 2012)。

1 样品采集与测试方法

1.1 实验样品

本文分别采吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组 5 口井, 共 20 个样品, 岩性主要为砂屑云岩、藻云岩、含凝灰质粉细砂岩、泥微晶白云岩、灰质粉细砂岩和富有机质泥岩, 分别做了铸体薄片、岩石薄片、高压压汞、场发射扫描电镜及纳米 CT 扫描分析。其中, 场发射扫描电镜及纳米 CT 扫描分析 7 个样品。

1.2 测试方法

高压压汞: 针对致密油特点, 在保证安全的情况下, 实验拓展了恒压压汞分析技术, 从常规的 20 MPa 提高到 160 MPa, 得到不同外部压力下进入样品中的汞体积, 描述储层微观孔隙结构特征。

场发射扫描电镜: 含场发射扫描模块和氩离子抛光模块, 通过成像的扫描方式, 获得纳米级二维系列图片, 然后利用三维重构和数值模拟软件, 提取储层岩石的微观孔隙和喉道, 模拟计算孔隙度、孔喉半径等孔喉结构表征参数。

微纳米 CT: 作为一种微纳米级的 X 射线无损探伤技术, 可对储层岩石的孔喉结构进行直观的三维雕刻和定量数值表征。实验过程中, 先钻取 3 mm 微小柱体, 然后通过 CT 扫描、三维数据重构获得三维数字岩心数据体, 并通过 VGStudio 软件提取孔隙系统, 定性刻画孔隙和喉道在三维空间的展布特征, 之后利用 e-core 数字岩心软件, 计算孔隙和喉道的量化表征参数。

2 吉木萨尔凹陷致密储层微观组成与结构特征

2.1 储层微观组成特征

经偏光显微镜分析,实验样品可分为砂屑云岩、藻云岩、含凝灰质粉细砂岩、泥微晶白云岩、灰质粉细砂岩和富有机质泥岩。

砂屑云岩:颗粒主要为白云石,含少量石英、长石,被亮晶方解石胶结(图 1a)。

藻云岩:主要由泥晶白云石与藻纹层混合而成(图 1b)。藻类的类型丰富多样,主要为蓝绿藻和硅藻。

泥微晶白云岩:主要由泥、微晶白云石组成(图 1c),常常含有少量方解石、长石、石英,白云石呈菱形晶体,大小为 5~20 μm 。

含凝灰质粉细砂岩:碎屑颗粒以长石为主,根据其含凝灰质和灰质含量的不同,又分为含凝灰质粉细砂岩(图 1d)和灰质粉细砂岩(图 1e)。凝灰物质主要为火山尘、玻屑和细小长石晶屑,碎屑颗粒被粘土

矿物或方解石胶结,可见有机质顺层分布。

富有机质泥岩:主要为含粉砂炭质泥岩、粉砂质藻泥岩、含云质粉砂质有机质泥岩及含凝灰质灰质泥岩,各类组分多呈纹层状富集分布(图 1f)。

2.2 储层微观结构特征

通过场发射扫描电镜及岩石薄片和铸体薄片分析,吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层的上、下两个“甜点体”的储层空间类型可以分为原生孔隙、次生孔隙及裂缝 3 大类 11 小类。其主要为粒间溶孔、剩余粒间孔、裂缝、晶间孔,另外还发育了可观的微、纳米级孔隙,且孔隙以纳米孔喉占主体。储层覆压下孔隙度平均为 11%,渗透率平均为 0.01 mD,小于 0.10 mD 样品占比达到 90% 以上。

3 吉木萨尔凹陷致密储层纳米孔隙特征

根据国际理论和应用化学协会(IUPAC)的孔隙分类,将孔隙定义为微孔隙($<2\text{ nm}$)、中孔隙($2\sim50\text{ nm}$)、宏孔隙($>50\text{ nm}$)。笔者分别通过高压压汞、场发射扫描电镜及纳米 CT 扫描等分析技术,分析吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层中纳米级孔隙特征。

3.1 致密油储层纳米孔隙特征

样品氩离子抛光后经场发射扫描电子显微镜观察、分析,孔隙大小一般为几纳米级~几十纳米,主要为晶间孔、溶蚀孔和有机孔,发育在芦草沟组泥粉晶白云岩、藻云岩和有机质中。

晶间孔:主要发育在泥粉晶白云岩中,是泥晶向微晶、细晶或中晶转化的过程中体积逐渐缩小而形成的孔隙,孔隙形状较规则(图 2a)。

溶蚀孔:主要发育在藻云岩、灰质粉细砂岩、砂屑云岩中,发育在藻云岩中的孔隙主要是藻类生烃后残余的孔隙,多顺层分布,呈三角状、长条状、针孔状、锯齿状、不规则片状等(图 2b,2c),发育在灰质粉细砂岩中的孔隙主要是方解石晶内溶孔(图 2d)。

有机孔:主要发育在富有机质泥岩、富有机质云岩中,为干酪根生烃消耗有机成分或消耗水分残余的孔隙,多呈不规则状分布(图 2e,2f)。

3.2 致密油储层纳米孔隙结构特征

根据吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组储层覆压下孔隙度、渗透率分析,“甜点体”储层总体表现为中低孔、特低渗特征。覆压下孔隙度平均 11%,渗透率

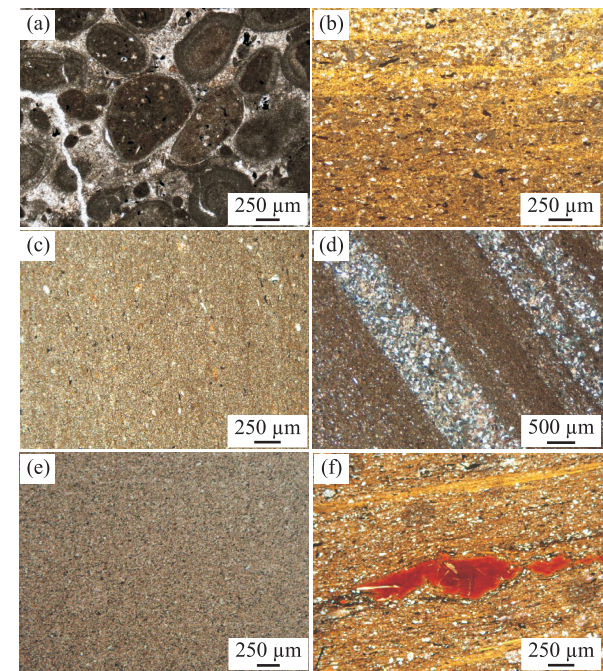


图 1 吉木萨尔凹陷岩石类型

Fig.1 The map of the rock types in the Jimsar depression
a.显微照片(单偏光,2.5 $\times$)吉 B 井,3 044.84 m,砂屑云岩;b.显微照片(荧光,2.5 $\times$)吉 A 井,3 290.44 m,藻云岩;c.显微照片(单偏光,2.5 $\times$)吉 A 井,3 115.40 m,泥微晶白云岩;d.显微照片(单偏光,1.25 $\times$)吉 C 井,3 271.74 m,凝灰质粉细砂岩;e.显微照片(正交偏光,2.5 $\times$)吉 D 井,3 271.74 m,灰质粉细砂岩;f.显微照片(单偏光,2.5 $\times$)吉 B 井,3 027.29 m,富有机质泥岩

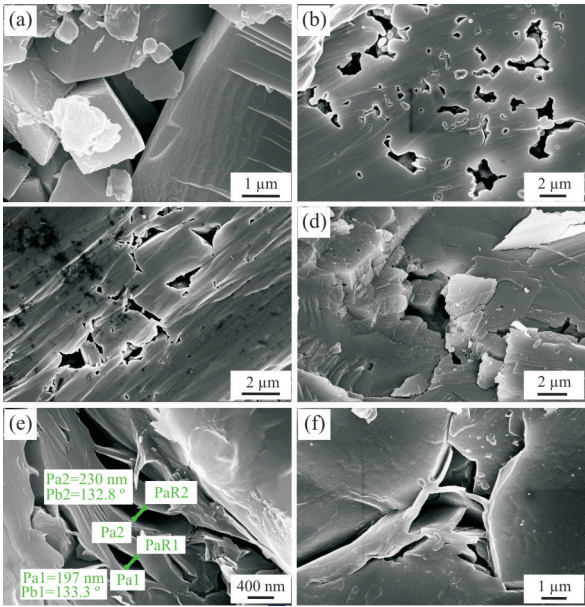


图 2 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组纳米孔隙特征图
Fig.2 Nanoporous characteristics of the Permian Lucaogou Formation in Jimsar depression

a.吉 B 井,3 152.82 m,微晶云岩,白云石晶间孔;b.吉 A 井,3 115.40 m,泥晶云岩,白云石晶间溶孔;c.吉 B 井,3 027.29 m,藻云岩,溶蚀孔;d.吉 B 井,3 297.75 m,灰质粉细砂岩,方解石晶内溶孔;e.吉 C 井,3 027.29 m,富有机质泥岩,有机孔;f.吉 A 井,3 290.44 m,藻云岩,有机孔

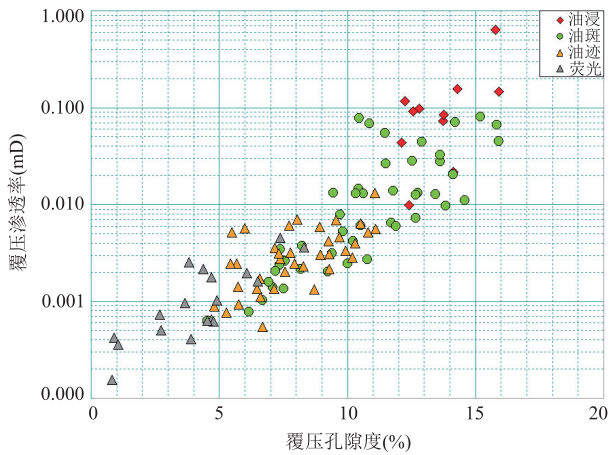


图 3 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组覆压孔隙度、渗透率分布
Fig.3 Cushion porosity and permeability of the Permian Lucaogou Formation in Jimsar depression

平均为 0.01 mD,小于 0.10 mD 样品占比达到 90% 以上,储层非均质性极强,不同含油级别覆压下孔隙度、渗透率分布见图 3。

根据吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组高压压汞实验资料分析,储层所需排驱压力较大,多在 0.1 MPa 以上,压汞曲线基本无平台,类型多为偏右上方的中

细歪度型。“上甜点”段孔喉半径分布较散,孔隙结构相对复杂,而“下甜点”段孔吼半径分布较集中,孔隙结构相对均质,储层孔喉分布范围广:1.00 nm~18.38 μm,跨度大,纳米级孔喉广泛分布(表 1 和图 4),含量在 55%~85%。从图 5 可看出,纳米级孔喉是主要孔喉体系,4.5~36.0 nm 的孔喉约占总孔喉的 70%;粉砂岩储层主要发育纳米级孔喉系统,少量微米级孔喉系统,其孔隙主要由纳米—微米级喉道控制;利用微纳米 CT 的三维扫描技术,对吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组岩心进行三维图像扫描,提取孔喉特征,获得样品孔喉结构在三维空间的分布状态,获取孔喉半径、孔隙连通性等定量参数(表 2,图 6),参数显示:纳米级孔喉是芦草沟组致密油储层的主要孔喉体系。

4 吉木萨尔凹陷致密储层纳米孔隙含油性特征

据录测井资料分析,吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组纵向上油气显示较为普遍,但油气相对富集(油浸、油斑级)的单层厚度较薄,一般都在 0.1~0.3 m,个别在 0.3~0.5 m,极个别大于 0.5 m。油气富集区岩性主要为砂屑云岩类、藻云岩、粉细砂岩。

据含油样品饱和度分析,甜点段储层含油性好,饱和度高(图 7),“中、上甜点”段样品的饱和度分布于 31.5%~75.5%，“下甜点”段云屑砂岩的饱和度分布于 64%~88%，“上、下甜点”段的饱和度虽有异,但饱和度总体均较高。

吉木萨尔凹陷芦草沟组“甜点”储层位于烃源岩层中,为源储一体、原位成藏油藏。油气来源于自身烃源岩。烃源岩主要为藻云岩和富有机质泥岩。研究中,运用场发射扫描电镜定量识别了致密油储层微米以及纳米级孔隙,实现了纳米孔中油膜在温度升高时发生的溶解、渗移现象的定量描述。利用氩离子抛光仪对吉木萨尔凹陷芦草沟组致密岩性样品进行抛光处理,然后在场发射扫描电镜下进行纳米级孔隙特征研究,可以看出储层发育纳米级晶间孔,晶间孔周围附着了一层膜,经能谱分析其成分为原油,并且在高电压电子束的轰击下,随着时间的推移,孔隙空间内油分子发生了溶解渗移使油膜变厚(图 8)。

吉木萨尔凹陷芦草沟组整体为咸化湖相细粒沉积,其岩石类型包括粉砂岩类、白云岩类、泥岩类夹薄层灰岩类和沉凝灰岩组合的混积岩。薄片分析发

表 1 芦草沟组“上、下甜点”段压汞参数

Table 1 Mercury injection parameters for the upper and lower dessert sections of Lucaogou Formation

甜点体	孔隙 体积 (μm ³)	有效 孔隙 度 (%)	渗透率 (mD)	均值	分选 系数	偏态	峰态	变异 系数	中值 压力 (MPa)	中值 半径 (μm)	排驱 压力 (MPa)	最大 孔喉 半径 (μm)	退汞 效率 (%)	孔喉 体积 比	平均 毛管 半径 (μm)	均质 系数	非饱和 孔隙体 积百分 数(%)
上甜点	1.367	12.029	0.177	13.059	2.108	0.762	2.393	0.165	29.308	0.073	4.064	0.789	24.359	3.428	0.237	0.230	16.831
下甜点	1.147	10.398	0.152	13.407	1.972	0.746	2.327	0.149	29.935	0.043	4.053	0.435	20.119	4.710	0.131	0.223	18.371

表 2 芦草沟组 CT 定量表征参数

Table 2 CT quantitative characterization parameter of Lucaogou Formation

体 积	孔隙度(%)	14.680	6.490	16.860	2.692	4.380
	孔喉体积(μm ³)	5.948	3.067×10 ⁷	8.004×10 ⁷	1.192×10 ⁷	2.070×10 ⁷
	连通体积(μm ³)	3.190	2.459×10 ⁷	7.742×10 ⁷	2.477×10 ⁶	3.150×10 ⁶
孔 隙	占总体积的		占总体积的	占总体积的	占总体积的	占总体积的
	53.63%		80.17%	96.73%	20.78%	15.22%
孔 隙	数量	349	3 045	4 040	8 714	19 465
	体积(μm ³)	5.084	2.704×10 ⁷	7.097×10 ⁷	1.010×10 ⁷	1.795×10 ⁷
	半径(nm)	平均:71 最小:7 最大:366	平均:4.934 最小:0.551 最大:55.070	平均:4.978 最小:0.477 最大:78.94	平均:2.704 最小:0.467 最大:24.68	平均:2.642 最小:0.456 最大:26.18
喉 道	连通性	3.0407	5.260	4.816	2.822	1.843
	数量	489	8 453	10 394	12 118	17 470
	体积(μm ³)	0.864	3.636×10 ⁶	9.075×10 ⁶	1.822×10 ⁶	2.751×10 ⁶
喉 道	半径(nm)	平均:47 最小:5 最大:157	平均:4.102 最小:0.450 最大:39.070	平均:4.347 最小:0.453 最大:57.46	平均:2.351 最小:0.45 最大:14.62	平均:2.227 最小:0.434 最大:14.44

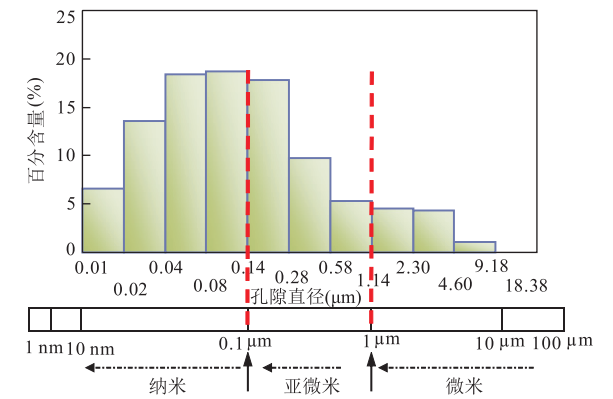


图 4 吉 C 井吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组孔喉分布直方图
Fig.4 Distribution of pore and throat distribution in the Permian Lucaogou Formation in Jimsar depression of Ji C Well

现,90%以上的岩石中都含有 3%~10%不等的方解石,因此岩心滴酸后内部的方解石发生溶蚀,纳米孔隙扩大,放置一定时间,吸附在纳米孔隙的原油渗出,肉眼可观察到原油从岩心中渗出现象(图 9)。

从宏、微观分析结果可以看出:纳米级孔隙中普遍含油,且原油多以吸附状态分布于纳米级孔隙中;这种原油的赋存形式与储层岩性及成藏方式有关。

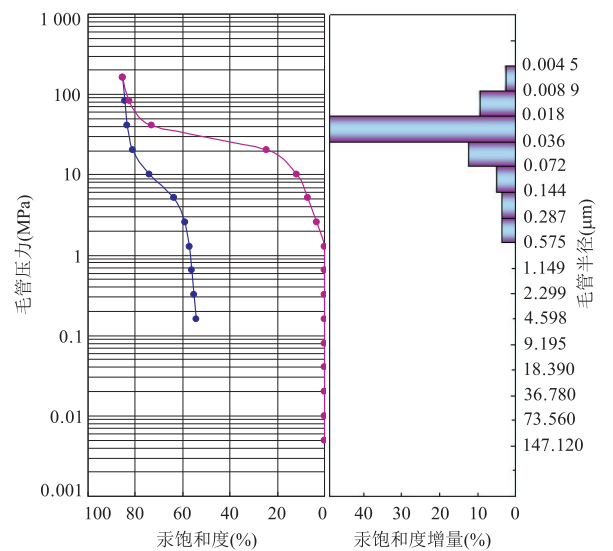


图 5 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组压汞曲线特征图
Fig.5 Mercury penetration curves of the Permian Lucaogou Formation in Jimsar depression

储层中高丰度优质烃源岩(藻云岩、富有机质泥岩)生烃后原位成藏,形成高含油饱和度吸附态储层。

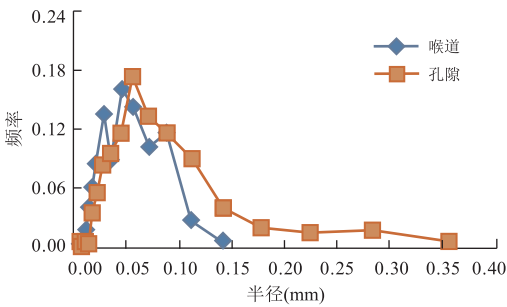


图 6 吉 A 井 3 271.74 m 含凝灰质藻云岩孔喉半径分布直方图

Fig.6 Distribution of pore-throat radius distribution histograms of algae and limestone rocks of Ji A well 3 271.74 m



图 7 吉 C 井云质粉细砂岩富含油岩心照片

Fig.7 Rock photos rich in oil core cloudy fine sandstone of Ji C well

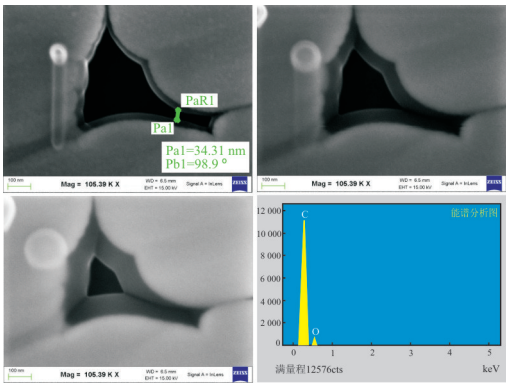


图 8 吉 C 井场发射扫描电镜下析出的油膜及油膜能谱分析图

Fig.8 Analysis of oil film and oil film energy spectrum precipitated by field emission scanning electron microscopy of Ji C well

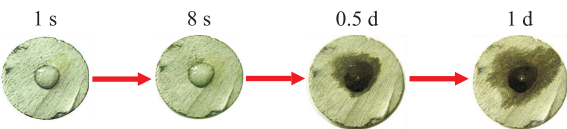


图 9 云质粉砂岩岩心滴酸放置一定时间后含油情况变化

Fig.9 Changes in oil content after a certain period of time cloudy siltstone

5 结论

以准噶尔盆地东部吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层为例,综合高压压汞分析、场发射扫描电镜及纳米 CT 扫描等分析技术,对吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层微纳米孔隙研究显示:

(1)吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组储层为中低孔、特低渗储层,孔隙类型多样,以微纳米级为主,主要有粒间孔(缝)、粒间溶孔、晶间孔、层间缝及微裂隙等。

(2)吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层不同岩性孔隙系统不同,粉砂岩类储层主要发育纳米级孔喉系统,少量微米级孔喉系统,其孔隙主要由纳米—微米级喉道控制;微泥晶云岩、藻云岩、富含有机质泥岩储层主要发育纳米级孔喉系统,其孔隙主要由纳米级喉道控制。总体上储层孔隙结构以微米级、微米—纳米级为主,呈现出微米孔隙、纳米喉道的特征。

(3)纳米孔隙是储层主要储集空间之一,纳米孔隙中普遍含油,且多以吸附状态存在。

致谢:在论文撰写和修改过程中感谢中国科学院大学琚宜文教授提出的建设性的意见,同时感谢各实验室样品测试人员在研究过程中给予的支持和帮助!

References

Guillaume,D., Janos, L. U., Peter, A. K., et al., 2011. High-Resolution 3D Fabric and Porosity Model in a Tight Gas Sandstone Reservoir: A New Approach to Investigate Microstructures from mm- to nm-Scale Combining Argon Beam Cross-Sectioning and SEM Imaging. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 78: 243—257.

Guo,Q.L.,Chen,N.S.,Wu,X.Z., et al., 2013. Method for Assessment of Tight Oil Resources. *China Petroleum Exploration*, 18(2): 67—76 (in Chinese with English abstract).

Hu,W.R., 2012. Resources, Status Quo, Problems and Solutions of Unconventional Natural Gasin China. *Oil Forum*, 31(6): 1—5 (in Chinese with English abstract).

Jia,C. Z., Zheng, M., Zhang, Y. F., et al., 2012a. Unconventional Hydrocarbon Resources in China and the Prospect of Exploration and Development. *Petroleum Exploration and Development*, 39(2): 129—136 (in Chinese with English abstract).

Jia,C.Z.,Zou,C.N.,Li,J.Z., et al., 2012b. Assessment Crite-

- ria, Main Types, Basic Features and Resource Prospects of Tight Oil in China. *Acta Petrolei Sinica*, 33 (3): 343—350 (in Chinese with English abstract).
- Ju, Y. W., Qi, Y., Fang, L. Z., et al., 2016. China Shale Gas Reservoir Types and Its Controlling Factors. *Advances in Earth Science*, 31(8): 782—799.
- Li, J. Z., Zheng, M., Zhang, G. S., et al., 2012. Potential and Prospects of Conventional and Unconventional Natural Gas Resource in China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(Suppl. 1): 89—98 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. X., Zhang, J. C., 2011. The Type and Potential of Unconventional Oil and Gas Resources in China. *International Petroleum Economics*, (3): 61—65 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. F., Zhang, Y. N., Li, J. G., et al., 2016. Nanotechnology and Its Application in the Exploration and Development of Unconventional Oil and Gas. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35 (1): 28—33 (in Chinese with English abstract).
- Matteo, C., Canddido, P., Vera, R., et al., 2012. Current and Future Nanotech Applications in the Oil Industry. *American of Applied Sciences*, 9(6): 784—793.
- Wang, C. Y., Kuang, L. C., Gao, G., et al., 2014. Difference in Hydrocarbon Generation Potential of the Shaly Source Rocks in Jimusar Sag, Permian Lucaogou Formation. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32 (2): 385—390 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. J., Wei, Y. J., Guo, Q. L., et al., 2014. New Advance in Resources Evaluation of Tight Oil. *Acta Petrolei Sinica*, 35 (6): 1095—1105 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, B. L., Liao, J. D., Zhou, N., et al., 2013. Organic Geochemical Features of Permian Source Rock from Lucaogou Formation in Jil74 of Jimusar Depression. *Science Technology and Engineering*, 32(13): 9636—9640 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, S. C., Chu, S. S., Pi, S. H., et al., 2017. Micro-Pore Characteristics and Recoverability of Tight Oil Reservoirs. *Earth Science*, 42 (8): 1379—1385 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Li, S. X., Liu, X. Y., 2013. Characteristics and Resource Prospects of Tight Oil and Shale Oil in Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 34(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. F., Wang, C. C., Yao, J., et al., 2016. A New Method for Microscopic Pore Structure Analysis in Shale Matrix. *Earth Science*, 41(6): 1067—1073 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Li, J. Q., Shi, X. C., et al., 2013. Fracturing Technology for Dense Oil Reservoirs in Jimusar Sag: Probe and Practice. *Xinjiang Petroleum Geology*, 34 (6): 710—712 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T. F., Shou, J. F., Zheng, X. P., et al., 2012. Spatial Distribution and Characterization of Pore and Throat of Oolitic Dolostone of the Lower Triassic Feixianguan Formation in Northeastern Sichuan Province. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 14(2): 187—196 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. Z., 2012. Conception, Classification and Resource Potential of Unconventional Hydrocarbons. *Natural Gas Geoscience*, 23(3): 393—406 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Tao, S. Z., Yang, Z., et al., 2012a. New Advance in Unconventional Petroleum Exploration and Research in China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31 (4): 312—322 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Yang, Z., Tao, S. Z., et al., 2012b. Nano-Hydrocarbon and the Accumulation in Coexisting Source and Reservoir. *Petroleum Exploration and Development*, 39 (1): 13—26 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhu, R. K., Wu, S. T., et al., 2012c. Types, Characteristics, Genesis and Prospects of Conventional and Unconventional Hydrocarbon Accumulations: Taking Tight Oil and Tight Gas in China as an Instance. *Acta Petrolei Sinica*, 33 (2): 173—180 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhang, G. S., Yang, Z., et al., 2013. Geological Concepts, Characteristics, Resource Potential and Key Techniques of Unconventional Hydrocarbon: On Unconventional Petroleum Geology. *Petroleum Exploration and Development*, 40 (4): 385—399 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhang, G. Y., Tao, S. Z., et al., 2010. Geological Features, Major Discoveries and Unconventional Petroleum Geology in the Global Petroleum Exploration. *Petroleum Exploration and Development*, 37 (2): 129—145 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 郭秋麟, 陈宁生, 吴晓智, 等, 2013. 致密油资源评价方法研究. 中国石油勘探, 18(2): 67—76.
- 胡文瑞, 2012. 我国非常规天然气资源、现状、问题及解决方案. 石油科技论坛, 31(6): 1—5.
- 贾承造, 郑民, 张永峰, 2012a. 中国非常规油气资源与勘探开发前景. 石油勘探与开发, 39(2): 129—136.
- 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等, 2012b. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景. 石油学报, 33(3): 343—350.
- 据宜文, 戚宇, 房立志, 等, 2016. 中国页岩气的储层类型及其

制约因素.地球科学进展,31(8): 782—799.

李建忠,郑民,张国生,等,2012.中国常规与非常规天然气资源潜力及发展前景.石油学报, 33(增刊 1): 89—98.

李玉喜,张金川,2011.我国非常规油气资源类型和潜力.国际石油经济,(3): 61—65.

卢双舫,张亚念,李俊乾,等,2016.纳米技术在非常规油气勘探开发中的应用.矿物岩石地球化学通报,35(1): 28—33.

王成云,匡立春,高岗,等,2014.吉木萨尔凹陷芦草沟组泥质岩类生烃潜力差异性分析.沉积学报,32(2): 385—390.

王社教,蔚远江,郭秋麟,等,2014.致密油资源评价新进展.石油学报,35(6): 1095—1105.

向宝力,廖健德,周妮,等,2013.吉木萨尔凹陷吉 174 井二叠系芦草沟组烃源岩地球化学特征.科学技术与工程,32(13): 9636—9640.

熊生春,储莎莎,皮淑慧,等,2017.致密油藏储层微观孔隙特征与可动用性评价.地球科学,42(8): 1379—1385.

杨华,李士祥,刘显阳,等,2013.鄂尔多斯盆地致密油页岩油特征及资源潜力.石油学报,34(1): 1—11.

杨永飞,王晨晨,姚军,等,2016.页岩基质微观孔隙结构分析新方法.地球科学,41(6): 1067—1073.

章敬,李佳琦,史晓传,等,2013.吉木萨尔凹陷致密油层压裂工艺探索与实践.新疆石油地质,34(6): 710—712.

张天付,寿建峰,郑兴平,等,2012.川东北下三叠统飞仙关组鲕粒白云岩孔喉的空间展布与刻画.古地理学报,14(2): 187—196.

赵靖舟,2012.非常规油气有关概念、分类及资源潜力.天然气地球科学,23(3): 393—406.

邹才能,陶士振,杨智,等,2012a.中国非常规油气勘探与研究新进展.矿物岩石地球化学通报,31(4): 312—322.

邹才能,杨智,陶士振,等,2012b.纳米油气与源储共生型油气聚集.石油勘探与开发,39(1): 13—26.

邹才能,朱如凯,吴松涛,等,2012c.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例.石油学报,33(2): 173—180.

邹才能,张国生,杨智,等,2013.常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学.石油勘探与开发,40(4): 385—399.

邹才能,张光亚,陶士振,等,2010.全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质.石油勘探与开发,37(2): 129—145.