

陆相盆地不同岩性页岩含油性及可动性比较

——以渤海湾盆地东营凹陷古近系沙四上亚段为例

李 政

(1. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015;
2. 国家能源页岩油研发中心, 山东 东营 257015)

摘要: 根据矿物组成特征, 将渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段页岩划分为 2 类岩性: 灰质泥岩和泥质灰岩。利用 X 衍射分析、镜下观察、地化分析、孔隙度测试及压汞分析等技术手段, 探讨了该区不同岩性页岩在有机质丰度、含油性、储集性特征和页岩油可动条件方面的差异。灰质泥岩比泥质灰岩具有相对更高的有机质丰度和更好的含油性; 灰质泥岩具有相对较高的孔隙度, 但孔喉一般偏小, 而泥质灰岩孔隙度相对较低, 但大孔隙喉道更为发育。从含油饱和度指数、矿物对原油的吸附能力、黏土矿物的转化程度方面比较灰质泥岩和泥质灰岩中页岩油的可动性, 认为泥质灰岩中的页岩油比灰质泥岩中的页岩油具有更好的可动性条件。

关键词: 陆相页岩; 页岩油; 含油性; 可动性; 混积岩; 东营凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Comparison of oil-bearing properties and oil mobility of shale with different lithologies in continental basins:

a case study of the upper fourth member of Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

LI Zheng

(1. Exploration and Development Research Institute of SINOPEC Shengli Oilfield Branch Company, Dongying, Shandong 257015, China; 2. State Energy Center for Shale Oil Research and Development, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: The shale in the upper part of the 4th member of Paleogene Shahejie Formation in the Dongying Sag of Bohai Bay Basin can be divided into two lithology types: calcareous mudstone and argillaceous limestone. The differences of organic matter abundance, oil-bearing properties, reservoir properties and movable shale oil in the different lithologies were investigated using X-ray diffraction, microscopic observation, geochemical analysis, porosity tests and mercury injection. The calcareous mudstone has relatively higher organic matter abundance and better oil-bearing properties than the calcareous mudstone. The calcareous mudstone has relatively higher porosity, but the pore throats are generally smaller, while the argillaceous limestone porosity is relatively lower with more large pore throats. The shale oil mobility in the calcareous mudstone and argillaceous limestone was compared using the oil saturation index, mineral adsorption capacity for crude oil and clay mineral transformation degree. The shale oil in the argillaceous limestone has better mobility than the shale oil in the calcareous mudstone.

Key words: continental shale; shale oil; oil-bearing property; mobility; migmatite; Dongying Sag; Bohai Bay Basin

黏土矿物、碳酸盐矿物和长英质矿物是陆相页岩中的 3 大类主要矿物, 陆相湖盆中此 3 大类矿物不同比例的混积, 形成了陆相页岩的多样性特征。

前人根据页岩的矿物成分、结构、构造及有机质丰度等, 将陆相页岩进行了岩相划分^[1-5], 并应用于中部、东部陆相盆地页岩油研究, 认为渤海湾盆地

收稿日期: 2020-03-22; 修订日期: 2020-06-22。

作者简介: 李政(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事油气地球化学综合研究工作。E-mail: lizheng761.slyt@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05049-004, 2016ZX05006-001)、中国石化科技攻关课题(P19017-6)和胜利油田分公司科技项目(YKK1919)联合资助。

济阳拗陷页岩主要分为7类:富有机质纹层状泥质灰岩相、富有机质纹层状灰质泥岩相、富有机质层状泥质灰岩相、富有机质层状灰质泥岩相、含有机质纹层状泥质灰岩相、含有机质层状泥质灰岩相和含有机质块状泥岩相。上述不同的岩相实则是黏土、碳酸盐和长英质3类矿物在不同环境下不同形式的混积产物。3类矿物混积形式的不同,直接影响页岩中有机质的赋存关系、页岩对原油的吸附能力及岩石的脆性,从而导致页岩油的可动性明显不同。本文以东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段(E_{s4}^+)页岩为例,探讨不同矿物组成页岩的有机质丰度、含油性、储集性及内部页岩油的可动性的差异。

1 地质概况

东营凹陷为渤海湾盆地济阳拗陷的次级负向构造单元,为中国中生代典型的富油凹陷代表,总体上呈现“北断南超、北深南浅”的箕状结构。东营凹陷古近系页岩主要发育在沙河街组沙四上亚段、沙三下亚段和沙一段。

沙四段沉积时期,湖水具有较高的盐度,含有较多的嗜盐微生物,且由于湖水具有较稳定的盐度和密度分层,底水为富硫的强还原条件^[6-7],有机质保存条件较好,从而形成了沉积于咸水—盐湖环境湖相富含有机质的泥页岩。该层段页岩厚度一般为100~400 m,为东营凹陷油气的主要源岩之一,其本身也蕴藏着大量的页岩油资源^[5-6]。

2 页岩矿物组成特征及岩性分类

根据东营凹陷沙四上亚段890块页岩样品统计数据显示,矿物成分主要为黏土、碳酸盐矿物、石英等,其次有斜长石、钾长石、黄铁矿和菱铁矿等(表1)。不同页岩样品的主要矿物,即黏土、碳酸盐矿物、石英和长石含量差异较大。

东营凹陷樊页1井沙四上亚段页岩样品的全

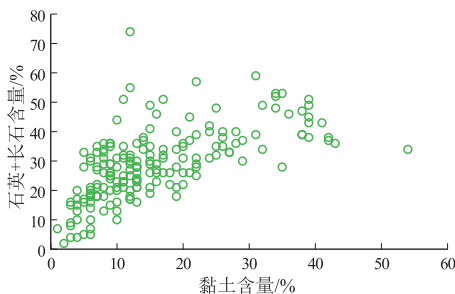


图1 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段页岩3类主要矿物含量的关系

表1 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段页岩全岩矿物组成统计

Table 1 Whole rock mineral composition of shale in upper E_{s4} in Dongying Sag, Bohai Bay Basin %

矿物	含量	平均值
黏土	3~73	24
石英	0~66	28.5
长石	0~42	4.9
方解石	0~89	33.9
白云石	0~87	7.8
菱铁矿	0~12	0.3
黄铁矿	0~14	2.3

岩及黏土矿物X衍射分析数据表明,在沙四上亚段3类主要矿物(黏土、碳酸盐矿物、长英质矿物)中,碳酸盐矿物含量与黏土矿物含量呈负相关关系,而长英质矿物含量则与黏土矿物呈正相关关系(图1),说明长英质矿物与黏土矿物均主要来自陆源碎屑。在岩心上,碳酸盐矿物与陆源碎屑含量的频繁波动,指示着沉积环境的频繁变化^[8]。陆源碎屑供给充足时,黏土矿物含量和石英、长石含量相对较高,而在陆源碎屑供给量相对较少时,则碳酸盐矿物含量相对较高。

由于东营凹陷沙四上亚段页岩中,石英和长石粒径一般较小,大多为泥级颗粒,并且石英和长石颗粒与黏土矿物具有亲缘性。因此将沙四上亚段页岩划分为2类典型岩性,即灰质泥岩(碳酸盐矿物含量低于50%,黏土、长英质矿物含量高于50%)和泥质灰岩(黏土、长英质矿物总含量低于50%,碳酸盐矿物含量大于50%)。

3 不同岩性页岩有机质丰度及含油性

3.1 页岩有机质微观赋存特征

在显微镜下观察,不管是灰质泥岩还是泥质灰岩,大多有明显的层状或纹层状构造,多为碳酸盐层与黏土层的互层。对于不同的样品,黏土矿物和

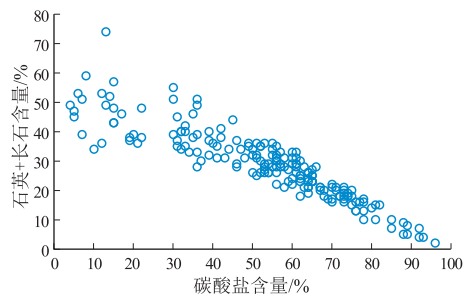


Fig.1 Relationship between contents of three main minerals in shale in upper E_{s4} in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

碳酸盐矿物含量不同,表现为不同矿物薄层的厚度不同。对于灰质泥岩来说,黏土矿物层相对较厚,并在黏土矿物层中混杂较多的陆源碎屑(长石和石英等),而碳酸盐矿物层相对较薄(图2a)。对于泥质灰岩来说,碳酸盐矿物层相对较厚,黏土矿物层相对较薄(图2b)。

通过对页岩薄片的透射光观测和荧光观测结果对比,可以确定有机质在页岩中的赋存特征。一般在黏土矿物纹层中,可以观察到强烈的荧光显示,以及大量的生烃母质(包括藻类等);而在碳酸盐矿物富集的纹层中,荧光相对较弱(图2c-f)。这说明页岩中的生烃母质大多赋存在黏土矿物纹层内,即沉积有机质大多与黏土矿物共生。有文献也认为黏土矿物对沉积有机质有较强的亲和力,并对沉积后的有机质保存起着积极作用^[9-11]。而碳酸盐矿物纹层中有机质相对较少,也说明这些页岩中的碳酸盐矿物大多为非生物成因,主要为化学沉积成因。尽管沉积有机质一般赋存于黏土矿物纹层中,但黏土矿物的含量不是决定生烃母质丰度的主要因素,因为岩石整体的有机质丰度取决于古生产力、氧化还原环境及无机矿物的沉积速率等。如纯372井2568m页岩中,尽管黏土矿物纹层相对较薄(图2e),但在荧光下可见黏土矿物纹层中具有明显的藻类富集(图2f)。

3.2 有机质丰度比较

统计东营凹陷樊页1井沙四上亚段有机质丰度与黏土矿物和碳酸盐矿物含量的关系,同样的黏

土矿物含量或同样的碳酸盐矿物含量,其有机质丰度差异较大。但有机质丰度(TOC含量)总体上与黏土矿物含量呈正相关关系(图3a),而与碳酸盐矿物含量呈负相关关系(图3b),也进一步说明黏土矿物与有机质的共存关系。从图3b可以看出,泥质灰岩总体上有机质丰度略低于灰质泥岩。但泥质灰岩仍可能具有较高的有机质丰度,甚至在碳酸盐矿物含量大于90%时,有机质丰度仍然可以达到2%。

3.3 含油量的比较

岩石的热解参数 S_1 可近似表征页岩中含油量的相对多少^[12]。樊页1井沙四上亚段页岩的热解 S_1 总体上随黏土矿物含量升高而增加,其最大值也是随黏土矿物含量升高而增加;而随着碳酸盐矿物含量增加,热解 S_1 总体变小,其最大值也降低(图3c,d)。但在相同的黏土矿物含量或相同的碳酸盐矿物含量的情况下,热解参数 S_1 本身差异较大,究其原因,含油量的多少不仅取决于其本身的有机质丰度和生烃量,也取决于储集空间的大小以及生成的页岩油的排出条件等。一般来说,灰质泥岩比泥质灰岩具有更好的含油性。

4 不同岩性页岩的储集性对比

4.1 总孔隙度对比

对东营凹陷页岩进行GRI孔隙度测定^[12-14]和全岩矿物X衍射分析,GRI孔隙度与矿物、有机质含量关系如图4所示。总体上,孔隙度随着黏土、

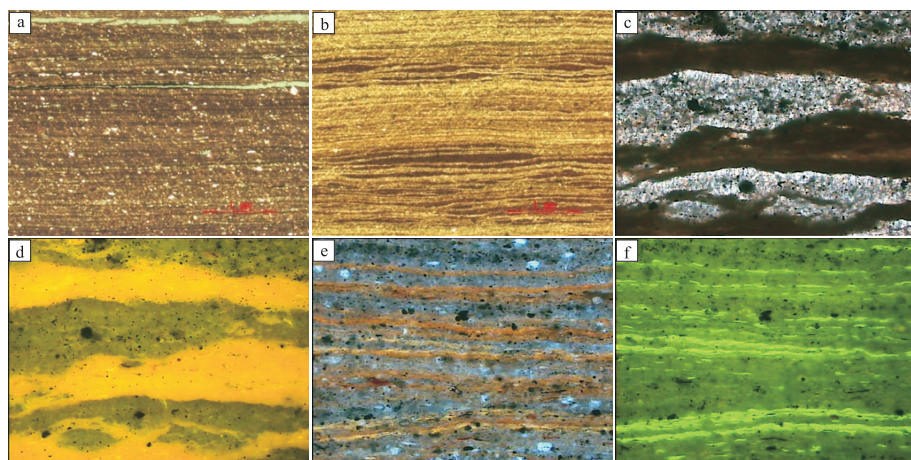


图2 渤海湾盆地东营凹陷页岩有机质和不同矿物的依存关系

a.灰质泥岩,牛页1井,3374.19m,单偏光,深褐色为黏土矿物与有机质混合层;b.泥质灰岩,牛页1井,3318m,单偏光,亮色为方解石层,褐色为黏土矿物与有机质混合层;c和d分别为纯372井页岩单偏光和荧光原位对比照片,c中的深褐色对应d中的橙黄色荧光,为黏土和富有机质层,荧光分布均匀,很难识别出藻类残体结构,可能因藻类为菌类进一步改造,以菌类为主,c中的亮白色对应d中的弱荧光部分,为原生方解石层;e和f分别为纯372井2568m页岩的单偏光和荧光原位对比照片,e中的黄褐色层对应f中的高强度亮绿色荧光部分,为黏土与有机质的富集层,亮绿色荧光部分为藻类富集带,e中的蓝色部分对应f中荧光较弱区域,为原生方解石薄层,弱荧光来自于有机质富集层烃类的侵染

Fig.2 Occurrence of organic matter in different mineral layers in shale, Bohai Bay Basin

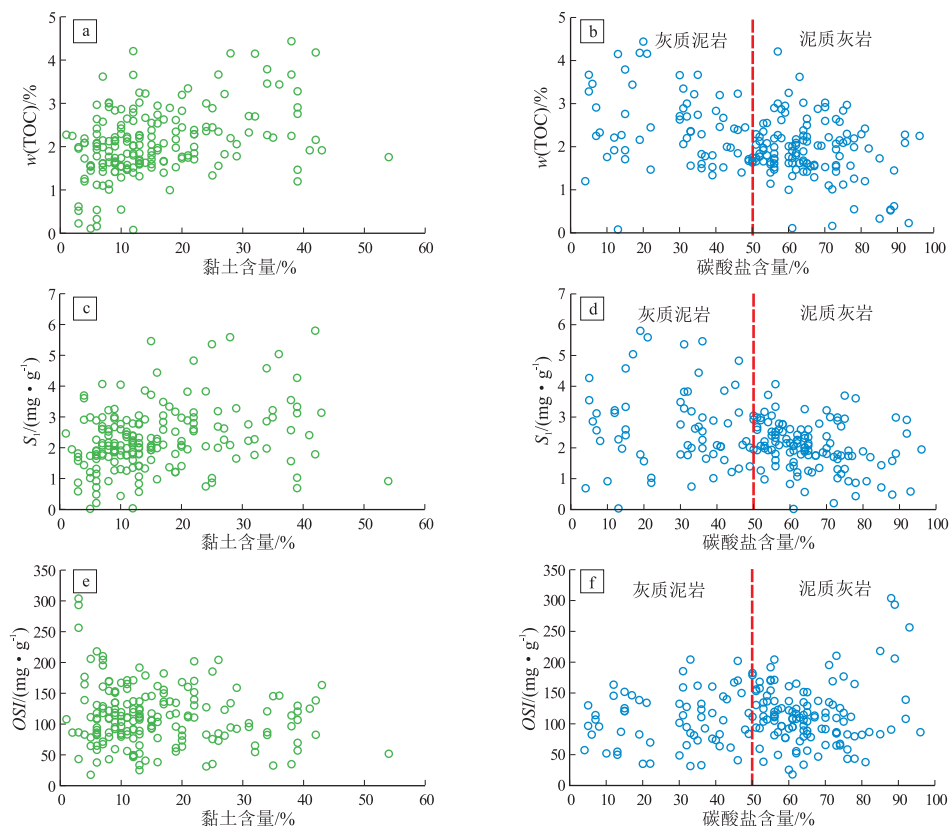


图 3 渤海湾盆地东营凹陷樊页 1 井沙四上亚段页岩有机地化参数与矿物含量关系

Fig.3 Relationship between organic geochemical parameters and mineral content of shale in upper Es₄, well Fanye 1, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

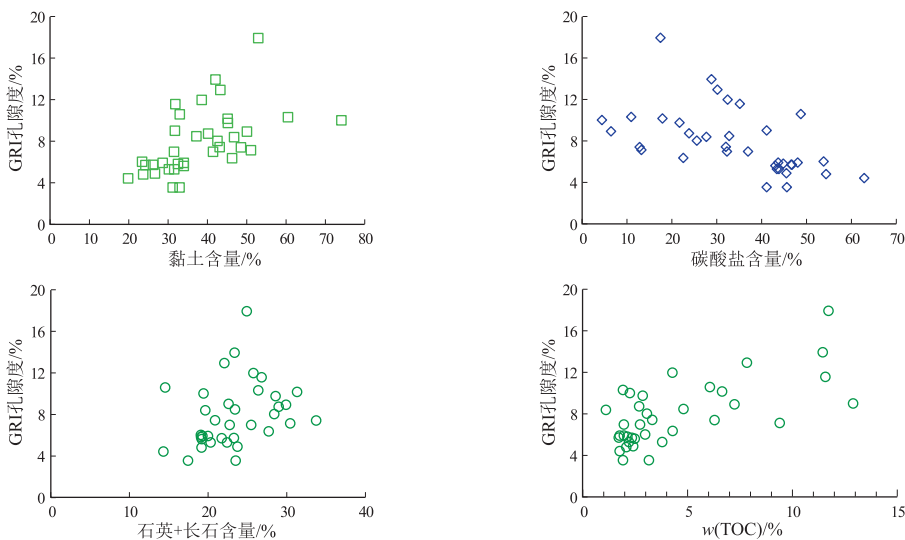


图 4 渤海湾盆地东营凹陷页岩 GRI 孔隙度与主要矿物及有机质含量关系

Fig.4 Relationship between GRI porosity and main mineral and organic matter contents in shale, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

长英质矿物含量和 TOC 含量的增加均明显增加;但随着碳酸盐矿物含量的增加而明显降低。由于页岩中的长英质矿物含量与黏土含量正相关(图 1),并且页岩中的石英和长石颗粒多分散于黏土矿物中,不易形成石英、长石矿物颗粒的粒间缝,因此孔隙度随长英质矿物含量增加而增加的现象并

非只是长英质矿物发育导致的孔隙度增加,而同样反映了黏土矿物中更容易发育孔隙。孔隙度与 TOC 的正相关关系表明,有机质的发育对孔隙度的发育具有明显的促进作用。由于有机质一般与黏土矿物共存(图 2a,3a),因此随着黏土矿物含量的增加,有机质的增孔作用也会越明显。

总之,孔隙度与黏土矿物、TOC 的正相关关系,与碳酸盐矿物含量的负相关关系表明,灰质泥岩总孔隙度要高于泥质灰岩。

4.2 孔隙结构对比

在扫描电镜下,可观察同一页岩样品中的泥质和灰质条带孔隙发育特征。总体上在泥质条带上,孔隙数量发育较多,并多呈不规则状;而在灰质条带中,孔隙数量发育相对较少(图 5a,b)。大多的泥质条带内发育有机质,其有机质中也必然发育或多或少的较为细小的有机孔隙。另外,在黏土矿物中也存在着大量的黏土矿物片间孔,这些都能解释 GRI 孔隙度总体随着黏土矿物含量的增加而升高

的现象。

尽管在页岩中的碳酸盐矿物薄层内,除了部分白云石外,大多孔隙较少,且分布相对不均匀,但這些碳酸盐矿物薄层内发育的孔隙一般较大,包括部分由于酸性流体活动而形成的溶蚀孔等(图 5c)。在部分页岩内的碳酸盐矿物薄夹层中,还发育晶间缝、裂隙等,这些晶间缝及裂隙在酸性流体作用下,更容易形成孔缝网络(图 5d),成为页岩油的有效储集空间或渗流通道。

典型的灰质泥岩和泥质灰岩的孔径结构特征在高压压汞^[12]所得的孔径分布曲线上可看出明显的差异。图6为同一口井相近深度的灰质泥岩和

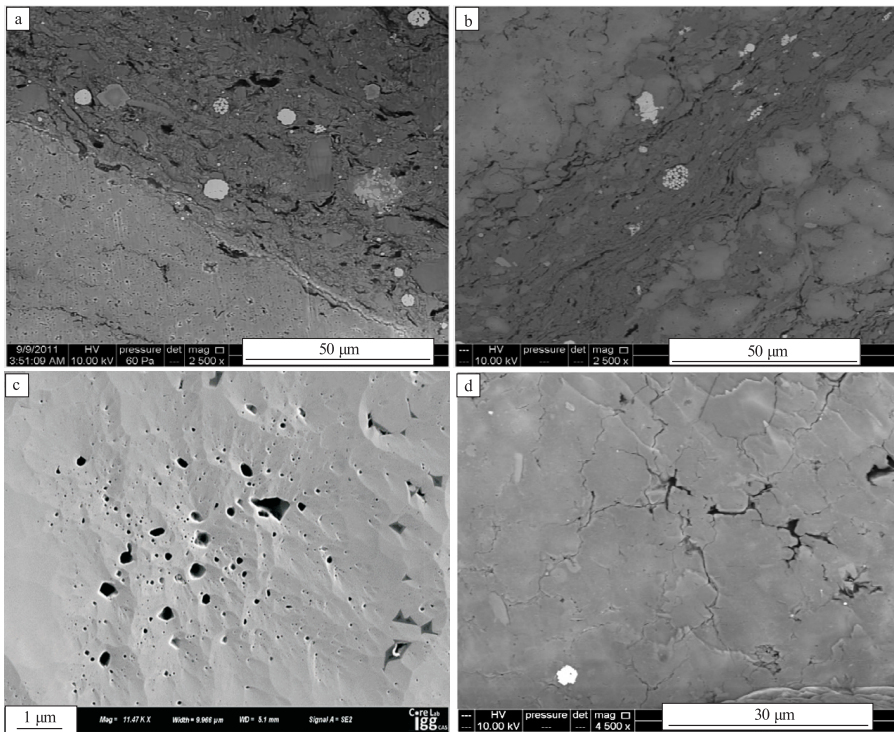


图5 渤海湾盆地东营凹陷页岩不同矿物中孔隙发育特征

a.牛 872 井,3 199.4 m,与碳酸盐矿物薄层相比,泥质薄层内发育更多的孔隙,孔隙多为有机质充填;b.王 584 井,3 608.7 m,中间的泥质条带比两侧的碳酸盐条带中发育更多的孔隙;c.利页 1 井,3 672.86 m,页岩中的方解石夹层,发育大量溶蚀孔,孔壁圆滑;d.利 89 井,3 387 m,页岩中的白云岩夹层,晶间孔、缝发育,孔缝溶蚀扩大化,形成有效的孔缝连通的体系

Fig.5 Pore characteristics of different minerals in shale, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

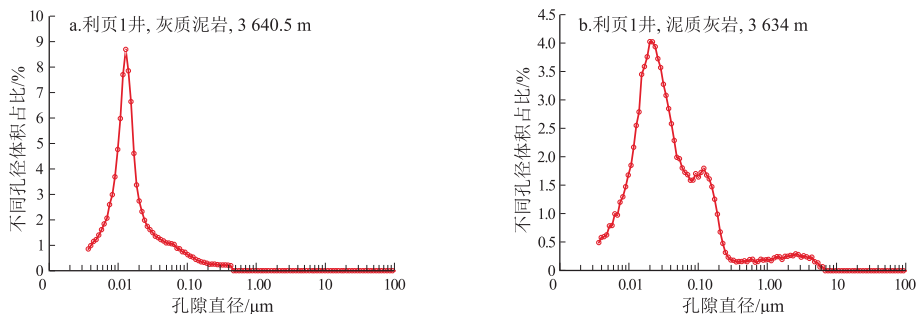


图6 渤海湾盆地东营凹陷不同岩性页岩的压汞分析孔径分布特征

Fig.6 Pore size distribution characteristics of different lithology shale by mercury injection analysis, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

泥质灰岩的压汞所得孔径分布曲线对比图,灰质泥岩,一般孔径分布范围相对较窄,多以较低的孔径和喉道为主,孔、喉直径一般小于 $1\ \mu\text{m}$;而泥质灰岩孔径范围则分布更宽,最大孔、喉直径可达到 $7\ \mu\text{m}$,说明孔隙或喉道更加多样化,既存在较低的孔径或喉道,又存在较大的孔径和喉道。

总体上,灰质泥岩和泥质灰岩相比较,灰质泥岩相对总孔隙度可能更高,泥质灰岩的总孔隙度总体相对较低,但灰质泥岩中小孔隙更为发育,泥质灰岩中较大的孔隙和喉道更发育。

5 不同岩性页岩油可动性比较

5.1 含油饱和度指数(OSI)比较

页岩的含油饱和度指数 OSI (Oil Saturation Index) 是用于表征页岩产油潜力有效指标^[15-16],一般认为页岩中的油满足了干酪根的自身吸附量 ($70\sim 80\ \text{mg/g}$) 之后,才具有产油潜力,其 OSI 值越高,产油潜力越好。本文以 OSI 值作为含油性的指标,探讨不同岩性页岩中油的可动性差异。总体上,东营凹陷沙四上亚段页岩的 OSI 值随着黏土矿物含量的增加而降低,但随碳酸盐矿物含量的增加而升高(图 3e,f)。因此从含油饱和度指数的对比数据可看出,泥质灰岩具有更好的可动潜力。

5.2 矿物对原油吸附能力比较

为研究页岩中主要矿物对原油吸附能力的差异,进行了不同矿物对原油吸附能力的对比实验。选取东营凹陷古近系沙河街组页岩样品,分离出黏土矿物、方解石薄层、石英颗粒和黄铁矿颗粒,粉碎至一定大小的颗粒,采用索氏抽提装置,利用二氯甲烷洗去表面吸附的有机质^[17],再进行不同矿物对原油的吸附能力实验。实验结果表明,4种矿物吸附能力强弱顺序为:黏土>黄铁矿>石英>方解石。黏土矿物的吸附能力($18.0\ \text{mg/g}$)是方解石的吸附能力($1.8\ \text{mg/g}$)的10倍。

从矿物晶体结构及表面带电性方面,可以解释黏土矿物比方解石对原油吸附能力强的原因。黏土矿物中的蒙脱石和伊利石均为 2:1 型晶层,即由 2 个硅氧四面体晶片与 1 个铝氧八面体晶片构成,铝氧八面体晶片位于晶层中间。蒙脱石中位于晶层内部的 Al^{3+} 易被 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Zn^{2+} 等取代,取代后所产生的负电荷吸引层间或层面 Na^+ 或 Ca^{2+} 离子,这些层间或层面 Na^+ 或 Ca^{2+} 会吸附具有负电性的有机大分子。在伊利石中,位于层间或层面的 Si^{4+} 离子更容易被 Al^{3+} 离子取代,产生的负电荷由等量的层间或层面 K^+ 来平衡, K^+ 吸附本身具有负电性的有机大分子^[18]。而碳酸钙本身为中性晶体,一般不具有电性,其对有机质吸附能力相对较弱。尽管在显微镜下容易见到油在方解石矿物上铺展开,但这种吸附一般为弱吸附。

因此,从无机矿物对原油的吸附能力方面比较,灰质泥岩中矿物对原油的吸附能力要强于泥质灰岩。

5.3 黏土矿物水化膨胀性比较

页岩中的黏土矿物的水化膨胀会影响储层及井壁的稳定,进而影响页岩油的可动性^[19]。不同的黏土矿物的水化膨胀性不同,一般来说,其水化膨胀作用强弱顺序为:蒙脱石>伊利石>绿泥石>高岭石^[20-23]。东营凹陷成熟生烃阶段页岩中的黏土矿物主要为伊蒙混层、伊利石等,伊蒙混层向伊利石的转化程度对页岩油的可动性有一定的影响。

樊页 1 井沙四上亚段埋藏深度相近的页岩中,伊利石的转化程度(伊利石与伊蒙混层的比值)随着黏土矿物含量的增加而降低,而随着碳酸盐矿物含量的增加而明显增高(图 7)。说明在同样的埋深条件下,页岩的矿物组成影响着伊利石的转化程度。黏土矿物含量越低,碳酸盐矿物含量越高,越有利于黏土矿物中伊蒙混层向伊利石的转化。从黏土矿物转化程度与黏土矿物含量或碳酸盐矿物

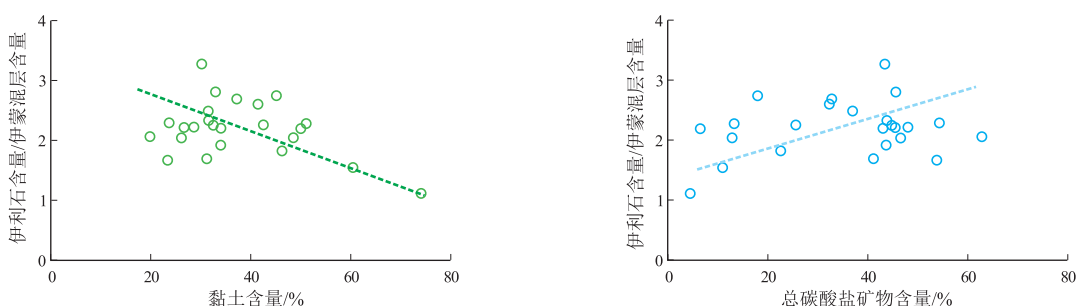


图7 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段页岩黏土矿物转化程度与黏土矿物、碳酸盐矿物含量关系

Fig.7 Relationship between clay mineral transformation degree and clay mineral and carbonate contents of shale in upper Es₄ in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

含量关系来看,泥质灰岩的黏土矿物转化程度更高,对页岩油的可动性更加有利。分析其原因,可转化过程中,需要 K^+ 、 Al^{3+} 的进入,产生的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Si^{4+} 需排出。在灰质泥岩中,黏土矿物含量较高,可能导致所需的 K^+ 、 Al^{3+} 的不足,以及 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Si^{4+} 的累积难以排出,进而阻滞蒙脱石向伊利石的转化;而泥质灰岩中黏土矿物含量较低,有利于伊蒙混层向伊利的转化。

6 结论

(1) 黏土、碳酸盐矿物和长英质矿物是渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段页岩的主要矿物成分。其中,长英质矿物含量与黏土含量正相关,而与碳酸盐矿物含量负相关。

(2) 在镜下观察可见页岩中的有机质与黏土矿物呈共生关系。对比有机质丰度、含油性与矿物组成关系也表明,灰质泥岩比泥质灰岩具有更高的有机质丰度和更好的含油性。

(3) 对比灰质泥岩和泥质灰岩的储集性,认为灰质泥岩具有相对较高的孔隙度,但孔喉一般偏小;而泥质灰岩孔隙度相对较低,但大孔隙喉道更为发育。泥质灰岩比灰质泥岩具有更好的储集性能。

(4) 从含油饱和度指数、矿物对原油的吸附能力、黏土矿物的转化程度方面比较,泥质灰岩中的页岩油比灰质泥岩中的页岩油具有更好的可动性。

参考文献:

- [1] 刘惠民,张守鹏,王朴,等.沾化凹陷罗家地区沙三段下亚段页岩岩石学特征[J].油气地质与采收率,2012,19(6):11-15.
LIU Huimin,ZHANG Shoupeng,WANG Pu,et al.Lithologic characteristics of Lower Es³ shale in Luoia area,Zhanhua Sag[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2012,19(6):11-15.
- [2] 刘惠民,于炳松,谢忠怀,等.陆相湖盆富有机质页岩微相特征及对页岩油富集的指示意义:以渤海湾盆地济阳凹陷为例[J].石油学报,2018,39(12):1328-1343.
LIU Huimin,YU Bingsong,XIE Zhonghuai,et al.Characteristics and implications of micro-lithofacies in lacustrine-basin organic-rich shale;a case study of Jiyang Depression,Bohai Bay Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2018,39(12):1328-1343.
- [3] 刘惠民,张顺,包友书,等.东营凹陷页岩油储集地质特征与有效性[J].石油与天然气地质,2019,40(3):512-523.
LIU Huimin,ZHANG Shun,BAO Youshu,et al.Geological characteristics and effectiveness of the shale oil reservoir in Dongying Sag[J].Oil & Gas Geology,2019,40(3):512-523.
- [4] 王勇,刘惠民,宋国奇,等.济阳拗陷泥页岩细粒沉积体系[J].石油学报,2019,40(4):395-410.
WANG Yong,LIU Huimin,SONG Guoqi,et al.Lacustrine shale

fine-grained sedimentary system in Jiyang Depression[J].Acta Petrolei Sinica,2019,40(4):395-410.

- [5] 宋明水,刘惠民,王勇,等.济阳拗陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践[J].石油勘探与开发,2020,47(2):225-235.
SONG Mingshui,LIU Huimin,WANG Yong,et al.Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression,Bohai Bay Basin,China[J].Petroleum Exploration and Development,2020,47(2):225-235.
- [6] ZHANG Linye,BAO Youshu,LI Juyuan,et al.Movability of lacustrine shale oil:a case study of Dongying Sag,Jiyang Depression,Bohai Bay Basin[J].Petroleum Exploration and Development,2014,41(6):703-711.
- [7] 王苗,陆建林,左宗鑫,等.纹层状细粒沉积岩特征及主控因素分析:以渤海湾盆地东营凹陷沙四上一沙三下亚段为例[J].石油实验地质,2018,40(4):470-478.
WANG Miao,LU Jianlin,ZUO Zongxin,et al.Characteristics and dominating factors of lamellar finegrained sedimentary rocks:a case study of the upper Es₄ member-lower Es₃ member,Dongying Sag,Bohai Bay Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2018,40(4):470-478.
- [8] 华彬,曾建强.东营凹陷泥页岩中碳酸盐成因及地质意义[J].断块油气田,2019,26(4):453-458.
HUA Bin,ZENG Jianqiang. Carbonate genesis and geological significance of shale in Dongying Sag[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2019,26(4):453-458.
- [9] 樊馥,叶文青,蔡进功,等.烃源岩中粘土对有机质保存的研究进展[J].新疆石油地质,2009,30(3):390-392.
FAN Fu,YE Wenqing,CAI Jingong,et al.Advances on organic matter preservation by clay in source rock[J].Xinjiang Petroleum Geology,2009,30(3):390-392.
- [10] 蔡进功,卢龙飞,宋明水,等.有机粘土复合体抽提特征及其石油地质意义[J].石油与天然气地质,2010,31(3):300-308.
CAI Jingong,LU Longfei,SONG Mingshui,et al.Characteristics of extraction of organo-clay complexes and their significance to petroleum geology[J].Oil & Gas Geology,2010,31(3):300-308.
- [11] CAI Jingong,LU Longfei,BAO Yujin,et al.The significance and variation characteristics of interlay water in smectite of hydrocarbon source rocks[J].Science China Earth Sciences,2012,55(3):397-404.
- [12] 包友书.渤海湾盆地东营凹陷古近系页岩油主要赋存空间探索[J].石油实验地质,2018,40(4):479-484.
BAO Youshu.Effective reservoir spaces of Paleogene shale oil in the Dongying Depression,Bohai Bay Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2018,40(4):479-484.
- [13] GUIDRY F K,LUFFEL D L,CURTIS J B.Development of laboratory and petrophysical techniques for evaluating shale reservoirs. Final technical report,October 1986-September 1993[M].Texas:Res Tech Houston Inc.,1996:13-14.
- [14] KUILA U.Measurement and interpretation of porosity and pore-size distribution in mudrocks:the hole story of shales[D].Colorado:Colorado School of Mines,2013:34-36.
- [15] JARVIE D M.Components and processes affecting producibility and commerciality of shale resource systems[J].Geologica Acta,2014,12(4):307-325.

- Qianjiang Depression[J].Journal of Shenzhen University Science and Engineering,2019,36(3):289-297.
- [24] 王民,马睿,李进步,等.济阳坳陷古近系沙河街组湖相页岩油赋存机理[J].石油勘探与开发,2019,46(4):789-802.
WANG Min,MA Rui,LI Jinbu,et al.Occurrence mechanism of lacustrine shale oil in the Paleogene Shahejie Formation of Jiyang Depression,Bohai Bay Basin,China[J].Petroleum Exploration and Development,2019,46(4):789-802.
- [25] 李卓,姜振学,唐相路,等.渝东南下志留统龙马溪组页岩岩相特征及其对孔隙结构的控制[J].地球科学(中国地质大学学报),2017,42(7):1116-1123.
LI Zhuo,JIANG Zhenxue,TANG Xianglu,et al.Lithofacies characteristics and its effect on pore structure of the marine shale in the Low Silurian Longmaxi Formation,southeastern Chongqing[J].Earth Science (Journal of China University of Geosciences),2017,42(7):1116-1123.
- [26] 吴世强,唐小山,杜小娟,等.江汉盆地潜江凹陷陆相页岩油地质特征[J].东华理工大学学报(自然科学版),2013,36(3):282-286.
WU Shiqiang,TANG Xiaoshan,DU Xiaojuan,et al.Geologic characteristics of continental shale oil in the Qianjiang Depression,Jianghan Salt Lake Basin[J].Journal of East China Institute of Technology (Natural Science),2013,36(3):282-286.
- [27] 熊智勇,吴世强,王洋,等.江汉盐湖区盐间泥质白云岩油藏地质特征与实践[J].地质科技情报,2015,34(2):181-187.
XIONG Zhiyong,WU Shiqiang,WANG Yang,et al.Geological characteristics and practice for intersalt argillaceous dolomites reservoir in the Qianjiang Depression of Jianghan Salt Lake Basin[J].Geological Science and Technology Information,2015,34(2):181-187.
- [28] 吴严冬.潜江凹陷潜3⁴-10韵律页岩油储层录井评价[J].江汉石油职工大学学报,2019,32(5):1-3.
WU Yandong.Logging evaluation on Qian 3⁴-10 rhythm shale oil reservoir in Qianjiang Sag[J].Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers,2019,32(5):1-3.
- [29] 孙中良,王芙蓉,侯宇光,等.潜江凹陷潜江组页岩中可溶有机质赋存空间表征及影响因素分析[J].地质科技情报,2019,38(6):81-90.
SUN Zhongliang,WANG Furong,HOU Yuguang,et al.Spatial characterization and influencing factors of soluble organic matter in shale of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression[J].Geological Science and Technology Information,2019,38(6):81-90.
- [30] 赵悦,蔡进功,雷天柱,等.泥质烃源岩中不同赋存状态有机质定量表征:以东营凹陷沙河街组为例[J].新疆石油地质,2018,39(4):416-423.
ZHAO Yue,CAI Jingong,LEI Tianzhu,et al.Quantitative characterization of organic matters with different occurrences in argillaceous source rocks:a case of Shahejie Formation,Dongying Sag[J].Xinjiang Petroleum Geology,2018,39(4):416-423.
- [31] WANG Guochang,JU Yiwen,YAN Zhifeng,et al.Pore structure characteristics of coal-bearing shale using fluid invasion methods:a case study in the Huainan-Huaibei Coalfield in China[J].Marine and Petroleum Geology,2015,62:1-13.
- [32] 钱门辉,蒋启贵,黎茂稳,等.湖相页岩不同赋存状态的可溶有机质定量表征[J].石油实验地质,2017,39(2):278-286.
QIAN Menhui,JIANG Qigui,LI Maowen,et al.Quantitative characterization of extractable organic matter in lacustrine shale with different occurrences[J].Petroleum Geology & Experiment,2017,39(2):278-286.

(编辑 徐文明)

(上接第551页)

- [16] JARVIE D M.Shale resource systems for oil and gas:part 2-shale-oil resource systems[R].Humble:AAPG Memoir,2012:89-119.
- [17] LI Zheng,ZOU Yanrong,XU Xingyou,et al.Adsorption of mudstone source rock for shale oil:experiments,model and a case study[J].Organic Geochemistry,2016,92:55-62.
- [18] 张林晔,包友书,李钜源,等.湖相页岩中矿物和干酪根留油能力实验研究[J].石油实验地质,2015,37(6):776-780.
ZHANG Linye,BAO Youshu,LI Juyuan,et al.Hydrocarbon and crude oil adsorption abilities of minerals and kerogens in lacustrine shales[J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(6):776-780.
- [19] 彭学红,王涛,徐绍轩,等.含水条件下湘西北地区牛蹄塘组页岩吸附能力[J].断块油气田,2018,25(3):336-340.
PENG Xuehong,WANG Tao,XU Shaoyuan,et al.Adsorption characteristics of moist shale in Niutitang Formation,Northwest Hunan[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2018,25(3):336-340.
- [20] 缪颖,蒋裕强.河包场地区须二段气藏储层水敏性研究[J].西部探矿工程,2008,20(11):73-75.
MIAO Hao,JIANG Yuqiang.Water sensitivity of gas reservoir of Xuer Formation,Hebaochang area[J].West-China Exploration Engineering,2008,20(11):73-75.
- [21] 沈守文.下二门油田储层粘土矿物及地层损害分析[J].钻井液与完井液,1994,11(3):50-53.
SHEN Shouwen.Analysis of clay minerals and formation damage of Xiaermen Oil field Reservoir[J].Drilling Fluid & Completion Fluid,1994,11(3):50-53.
- [22] 庞毅力,毛歆燕.膨胀型软岩性质初探[J].甘肃科技,2007,23(2):92-93.
PANG Yili,MAO Xinyan.Discussion on swelling property of soft rock[J].Gansu Science and Technology,2007,23(2):92-93.
- [23] 包友书,张林晔,张金功,等.渤海湾盆地东营凹陷古近系页岩油可动性影响因素[J].石油与天然气地质,2016,37(3):408-414.
BAO Youshu,ZHANG Linye,ZHANG Jingong,et al.Factors influencing mobility of Paleogene shale oil in Dongying Sag,Bohai Bay Basin[J].Oil & Gas Geology,2016,37(3):408-414.

(编辑 黄娟)