

中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力

武晓玲^{1,2},高波²,叶欣²,边瑞康²,聂海宽²,卢福长³

(1. 中国地质大学,北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083;

3. 中国石化国际石油勘探开发公司,北京 100083)

摘要:页岩油作为一种重要的非常规资源类型,拓展了油气勘探开发的新领域。中国东部断陷盆地古近系湖相泥页岩分布范围广、有机质丰度高、厚度大、埋藏较浅、普遍处于生油高峰阶段,具有巨大的页岩油资源潜力。在与北美典型页岩油产区对比的基础上,对中国东部断陷盆地古近系页岩油地质条件进行综合分析,根据富有机质泥页岩的沉积相带、岩石组合、储集空间类型、烃源条件等特征,将页岩油藏划分为深凹区纯泥页岩型、盐间型(盐间高压泥页岩裂缝型、盐间泥页岩夹薄砂岩裂缝型、盐间泥质云岩裂缝型)和泥页岩夹脆性层型(泥页岩夹薄砂岩型、泥页岩夹灰岩型、云质泥岩夹白云岩型)3大类页岩油藏类型,并对其分布特征进行了探讨。在此基础上,对东部断陷盆地古近系页岩油的勘探潜力进行了初步分析,并预测了页岩油有利区。

关键词:成藏条件;分布特征;页岩油藏类型;有利区带;页岩油;东部断陷盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Shale oil accumulation conditions and exploration potential of faulted basins in the east of China

Wu Xiaoling^{1,2}, Gao Bo², Ye Xin², Bian Ruikang², Nie Haikuan², Lu Fuchang³

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. International Petroleum Exploration and Development Company, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Shale oil is one of the important unconventional petroleum resources, and its exploration and development has greatly expanded the traditional domain of the industry. The lacustrine shale in the faulted basins of East China has been considered as having great potential for shale oil based on the facts that it has large coverage, high organic matter content, and considerable thickness matched well with shallow buried depth, and that most of it is still within the oil-generating peak stage. Based on comparison with the typical shale oil producing plays in the US, the paper analyzes geological conditions of shale oil in these basins in accordance with their sedimentary facies belt, lithology combination, reservoir space types, hydrocarbon source condition of the organic-rich mudstone and shale. Based on the results, the paper explores characteristics of these reservoirs and classifies three main types of shale oil reservoirs, i. e. pure shale reservoir in deep depression, shale reservoirs within salt layers, and shale reservoirs with thin brittle interbed such as thin sandstone, limestone and dolomite. A preliminary analysis of the exploration potential for shale oil in these basins is also carried out and favorable zones for its exploration are identified.

Key words: accumulation condition; distribution characteristics; shale oil reservoir type; favorable zone; shale oil; faulted basins in East China

页岩油是指富有机质泥页岩层系中,主要以游离态和吸附态赋存于泥页岩及泥质粉砂岩、砂岩、碳酸盐岩等夹层的孔隙、裂缝,通过水平井多段压裂等技术手段才能实现规模经济开采的烃类资源。与常规油气藏不同,页岩油具有自生自储、储层低孔低渗、连续分布的特点^[1]。近年来随着水平井和分段压裂技术在页岩油勘探开发的应用,美国在 Bakken, Eagle Ford 和 Bar-

nett 页岩油勘探开发中取得突破性进展^[2-3],这不仅引发了美国其他地区类似页岩油藏的开发热潮,还在美国本土促成一批老油区的重获新生。美国页岩油勘探开发加快,使得自 1985 年以来一直持续递减的石油产量已于 2009 年止跌回升。随着油价走高和技术进步,页岩油巨大的勘探开发潜力已引起了世界多个国家和能源公司的高度关注。

收稿日期:2013-03-08;修订日期:2013-07-18。

第一作者简介:武晓玲(1966—),女,高级工程师,非常规油气地质。E-mail: wuxl.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2009QYXQ15-07);国家自然科学基金项目(41202103)。

2007 年以来,国内三大石油公司及延长油矿在加强页岩气勘探开发的同时,也对陆相盆地页岩油资源进行了探索,通过老井复查复试和页岩油水平井分段压裂实践,在东部断陷盆地页岩油领域取得了重大进展^[4-5]。中国石化 2011 年在泌阳凹陷安深 1 井核桃园组(核)三段第三砂层组页岩段大型压裂日产油 4.68 m³,实现了中国陆相页岩油勘探的突破;2012 年泌页 HF-1 井水平井分段压裂最高日产油 22.5 m³,成功实现了国内第一口页岩油水平井的分段压裂^[6];在济阳拗陷沾化凹陷,针对沙河街组(沙)三段下亚段—沙四段上亚段部署实施了多口页岩油水平井,其中,渤页平 1 井在第二段压裂测试中获得日产 5~6 m³ 的工业油流^[7]。中国石油 2011 年在辽河拗陷西部凹陷曙古 165 井沙河街组(沙)三段泥岩段压裂日产油 24 m³,东部断陷盆地已成为我国陆相页岩油勘探开发的重点领域。文中通过与北美工业性页岩油产区各项地质条件对比研究,分析了渤海湾、南襄、苏北、江汉等东部断陷盆地古近系页岩油的形成条件,进行了研究区页岩油藏类型划分,并探讨了各类页岩油藏的分布特征。在此基础上,按照页岩油气选区评价方法,优选了东部湖相盆地页岩油发育的有利地区和层系,提出了东部湖相盆地页岩油勘探建议。

1 页岩油形成富集条件

1.1 烃源岩特征

1.1.1 沉积及分布特征

东部断陷盆地古近系主要为湖相沉积,暗色泥页岩主要发育在深湖—半深湖区,与凹陷沉积中心、沉降中心叠合。强裂陷期,湖水较深,形成一定厚度的泥页岩,其特点是相变快、单层厚度薄、但累积厚度大,垂向上砂泥岩互层变化频率较快。东部断陷盆地经历了多

期构造演化,具有多凹共生的特点,各凹陷内古近系发育多套陆相泥页岩,分布明显地受沉积相控制。

渤海湾盆地古近系富有机质泥页岩主要发育于始新世最大湖泛期的沙四段上亚段和沙三段、沙一段。其中沙三段沉积时水域面积最大、泥页岩厚度大、分布范围广;沙四段泥页岩主要分布在济阳拗陷、辽河拗陷和临清拗陷东濮凹陷。各亚段暗色泥页岩厚度一般大于 100 m,局部超过 500 m^[8-9]。

南襄盆地暗色泥页岩主要发育在深凹区的核桃园组二段至核三段上部,与较深—深湖相吻合,分布面积约 400 km²。泥页岩厚度在 60~620 m,沉积中心位于安棚地区。

苏北盆地富有机质泥页岩主要发育在阜宁组(阜)二、四段。阜二段暗色泥页岩厚度介于 50~200 m,最大厚度可达 350 m,具有东厚西薄特征。阜四段暗色泥页岩主要分布在金湖、高邮及溱潼凹陷,高邮深凹带厚度最大,达 500 m 以上。

江汉盆地暗色泥页岩发育在潜江组和新沟嘴组。潜江组暗色泥岩厚度一般 200~1 200 m,最厚在蚌湖向斜带,达 1 200~3 000 m。新沟嘴组暗色泥岩厚度一般 100~150 m,主要分布于江陵、潜江凹陷南部。

1.1.2 泥页岩地球化学特征

渤海湾盆地古近系泥页岩有机质丰度高,总有机碳含量(TOC)大于 2% 的占较大比例。济阳拗陷有机质丰度最高,主体为 2%~5%,最高达 15% 以上;南襄盆地泌阳凹陷有机质丰度变化范围较宽,纯页岩有机碳平均 2.3%~4.2%;苏北、江汉盆地有机质丰度中等,有机碳一般介于 1.0%~2.0%。东部湖相盆地古近系泥页岩有机质类型多样,总体以 I 型和 II₁ 型为主,成熟度不高,主体处于生油高峰期,凹陷中心部位处于湿气—凝析油阶段(表 1)。

表 1 东部断陷盆地泥页岩与美国页岩油源岩地球化学参数对比
Table 1 Comparison of geochemical parameters of shale between the faulted basins in East China and USA

地区	盆地	页岩名称	地层时代	埋深/m	厚度/m	TOC/%	有机质类型	R _o /%
美国	Williston	Bakken	D ₃ -C ₁	2 438~3 200	3~15	7.2~10.6 ^[12]	I, II	0.6~1.0
	Maverick	Eagle Ford	K ₂	1 968~3 658	45~100	2.0~6.5 ^[13-14]	I, II	1.0~1.7
	FortWorth	Barnett	C ₁	1 981~2 591	15~60	1.0~10.0	II	1.1~2.3
中国东部	济阳拗陷	沙三下亚段	E ₂	1 500~4 200	50~400	0.6~16.3	I, II ₁	0.5~1.1
		沙四上亚段	E ₂	1 576~5 000	50~400	0.6~16.7	II ₁	0.5~1.7
	辽河拗陷	沙三段	E ₂	2 500~4 500	50~500	1.0~17.1	II-III	0.5~2.0
	东濮凹陷	沙三上—中亚段	E ₂	2 500~4 500	90~580	0.5~7.8	I, II ₁	0.6~2.5
	泌阳凹陷	核三段	E ₃	1 243~3 085	60~620	1.1~4.4	II ₁ , II ₂	0.6~1.1
	江汉盆地	潜江组	E ₂₋₃	1 000~3 300	200~1 200	1.0~17.0	I, II ₁	0.6~1.6
		新沟嘴组	E ₂	2 500~3 500	100~150	0.8~1.4	I, II ₁	0.8~2.0
	苏北盆地	阜二段	E ₁	1 500~4 000	50~350	0.5~4.7	I, II ₁	0.5~1.3
		阜四段	E ₁	1 000~3 000	50~500	0.5~4.1	I, II ₁	0.5~0.8

注:一些测试数据参考胜利、中原、江汉、江苏、河南油田中石化 2011 年勘探例会材料。

东部断陷盆地在页岩油气形成条件上与北美工业性页岩油产区相比^[10-11],泥页岩厚度大、有机质类型好、有机质丰度高,具有形成页岩油气的雄厚物质基础(表1)。但也有突出的差异性,主要表现在:①北美地区高产页岩油区海相页岩稳定、分布范围大、热演化程

度较高、干酪根类型以Ⅱ型为主,生成的油质较轻、粘度低、可动性好。②东部断陷盆地古近系烃源岩时代新,陆相湖相沉积环境、相变快、相同埋深演化程度偏低、干酪根类型以Ⅰ型和Ⅱ₁型为主,原油主要以高蜡油为主,可动性差(表2)。因此湖相地区需要寻找成

表2 东部断陷盆地与美国盆地页岩油流体性质对比

Table 2 Fluid characteristics comparison between shale oil samples from the faulted basins in East China and the basins in USA

地区	井号	密度/ (g·cm ⁻³)	凝固点/ ℃	含蜡量/ %	胶质沥青含量/ %	压力系数	气油比	粘度(50℃)/ (mPa·s)
泌阳凹陷	安深1	0.875 8	39	34.21	18.80	0.95		33.52
	泌页HF-1	0.868 7	39	34.21	21.83	1.05	127	
沾化凹陷	渤页平1	0.923 6	31	21.54		1.50		69.00
	罗42	0.898 1	31	17.24	34.75	1.70		28.40
东濮凹陷	文古2	0.857 0		19.08	5.39			8.91
北美	Bakken	0.820 3				1.35~1.58	80~250	
	Eagle Ford	0.817 9				1.35~1.80	513~5 041	

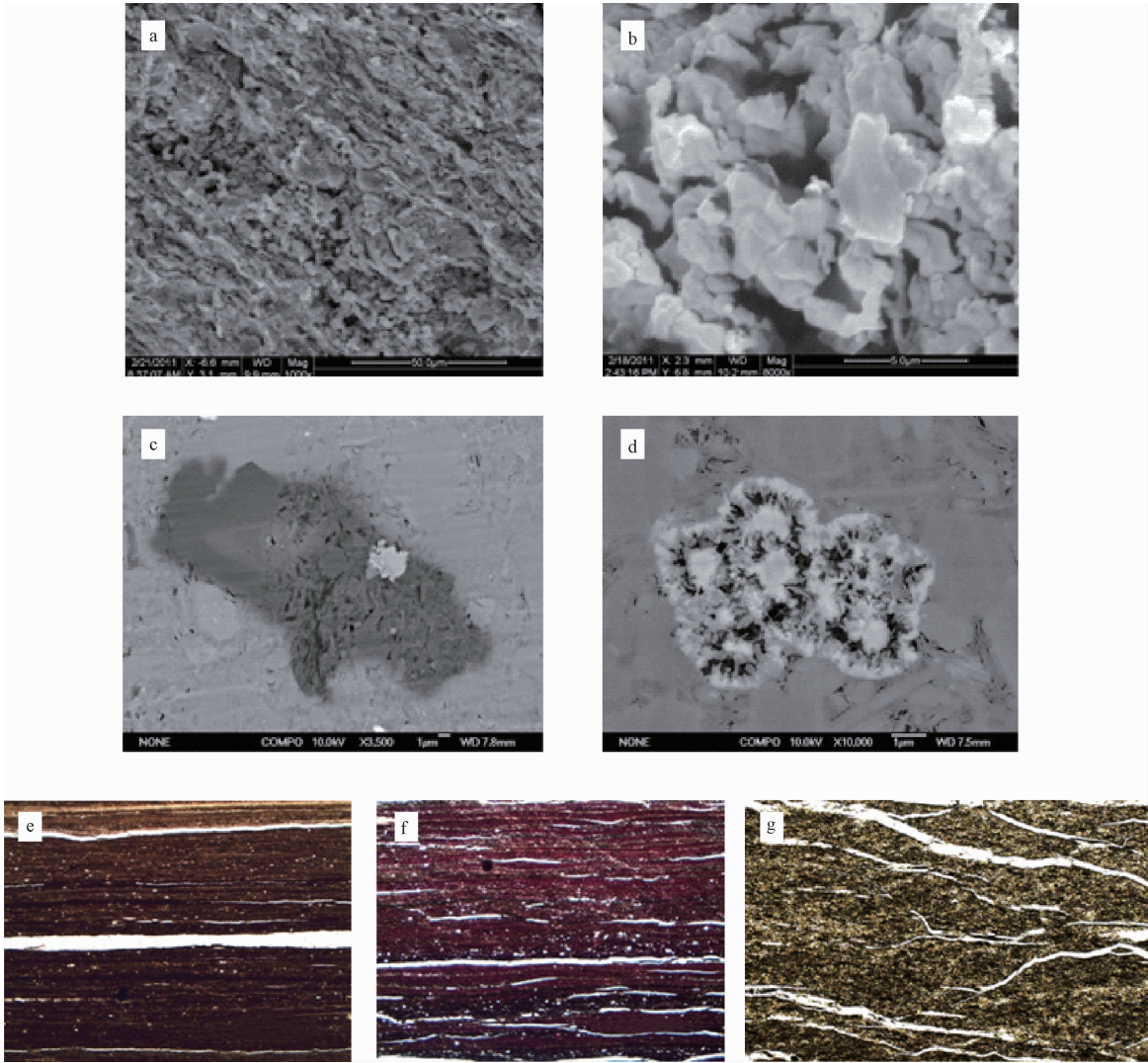


图1 东部断陷盆地泥页岩储集空间类型

Fig. 1 Space types of shale reservoirs in the faulted basins of East China

a. 王57井,3 410.00 m,沙四上亚段,方解石纹层,微孔隙发育;b. 梁206井,2 757.40 m,沙四上亚段,方解石,微孔隙,见溶蚀;c. PS18-1井,3 182.00 m,沙三上亚段,有机质收缩孔;d. PS18-8井,3 182.78 m,沙三上亚段,方解石,晶内溶蚀孔;e. 丰112井,3 345.08 m,沙四上亚段,贯穿岩片,层间裂缝;f. 王31井,2 622.70 m,沙四上亚段,千缩缝;g. PS18-1井,3 158.00 m,沙三上亚段,网状缝

熟度相对较高的地区进行页岩油勘探。沾化、泌阳地区目前页岩油勘探效果不是十分理想的主要原因之一可能是成熟度不高,可动性很差。

1.2 储集特征

1.2.1 储集空间特征

渤海湾盆地古近系泥页岩储集空间类型可分为孔隙与裂缝两种类型。微孔类型以粘土矿物和碳酸盐岩矿物晶间微孔为主,其次为有机质纳米级微孔、砂质粒间微孔、溶蚀孔、黄铁矿中的体腔孔等。裂缝类型以构造缝、层间缝、高压破裂缝为主,岩心观察有大量高角度构造裂缝发育(图 1)。

泌阳凹陷安深 1 井主要储集空间为基质微孔隙和微裂缝,岩心观察安深 1 井区核三段泥页岩天然微裂缝较发育,可见高角度缝、水平层理缝;扫描电镜可观察到页岩微孔隙发育,主要以晶间孔的形式存在。苏北盆地阜二段泥页岩油气的储集空间主要为泥岩裂缝,以高角度或垂直层面的构造缝和成岩缝为主。江汉盆地潜江组泥页岩主要储集空间为碳酸盐岩溶蚀孔,其次为钙芒硝岩晶间孔、溶蚀孔和层理缝,裂缝提

供主要的渗流通道。

裂缝发育是页岩油气井高产的一个重要因素,大量发育的微裂缝为泥页岩油气的赋存提供了有效的储集空间,也可为泥页岩油气开采提供了运移通道。

1.2.2 物性特征

东部断陷盆地古近系泥页岩孔隙度和渗透率都很低,孔隙度平均在 4.1%~7.72%,渗透率受裂缝的影响变化很大,最大可达 $93 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,一般分布于 $(0.000\ 2 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,泥页岩物性特征属于低孔低渗,为低孔低渗泥岩微孔缝储层(表 3)。相关资料显示,石蜡、金刚烷、环烷烃类及沥青的分子直径分别为 0.4~0.8,0.7~2.0,1.0~3.0,5.0~10.0 nm(邹才能等,2013),考虑到油分子的流动性,孔喉直径应大于 20 nm,否则会造成流动性差。游离态页岩油有利的赋存空间主要为泥页岩裂缝、紧贴泥页岩的薄砂层或碳酸盐岩层、孔喉直径相对较大的泥岩基质孔隙。根据泌页 HF1 井氩离子抛光扫描电镜分析,页岩孔隙一般在 30~1 700 nm 不等,平均为 500 nm,有利于页岩油的排出(图 2)。

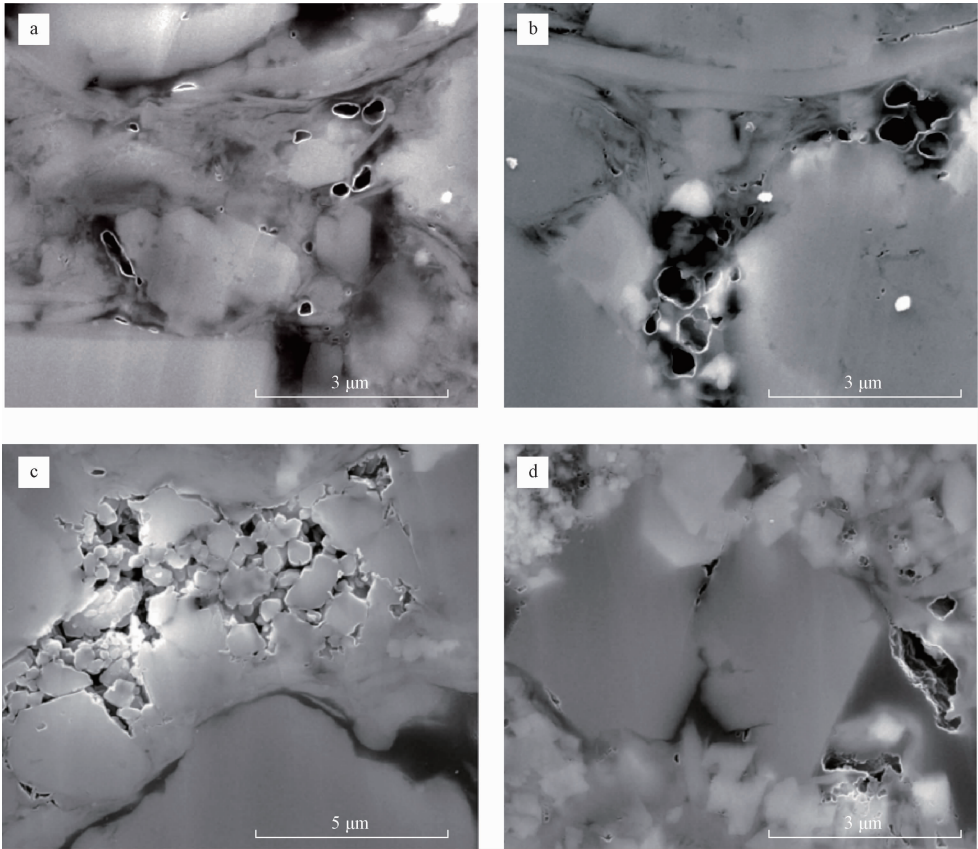


图 2 泌阳凹陷深凹区页岩储层微观孔隙结构特征

Fig. 2 Micro-pore structure characteristics of shale reservoirs in the deep Biyang Sag of Nanxiang Basin

a. 泌页 HF1 井,有机孔隙,2 418.60 m;b. 泌页 HF1 井,有机孔隙,2 422.90 m;
c. 泌页 HF1 井,晶间孔隙,2 426.92 m;d. 泌页 HF1 井,有机孔隙,2 426.90 m

表3 东部断陷盆地与北美典型页岩油藏储集特征对比

Table 3 Comparison of reservoiring characteristics of shale oil reservoirs in the faulted basins of East China with those of typical shale oil reservoirs in USA								
地区	盆地	页岩名称	埋藏深度/ m	井底温度/ ℃	地层压力系数	总孔隙度/ %	渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	石英+碳酸盐 含量/%
美国	威林斯顿	Bakken	2 593 ~ 3 203	115	1.33	8.0 ~ 12.0	0.05 ~ 0.50	74
	Maverick	Eagle Ford	1 500 ~ 2 550	145 ~ 168	1.27	3.4 ~ 14.6	0.000 03 ~ 0.001 1	50 ~ 80
	Fort Worth	Barnett	1 981 ~ 2 591	93	0.99 ~ 1.27	4.0 ~ 10.0	0.000 1 ~ 0.000 4	40 ~ 80
中国东部	济阳拗陷	沙三下亚段	3 000 ~ 4 200	120 ~ 160	1.00 ~ 1.60	2 ~ 8	1 ~ 10/7.72	40 ~ 83
		沙四上亚段	3 000 ~ 5 000	120 ~ 173	1.00 ~ 2.00	1.3 ~ 9.3	0.04 ~ 1.90/0.52	40.83
	辽河拗陷	沙三段	2 500 ~ 4 500	93 ~ 125	0.93 ~ 1.02	11.4	0 ~ 5.27	41 ~ 63
	东濮凹陷	沙三上-中亚段	2 500 ~ 4 500	125 ~ 170	1.30 ~ 1.90	3.4 ~ 15.4	0.000 9 ~ 0.044 0	55 ~ 60
	泌阳凹陷	核三段	1 243 ~ 3 085	111	0.95 ~ 1.05	3.9 ~ 8.9	0.000 22 ~ 0.001 00	66 ~ 66.9
	江汉盆地	潜江组	1 000 ~ 2 300			6.6 ~ 12	0.01 ~ 0.89/0.306	60 ~ 70
		潜江组(盐间)	1 000 ~ 2 300			4.6 ~ 15.5	0.129 ~ 94	70 ~ 100
	苏北盆地	阜二、卓四段	1 200 ~ 3 500			1.4 ~ 15.8	0.01 ~ 12.3/4.5	38.4 ~ 51.7

注:一些测试数据参考胜利、中原、江汉、江苏、河南油田中石化 2011 年勘探例会材料;
表中部分数据为最小值~最大值。

1.2.3 岩矿特征

东部断陷盆地古近系泥页岩普遍含较高的石英、碳酸盐岩含量,石英+碳酸盐岩含量一般在 40%~83%,其中,石英含量 20%~30%,碳酸盐含量 20%~60%,粘土矿物含量低于 50%(图 3),有少量的伊/蒙混层,有利于对页岩层系的压裂改造。

东部断陷盆地在页岩油储集条件上与北美工业性页岩油产区相比,两者的相似性表现为:压力高、脆性矿物含量高、孔隙度适中、发育微裂缝。差异性表现为:北美地区海相页岩成层性好,由于有机硅的存在,可以同时具有 TOC 高和脆性好的特征,石英含量高,可压性好。中国东部断陷盆地陆相页岩相带变化快,非均质性强,增加了预测的难度;时代新、埋藏较浅泥

页岩成岩作用弱;石英含量低、碳酸盐岩含量高,脆性较差,可压性相对较差。由于富硅质泥页岩与富碳酸盐岩泥页岩具有不同的力学性质,需要开展相适应的工程工艺技术攻关。

1.3 保存条件

东部断陷盆地为中新生界断陷湖盆,仅经历东营末期构造抬升运动,构造破坏作用相对较弱,加之覆泥岩厚度大,具有很好的封盖条件。此外,江汉盆地潜江组、东濮凹陷沙三段都发育了多套膏盐岩,膏盐岩具有较高的排驱压力和突破压力,在膏盐岩发育区常形成欠压实泥页岩带,属超压盖层,具有较强的压力封闭能力,有利于页岩油气的保存。

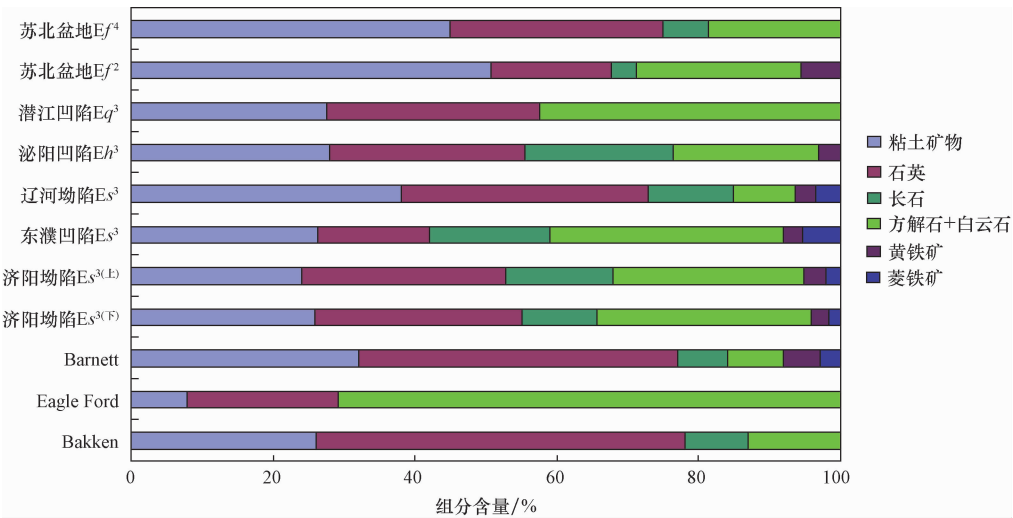


图3 东部断陷盆地古近系泥页岩全岩矿物组成

Fig. 3 Mineral composition of the Paleogene shale and mudstone in the faulted basins of East China

2 页岩油藏主要类型及其分布特征

2.1 油藏类型

东部断陷盆地特有的构造、沉积背景决定其发育多种类型的页岩油藏。高频振荡导致泥-砂、盐-碳酸盐岩-泥-砂高频交互,有利于致密砂、泥页岩夹薄砂型、泥页岩夹碳酸盐岩型油藏的形成。苏北、江汉盆地及东濮凹陷呈现出复杂断块型,在构造复杂带裂缝发育,有利于形成泥页岩裂缝型油藏;江汉盆地、东濮凹陷盐岩广泛分布,有利优质烃源岩的发育和超压形成,盐间及盐-泥-砂相变带导致多种类型页岩油藏的形成。

东部断陷盆地发育 3 大类页岩油藏(表 4),不同类型页岩油藏在沉积相带、岩性组合、烃源条件、储集空间类型等方面具有各自不同的特征。盐间、高压裂缝型、泥页岩夹脆性层型是较有利的页岩油藏类型。

2.1.1 盐间型

储集空间以泥岩、白云岩裂缝为主。赋存于盐间泥页岩系统,发育于盐湖盆地,大量油气滞留在盐岩夹持的泥页岩中,形成高压,裂缝发育。

2.1.2 泥页岩夹脆性层(薄砂层、白云岩层、灰岩层)型

储集空间以脆性夹层及页岩基质孔隙为主。泥页岩与薄砂层、灰岩和泥灰岩互层或夹层,往往发育于高频振荡期,前三角洲相—半深湖相之间过渡区。

2.1.3 纯泥页岩型

储集空间以泥页岩裂缝为主。最常见平行或斜交

层理的两类裂缝,平行层理裂缝在泥页岩中广泛发育,斜交层理裂缝往往发育于断裂发育区。

2.2 油藏分布特征

东部断陷盆地发育有盐和无盐两类湖盆,受沉积相控制,从凹陷边缘物源区(砂岩发育区)向湖中心沉积岩性在空间上有序变化,有盐湖盆的沉积序列为常规砂岩—致密砂岩—页岩夹砂—云质泥岩—盐岩;无盐湖盆的沉积序列为常规砂岩—致密砂岩—页岩夹砂岩—泥岩—泥页岩+碳酸盐岩;受沉积相控制,湖中心区形成盐间高压泥页岩裂缝油藏、盐间高压泥页岩夹薄砂岩裂缝型、盐间白云岩裂缝型、纯泥页岩型油藏,盐和常规砂岩过渡区发育泥岩夹页岩与薄砂岩、灰岩互层型、云质泥岩夹白云岩型油藏(表 4)。

3 页岩油勘探潜力及勘探有利区带

3.1 勘探潜力

东部断陷盆地古近系泥质烃源岩有机质丰度高、类型好、厚度大,目前普遍处于生油高峰阶段,生烃潜力巨大,为东部老油田提供了充足的油源。通过对北美主要页岩油气分布区的调研分析表明,页岩油气的主要产区主要分布于常规油气富集区。根据我国第三轮全国油气资源评价结果,东部断陷盆地(渤海湾、南襄、江汉、苏北盆地)主要凹陷古近系生油量约 $1\,693 \times 10^8$ t,经过二次运移后的残余油资源量约 $1\,132 \times 10^8$ t,这些残留油就是页岩油,但由于现有技术的局限性,我们只能开采其中很少一部分。对渤海湾盆地 19 个泥岩样品进行抽提族组成检测,发现饱和烃占 8.53%~46.85%,平均占 32.8%,饱和烃是泥页岩中最可动的烃类。研

表 4 东部断陷盆地古近系页岩油藏类型

页岩油藏类型		岩性组合	储集空间类型	沉积相	分布部位	实例
盐间型	盐间高压泥页岩裂缝型	盐间纯泥页岩型	主要裂缝、次微孔隙	半咸水湖相	盐间	东濮凹陷, PS18-1 井, 沙三上亚段, 盐间
	盐间高压泥页岩夹薄砂岩裂缝型	盐间泥页岩夹薄砂层	主要裂缝、次微孔隙	半咸水湖相	盐间	东濮凹陷, 文古 4 井, 沙三中亚段, 盐间
	盐间泥质云岩裂缝型	盐间泥质白云岩、云质泥岩	裂缝、次生孔隙中的溶孔	半咸水湖相	盐间	潜江凹陷, 王平 1 井, 潜 2-潜 3 段
泥页岩夹脆性层型	云质泥岩夹白云岩型	泥质岩夹云质泥岩、泥膏岩、泥质云岩,	微孔隙、微裂缝	三角洲前缘-盐相之间过渡区	渗砂尖灭线与盐岩尖灭线之间的区域	潜江凹陷, 潜页平 2 井, 潜 2-潜 3 段
	泥岩夹薄砂岩型	泥页岩夹薄砂层	微孔隙、微裂缝	三角洲前缘-半深湖相之间过渡区	洼陷向隆起的斜坡区, 各盆地广布	各凹陷都有发现
	泥页岩夹碳酸盐岩型	纹层状泥质灰岩、泥质云岩、灰质泥岩	微孔隙、微裂缝(纹层非常发育)	三角洲前缘-半深湖相之间过渡区	洼陷向隆起的斜坡区	沾化凹陷, 罗 69 井, 沙三下亚段
纯泥页岩型	纯泥页岩型	层状/块状粉砂质泥页岩	微孔隙、微裂缝	深湖-半深湖相	深洼区	泌阳凹陷, 安深 1 井, 核三 ³ 段

究认为,随着技术的进步,页岩油采出2%,5%甚至10%都是可能的,以第三轮油气资源评价结果中残余油为基数,分别乘以2%,5%,10%,估算了东部断陷盆地页岩油资源量(表5)。其中,渤海湾盆地济阳坳陷页岩油资源潜力最大,在层位上主要分布在沙三段中、下亚段,平面上主要分布在东营凹陷和沾化凹陷,其次为辽河坳陷西部凹陷沙三段,临清坳陷东濮凹陷的沙三段。南襄盆地泌阳凹陷的核三段、江汉盆地潜江凹陷的潜江组、苏北盆地高邮凹陷、金湖凹陷的阜二段,也有较大的页岩油资源潜力。

3.2 勘探有利区带

借鉴北美地区页岩油气评价标准,考虑到东部湖相盆地古近系烃源岩的生排烃特点,认为东部断陷盆地页岩油有利区有机碳含量 $\geq 2\%$,成熟度 $\geq 0.7\%$,页岩厚度 $\geq 50\text{ m}$,埋深 $\leq 4\ 000\text{ m}$,脆性矿物、微裂缝发育,其中石英、方解石、长石等矿物含量大于30%。按此标准对中国石化东部断陷盆地进行页岩油有利区的初步预测^[15-16],认为东部断陷盆地8个富油气凹陷是页岩油勘探的有利地区,其中沾化凹陷的沙三段、东营凹陷的沙三、沙四段、泌阳凹陷的核三段、潜江凹陷潜江组最为有利;车镇、惠民、东濮凹陷沙三段、高邮凹陷的阜二段较为有利。

4 结论

- 1) 东部断陷盆地古近系湖相泥页岩分布范围广、有机质丰度高、厚度大、埋藏较浅、普遍处于生油高峰阶段,泥页岩脆性矿物含量高、孔隙度适中、发育微裂缝,具备形成页岩油藏的物质基础和储集条件。东部断陷盆地古近系泥页岩钻探发现丰富油气显示,并有一批井获高产油流,在渤海湾、南襄等盆地已经取得页岩油勘探开发的重大进展。
- 2) 与北美典型页岩油产区对比,东部断陷盆地页岩油形成条件具有其特殊性和复杂性。古近系烃源岩时代新,相同埋深演化程度偏低(成熟-高成熟油阶段)、干酪根类型以I型为主,原油主要以高密度、粘度及高蜡油为主,可流动性差。古近系陆相页岩相带变化快,非均质性强;时代新、埋藏较浅泥页岩成岩作用弱;石英含量低、碳酸盐岩含量高,脆性较差。开展页岩油勘探开发要求有与之地质特点相适应的研究方法和工程工艺技术。
- 3) 东部断陷盆地特有的构造、沉积背景决定其发育多种类型的页岩油藏。根据富有机质泥页岩的沉积相带、岩石组合、储集空间类型、烃源条件等特征,将页岩油藏划分为纯泥页岩型、盐间型、泥页岩夹脆性层型

表5 中国东部断陷盆地页岩油资源量估算统计表
Table 5 Shale oil resource estimation of the faulted basins in East China

盆地	坳陷(凹陷)	层系	生油量/(10 ⁸ t)	排油量/(10 ⁸ t)	残留油量/(10 ⁸ t)	页岩油估算资源量/(10 ⁸ t)		
						残留油量/%		
						2	5	10
渤海湾盆地	济阳坳陷	古近系	631.60	151.70	479.90	9.60	24.00	47.99
	临清坳陷	古近系	132.80	48.80	84.00	1.68	4.20	8.40
	黄骅坳陷	古近系	117.80	40.11	77.69	1.55	3.89	7.77
	冀中坳陷	古近系	160.60	72.89	87.78	1.76	4.39	8.78
	辽河坳陷	古近系	404.00	192.00	212.00	4.24	10.60	8.78
	合计		1 446.80	505.50	941.37	18.83	47.07	81.75
南襄盆地	泌阳凹陷	古近系	24.10	9.67	14.43	0.29	0.72	1.44
	南阳凹陷	古近系	6.17	2.45	3.72	0.07	0.19	0.37
	合计		30.27	12.12	18.15	0.36	0.91	1.80
苏北盆地	高邮凹陷	古近系	63.89	6.75	57.13	1.14	2.86	5.71
	金湖凹陷	古近系	18.23	3.93	14.30	0.29	0.72	1.43
	海安凹陷	古近系	8.66	1.06	7.60	0.15	0.38	0.76
	盐城凹陷	古近系	10.20	2.35	7.85	0.16	0.39	0.79
	溱潼凹陷	古近系	14.80	3.78	11.02	0.22	0.55	1.10
	合计		125.10	31.96	93.14	1.86	4.66	9.31
江汉盆地	江陵凹陷	古近系	18.23	3.93	14.30	0.29	0.72	1.43
	潜江凹陷	古近系	63.89	6.75	57.13	1.14	2.86	5.71
	其他凹陷	古近系	8.66	1.06	7.60	0.15	0.38	0.76
	合计		90.78	11.74	79.04	1.58	3.95	7.90
总计			1 692.95	561.32	1 131.70	22.63	56.59	100.74

3 大类页岩油藏。盐间、高压裂缝型、泥页岩夹脆性层型是较有利的页岩油藏类型。

4) 根据我国第三轮全国油气资源评价结果,初步估算东部断陷盆地古近系页岩油可采资源量 56.59×10^8 t,资源潜力较大。渤海湾盆地济阳坳陷页岩油资源潜力最大,其次为辽河坳陷西部凹陷沙三段,临清坳陷东濮凹陷的沙三段。南襄盆地泌阳凹陷的核三段、江汉盆地潜江凹陷的潜江组、苏北盆地高邮凹陷、金湖凹陷的阜二段,也有较大的页岩油资源潜力。初步预测,认为东部断陷盆地8个富油气凹陷是页岩油勘探的有利地区,其中沾化凹陷的沙三段、东营凹陷的沙三、沙四段、泌阳凹陷的核三段、潜江凹陷潜江组最为有利;车镇、惠民、东濮凹陷沙三段、高邮凹陷的阜二段较为有利。

5) 东部断陷盆地页岩油勘探建议,在平面上靠近三角洲前缘寻找含砂岩层较多的烃源岩区、含碳酸盐岩层较多的烃源岩区;在垂向上,寻找演化程度较高(处于凝析油气阶段)、具有超压特征的层段。在页岩油藏类型上,优选盐间高压裂缝型、泥岩夹脆性层型油藏类型展开勘探。

参 考 文 献

- [1] 周庆凡,杨国丰. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 541–544.
Zhou Qingfan, Yang Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 541–544.
- [2] 林森虎,邹才能,袁选俊,等. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25–30.
Lin Senhu, Zou Caineng, Yuan Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25–30.
- [3] 邹才能,杨智,崔景伟,等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14–26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14–26.
- [4] 庞正炼,邹才能,陶士振,等. 中国致密油形成分布与资源潜力评价[J]. 中国工程科学, 2012, 14(7): 60–67.
Pang Zhenglian, Zou Caineng, Tao Shizhen, et al. Formation, distribution and resource evaluation of tight oil in China[J]. China Engineer Science, 2012, 14(7): 60–67.
- [5] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129–136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129–136.
- [6] 陈祥,王敏,严永新,等. 泌阳凹陷陆相页岩油气成藏条件[J]. 石

油与天然气地质, 2011, 32(4): 568–576.

Chen Xiang, Wang Min, Yan Yongxin. Accumulation conditions for continental shale oil and gas in the Biyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 568–576.

- [7] 王永诗,李政,巩建强,等. 济阳坳陷页岩油气评价方法——以沾化凹陷罗家地区为例[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 83–91.
Wang Yongshi, Li Zheng, Gong Jianqiang, et al. Discussion on an evaluation method of shale oil and gas in Jiyang depression: a case study on Luoia area in Zhanhua sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 83–91.
- [8] 边瑞康,张培先,邓飞涌,等. 辽河坳陷东部凹陷沙三段根缘气成藏条件与分布预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(5): 1830–1836.
Bian Ruikang, Zhang Peixian, Deng Feiyong, et al. Accumulation condition analysis and distribution prediction of source contacting gas in third member of Shahejie Formation, eastern sag of Liaoh depression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2012, 43(5): 1830–1836.
- [9] 蔡希源. 湖相烃源岩生排烃机制及生排烃效率差异性——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 329–334.
Cai Xiyuan. Hydrocarbon generation-expulsion mechanisms and efficiencies of lacustrine source rocks: a case study from the Dongying sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 329–334.
- [10] Smith M G, Bustin R M. Late Devonian and Early Mississippian Bakken and Exshaw black shale source rocks, Western Canada Sedimentary Basin: a sequence stratigraphic interpretation[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84: 940–960.
- [11] Jarvie D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2, Shale-oil resource systems[C] // Breyer J A. Shale reservoirs—giant resources for the 21st century: AAPG Memoir 97, 2012: 89–119.
- [12] Smith M G, Bustin R M. Production and preservation of organic matter during deposition of the Bakken Formation (Late Devonian and Early Mississippian), Williston Basin[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1998, 142: 185–200.
- [13] Robison C R. Hydrocarbon source rock variability within the Austin Chalk and Eagle Ford Shale (Upper Cretaceous), East Texas, USA[J]. International Journal of Coal Geology, 1997, 34(3–4): 287–305.
- [14] Slatt R M, O'Brien N R, Romero A M, et al. Eagle ford condensed section and its oil and gas storage and flow potential[R]. AAPG Annual Convention and Exhibition, Long Beach, California, 2012: 22–25.
- [15] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343–350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343–350.
- [16] 张金川,林腊梅,李玉喜,等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322–331.
Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322–331.