文章编号：0253-2697(2014)01-184-13 DOI:10.7623/syxb201401024

页岩油储层基本特征及评价要素

姜在兴[1] 张文昭[1] 梁 超[1] 王永诗[2] 刘惠民[2] 陈 祥[3]

(1. 中国地质大学能源学院 北京 100083；2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司地质科学研究院 山东东营 257015；
3. 中国石油化工股份有限公司河南油田分公司 河南南阳 473132)

摘要：页岩油是指以游离、溶解或吸附状态赋存于有效烃源岩泥页岩中的液态烃类，是泥页岩生排烃后的残余滞留聚集，基本未经历运移或仅在源岩内短距离初次运移。目前，国内外对"页岩油"概念的界定不统一，对储层控制因素及评价要素的研究仍相对薄弱。明确了页岩油储层为泥页岩，不包括烃源岩内的其他岩类夹层及邻层，并依据储集机理差异将页岩油储层分为裂缝型和基质型。富含有机质、以Ⅰ型和$Ⅱ_1$型干酪根为主、R_o值介于0.6%～1.2%、有机碳(TOC)值大于2.0%，矿物组成复杂、发育纹层结构，储集空间细小，低孔特低渗、储层需要改造是页岩油储层的基本特点。重点揭示了有机质在页岩油储层形成及评价中的重要作用，有机质含量影响页岩的生油潜力、储集能力并进而决定了页岩储层的含油量及产能，提出一套以有机碳含量为核心的储层分级评价标准，以TOC为2%、4%为界，同时综合考虑有机质类型及成熟度、富有机质页岩厚度、矿物组成及岩石类型、孔渗特征及岩石可压裂性等指标，将页岩油储层分为3级：Ⅰ类目标储层、Ⅱ类有利储层及Ⅲ类无效储层。

关键词：页岩油；致密油；储层特征；评价要素及标准；有机质含量

中图分类号：TE112.221 **文献标识码**：A

Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir

Jiang Zaixing[1] Zhang Wenzhao[1] Liang Chao[1] Wang Yongshi[2] Liu Huimin[2] Chen Xiang[3]

(1. *College of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*; 2. *Research Institute of Geological Sciences, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying* 257015, *China*;
3. *Sinopec Henan Oilfield Company, Nanyang* 473132, *China*)

Abstract: Shale oil are residual liquid hydrocarbons retained and accumulated in effective source rocks in a free, dissolved, or adsorbed state post generation and expulsion, which have not undergone migration or only migrated in source rocks for a short distance. Presently, there is no consensus on the definition of shale oil and research is lacking on the controlling factors and evaluation elements of shale oil reservoir. This study clarifies that shale oil reservoir mainly consists of shale and mudstone, excluding the interlayers or adjacent layers of other lithofacies in source rocks. According to the difference in reservoir mechanism, shale oil reservoir is classified into fracture- and matrix-type. The basic characteristics of shale oil reservoir are as follows: rich in organic matter and dominated by type I and II kerogens (R_o = 0.6%～1.2% and total organic carbon, TOC >2.0%); complex mineral composition and laminated structure; micro to nano-scale reservoir space and low porosity - super-low permeability, with the need for reservoir improvement. The importance of organic matter to the formation and evaluation of shale oil reservoir is emphasized. That is, the content of organic matter determines the oil generation potential and reservoir capacity of shale, further controlling the reserves and productivity of shale oil reservoir. A set of reservoir evaluation criteria are put forward by focusing on the TOC content of source rocks (threshold values 2% and 4%) and taking into consideration a variety of indicators (e.g., type and maturity of organic matter, thickness of organic-rich shale, mineral composition and rock types, porosity and permeability, and shale fracturability). According to the proposed evaluation criteria, shale oil reservoir is ranked into three grades, including type I, target reservoir; type II, favorable reservoir; and type III, invalid reservoir.

Key words: shale oil; tight oil; reservoir characteristics; evaluation elements; evaluation criteria; organic matter content

随着世界范围内常规油气产量的不断下降，勘探理念逐渐转变和创新，非常规油气成为资源接替领域并取得了一系列突破，页岩气勘探开发的迅猛发展也使得页岩层系中的石油资源受到了广泛关注。随着近年来页岩油内涵意义的转变、富集理论的深入及勘探开发技术的进步，页岩油已成为石油勘探的前沿及各油田增储的热点领域。

目前国外实现页岩油气商业性开发的国家主要是

基金项目：国家重大科技专项(2011ZX05009-002)资助。

第一作者及通信作者：姜在兴，男，1962年3月生，1984年获华东石油学院石油地质学专业学士学位，1997年获中国科学院研究生院沉积学专业博士学位，现为中国地质大学(北京)能源学院教授，主要从事沉积学、层序地层学的教学和科研工作。Email:jiangzx@cugb.edu.cn

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

美国和加拿大。在美国,页岩油产量从 2005 年开始迅速增加,2011 年达到了 2973×10^4 t,2012 年页岩油产量呈现爆发式增长,据美国能源情报署(EIA)预计,2012 年页岩油日产量达 72 万桶,相当于其国内石油日产量的 12.5% [1-2]。美国页岩油的勘探开发集中在 Bakken、Eagle Ford 和 Barnett 等海相页岩层系内,其中以威利斯顿盆地的 Bakken 地层最为典型,Bakken 页岩层包含 3 部分:上、下两套页岩为优质烃源岩,生烃能力强,而页岩油储层以中段白云质粉砂岩、钙质粉砂岩为主[3-4],这种典型的"夹心饼"式的成藏模式,实际上是页岩层系中致密粉砂岩夹层含油。

而中国目前在松辽盆地、渤海湾盆地、南襄盆地等中生代、新生代陆相盆地的泥页岩层段中,相继已不同程度地获得了工业油流,其储集空间主要为页岩基质孔隙和裂缝,是真正意义上的"页岩油"。在辽河坳陷西部凹陷,曙古 165 井沙河街组三段泥页岩裂缝井段获自喷性工业油流,产油最高达 24 m^3/d;在济阳坳陷渤南洼陷,至 2011 年底,已有 11 口探井在沙河街组一段、沙河街组三段下亚段页岩中获得工业油气流,在 8 口探井的沙河街组三段下亚段和沙河街组四段上亚段页岩中获低产油气流[5];在南襄盆地泌阳凹陷,安深 1 井压裂后在核桃园组三段上亚段泥页岩中获 4.68 m^3/d 的工业油流,泌页 HF1 井压裂后获得最高 23.6 m^3/d 工业油流[6];在三塘湖盆地马朗、条湖凹陷二叠系芦草沟组有 15 口探井测试见油,4 口井获得工业油流[7]。初步估算中国主要盆地可采页岩油资源量大约为(30~60)$\times10^8$ t[8]。

目前,中国对页岩油的勘探开发总体处于起步和探索阶段,通过对国外理论模型和勘探开发经验的借鉴以及针对中国基础地质条件差异性的探索,取得了一定的理论认识和实践进展,但也还存在一些问题:

①对页岩油的定义及内涵尚未达成共识,页岩油与致密油的术语在使用上存在混淆[6]。没有明确页岩油是否包括来自运移至邻近烃源岩的其他岩类储层中的石油资源,没有针对储集机理不同而提出明确的页岩油储层的分类,进而在页岩油储层控制因素及评价要素的主次之分上存在争议。

②对页岩油的储集机理尚不明晰,对页岩储集空间的类型、有效性和分布特征,及页岩油的赋存状态、滞留机理、渗流机制、开采产出条件等还有待深入研究。目前全球已在多个国家及地区发现了泥页岩裂缝型油气,泥页岩裂缝出油已成共识;但对基质孔隙型的页岩油的赋存状态、渗流机理及可动性方面的研究相对薄弱,在其能否形成工业聚集和经济开采的问题上,仍存在很大争议,尚未在页岩油储集机理方面形成系统的理论体系。

③目前大多仍参考页岩气储层评价的思路,尚未针对页岩油储层的特殊性建立起系统有效、针对性强的页岩油储层评价方法。邹才能等认为页岩油"核心区"评价的关键因素包括有机质含量与有机质成熟度、储层脆性指数、页岩油黏度、地层能量及富有机质页岩规模[8]。张金川等建议页岩油评价时考虑含油性与含油率、有机质成熟度、有机质含量、埋深、地层压力等[9]。目前来看,对页岩油储层分级、资源评价及战略选区尚未找准关键评价参数,未建立科学合理、系统有效的评价方法和标准。

1　页岩油的定义及内涵

不同学者和机构对页岩油的定义尚未形成统一,页岩油、致密油等术语在使用上存在混淆和争论。

1.1　致密油

致密油的特点即储层致密,渗透性极差,用常规的技术不能经济开发,需利用水平钻井和多段水力压裂等技术才能经济开采,对致密油含义的理解有广义和狭义两种[10]。广义的致密油泛指蕴藏在低孔、低渗的储集岩中的石油聚集,既包括源岩中的石油资源,也包括从源岩中排出并运移至互层或紧邻地层中的石油资源。而狭义的致密油是专指来自页岩之外的致密储层的石油资源,该狭义含义的实际应用并不广泛。

不同学者对于"致密油"概念的认识不一,Mills 对致密油提出了一个比较模糊的概念,把致密油和页岩油从原油物性(API 重度及原油黏度)上进行简单区分,认为致密油是指存在于相当低的渗透率和孔隙度的含油气地层中的轻质原油[11]。林森虎等指出致密油是"赋存于富有机质且渗透率极低的页岩、泥质粉砂岩和砂岩夹层系统中的自生自储连续分布的石油聚集",认为主要储集层是页岩[12]。邹才能等[13]结合生储模式、储层特征、原油物性及单井产能等方面,认为致密油是经过短距离运移、赋存于与生油岩层系共生的致密储集层的石油,覆压基质渗透率小于 0.1 mD,孔隙度小于 10%,这里指狭义含义。而贾承造等指出致密油是赋存于生油岩中,或与生油岩互层、紧邻的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集岩中的石油聚集[14],显然是指广义致密油。目前大多数机构和媒体使用"致密油"这一术语多是指广义致密油。

1.2　页岩油

页岩油术语的使用可以向前追溯百年,但早期的页岩油是指加工油页岩生产的石油,属于人造石油。油页岩是一种高灰分高有机质的固体可燃矿产资源,也可通过低温干馏从中提炼得到的一种类似天然石油

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的非常规石油资源。这种与油页岩有关的页岩油提炼工艺已有近百年历史,“页岩油”的这一用法含义清楚,得到普遍认可和使用。

而目前勘探开发新热点的“页岩油”是指在达到生油门限的泥页岩层系中,以游离或吸附态赋存,经过水平钻井、水力压裂等手段能够直接从地下页岩层中采出的液态烃类,对它的理解也存在广义和狭义两种。广义页岩油泛指蕴藏在具有低的孔隙度和渗透率的页岩层系内致密含油层(包括非泥页岩的其他岩类夹层)中的石油资源,而狭义页岩油则专指赋存于作为源岩的泥页岩中的石油资源。

邹才能等指出页岩油是指储存于富有机质、纳米级孔径为主的页岩地层中的石油[8],明确将致密油气与页岩油气区分开,认为致密油气储集在致密砂岩或灰岩中,经历了短距离运移,而页岩油气是富集在富有机质黑色页岩地层中,油气基本未经历运移过程。而张金川等指出页岩油所赋存的主体介质是“曾经有过生油历史或现今仍处于生油状态的泥页岩地层,也包括泥页岩地层中可能夹有的致密砂岩、碳酸盐岩,甚至火山岩等薄层”[9]。目前常见的相关机构发布的报道或统计数据中所提到的页岩油,大多是指其广义的含义。

笔者认为,致密油是致密储层油的简称,泛指蕴藏在低渗、低孔(通常孔隙度小于 10%,覆压基质渗透率小于 0.1 mD)的储集层中的石油,储层岩石类型包括页岩、粉砂岩、砂岩、灰岩及白云岩、甚至是火山岩;而页岩油专指赋存于作为有效生烃源岩的泥页岩中的液态烃类,“页岩油储层”具体指含油、产油层段主体为泥页岩的层段。目前针对“页岩油”内涵的争议主要在于是否包括烃源岩层系内的其他岩类致密夹层或邻层(粉砂岩、砂岩、灰岩及白云岩)中的石油,这种夹层或邻层中的石油资源,在源储关系、渗流机理、成藏主控因素及开采条件方面都与纯泥页岩中的石油聚集有所差别,属于致密油,但不应划归为页岩油(图 1)。页岩油是致密油的一种,源储一体,基本未经历运移或仅在烃源岩内短距离初次运移,是超压和扩散作用下的滞留成藏;而页岩层系中的夹层或邻近其他岩类地层中的石油,源储接触或邻近,经历一次运移或短距离二次运移,成藏动力来自于超压和浮力作用,其孔渗条件较好、储集空间尺寸相对较大、储层连通性好、脆性更大而易于改造。

1.3 页岩油储层分类

生烃泥页岩中的储集空间和流动通道是页岩油储层形成的关键,目前较为认可的储集机理有:①构造活动或天然水力压裂形成的裂缝网络储油;②泥页岩基质中的各类微孔隙、微裂缝储油。基于其储集机理的不同,页岩油储层可分为 2 种类型:

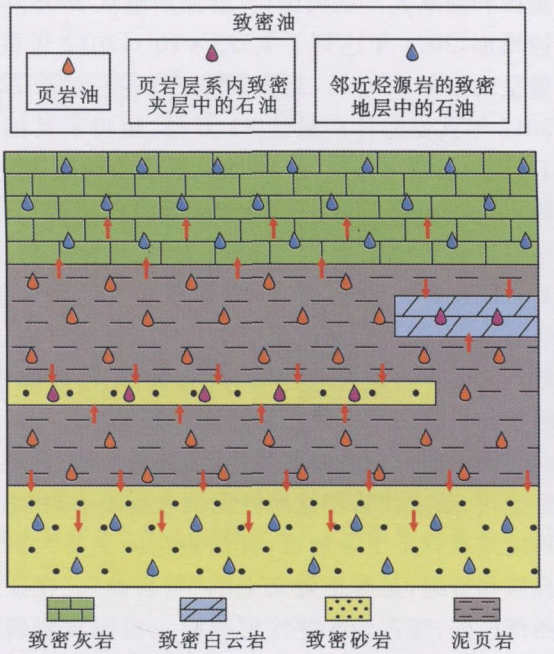


图 1 致密油与页岩油关系示意

Fig. 1 Relationship between tight oil and shale oil

第 1 种是大规模天然裂缝十分发育的泥页岩储集层,即裂缝型。页岩油主要以游离状态赋存于泥页岩层系中的裂缝中,裂缝亦可以大大改善渗透条件。裂缝型页岩油的富集受控于裂缝及裂缝体系的发育,往往与地层孔隙压力、各向异性的水平应力、断层作用、褶皱作用等密切相关,甜点区常分布在异常高压带厚层块状泥岩中、断层两侧以及局部构造转折部位。这类页岩油可采性较好,但产量通常不稳定,油井初产高,下降快,井间产能悬殊。美国圣华金盆地 Monterey 页岩即属于此种类型储层[9]。

第 2 种是裂缝不发育、基质孔隙为主要储集空间的泥页岩储集层,即基质型。页岩油主要以游离和吸附态赋存于泥页岩的基质孔隙和微裂缝中,骨架颗粒及黏土矿物粒间、粒内孔,黄铁矿晶间孔,不稳定矿物溶蚀孔、碳酸盐矿物重结晶晶间孔,特别是有机质生烃演化孔中,页岩储层的含油性与有机质丰度、成熟度等密切相关。在常规开发条件下此类页岩油很难有效渗流出孔隙,但当页岩分布规模、含油率及储层岩石脆性等达到一定条件后,通过水平钻井及分级压裂等措施可以获得工业油流,泌阳凹陷页岩油勘探开发实践证明已取得基质型页岩油的重大突破[6]。

2 页岩油储层特征及聚集机理

页岩油储层与常规油藏相比,其含油性不仅与岩性、物性参数有关,更与地化参数密切相关,页岩油储

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

层对源岩的分布和生烃能力的要求更高，只有大面积稳定分布且有机质含量较高的页岩层系才能获得页岩油的经济开发，有机质在页岩油储层的形成中起着举足轻重的控制作用。

2.1 有机质特征及其对页岩油储层的控制作用

中国陆相页岩油区主要发育在半深湖—深湖相沉积环境，有机质以Ⅰ型和Ⅱ$_1$型干酪根为主，成熟度适中，R_o值集中在0.5%～1.1%，页岩有机质丰度中等偏高，总有机碳含量一般在2.0%以上；而美国主要海相页岩油区，其干酪根以Ⅱ型为主，有机质丰度整体相对更高，有机碳含量一般在3%以上，R_o值在0.6%～1.5%，成熟度更高（表1）[1-7]。

表1　中国陆相页岩油及美国主要海相页岩油有机地化参数对比

Table 1　Organic parameter comparison between terrestrial shale oil in China and marine shale oil in US

地区	发育层段	岩性	干酪根类型	R_o/ %	TOC / %
济阳坳陷 渤南洼陷	Es_3^x	页岩、灰岩 钙质页岩	Ⅰ-Ⅱ$_1$型	0.52～0.92	集中在2～5，最高9.3
	Es_4^s		Ⅰ-Ⅱ$_1$型	0.54～1.44	集中在1～2，最高4.2
辽河坳陷 西部凹陷	Es_3	碳质泥页岩	Ⅱ$_1$型为主	/	平均2.64，最高16.33
南襄盆地 泌阳凹陷	Eh_3^s	灰质页岩、 粉砂质页岩	Ⅰ-Ⅱ$_1$型	0.52～0.87	平均2.89，最高4.96
三塘湖盆地 马朗凹陷	P_2l	灰质泥岩、 白云质泥岩	Ⅰ型为主	0.5～0.9	1.4～11.9，集中在3～6
威利斯顿盆地	Bakken(C_1)	灰岩、页岩、 白云质粉砂岩	Ⅱ型	0.65～0.9	集中在7.2～13
福特沃斯盆地	Barnett(C_1)	硅质页岩、 灰质页岩、灰岩	Ⅱ型	0.6～1.4	集中在4～8
德克萨斯州南部	Eagle Ford(K_2)	页岩、灰岩	Ⅰ型、Ⅱ型	1.15～1.4	集中在2～7

注：Es_3^x—古近系沙河街组三段下亚段；Es_4^s—古近系沙河街组四段上亚段；Eh_3^s—古近系核桃园组三段上亚段；P_2l—二叠系芦草沟组；Bakken(C_1)—下石炭统Bakken组；Barnett(C_1)—下石炭统Barnett组；Eagle Ford(K_2)—上白垩统Eagle Ford组。

2.1.1　有机质含量决定页岩生油潜力与含油量

有机质是生成页岩油的物质基础，研究证明，当TOC_0（原始有机碳）值较低时，烃源岩生成的油主要用于满足自身有机质和矿物吸附的需要；当TOC_0增大到一定值时，生成的油才开始大量以游离态填充泥页岩基质孔隙并运移排出，并能够被开采。氯仿沥青"A"含量和游离烃量"S_1"能直接反映页岩的含油量，卢双舫等对松辽、海拉尔、渤海湾盆地5个地区烃源岩地球化学指标进行统计分析，整体上参数"S_1"和氯仿沥青"A"随着TOC的增加而增加[15]；泌阳凹陷页岩油储层有机地化数据也证明其氯仿沥青"A"和"S_1"含量都与TOC有较好的正相关性（图2）。有机质含量的高低决定着页岩含油量的多少，在有机质类型与成熟度相似的情况下，有机碳含量越高，页岩生烃潜力越大，烃类滞留量越多，页岩含油量越高。

2.1.2　有机质含量影响页岩储层储集能力

有机质本身的孔隙度和渗透率高于岩石基质，并能提供孔隙空间和渗流通道。随着干酪根的热演化及生成油气的排出，会在有机质内部形成生烃残留孔隙；且有机质本身体积缩小，与骨架矿物间形成孔缝；排出的有机酸通过提供H^+和络合金属元素来提高矿物的溶解度，不稳定矿物被溶蚀形成孔隙。有机质相关孔隙发育丰度高，且连通性较好，据Jarvie等人研究，有机质含量7%的页岩在生烃演化过程中，消耗35%的有机碳可使页岩孔隙度增加4.9%[16]。笔者统计沾化凹陷罗家地区罗69井沙河街组三段下亚段数据，可见TOC与孔隙度大体上呈正相关关系，裂缝发育密度也随着TOC的增高而增大（图3），即在页岩矿物组成相似的情况下，有机质含量越高，其孔隙及裂缝越发育，储层储集能力越好。

2.1.3　有机质含量影响碳酸盐结晶形态

通过对泌阳、沾化、东营等凹陷泥页岩薄片观察发现，页岩储层中的方解石主要以泥晶、粒状亮晶、针柱状亮晶3种形态赋存，结合有机碳数据发现，这3种赋存状态与TOC有一定关系：TOC小于2%，方解石以泥晶状存在，无重结晶现象；TOC大于2%，开始出现重结晶现象，以微亮晶、粒状亮晶为主；TOC大于4%，重结晶程度更进一步，以针柱状为主；即随着TOC增大，结晶程度提高（图4）。分析认为这与有机质热演化和有机质的含量有关[17]，有机质在热演化和生排烃过程中释放出有机酸，酸性孔隙水溶解灰质页岩中的泥晶方解石，之后随着有机酸排放减弱，方解石发生再沉淀而重结晶。而在一定范围、一定层位、有机质热演化程度相当时，是有机碳含量的高低决定了碳酸盐形态是仍为泥晶状、或初步重结晶为粉晶状、颗粒状，还是进一步重结晶为针柱状。

这种由有机质生烃作用引起的重结晶，一方面提供了重结晶晶间孔、溶蚀孔缝及层间缝等储集空间，一定程度上提高了孔隙度；另一方面也改变岩石的力学性质，重结晶排出混杂的黏土等后的方解石更纯，含量相对增高，岩石脆性更大，对页岩储层十分有利。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

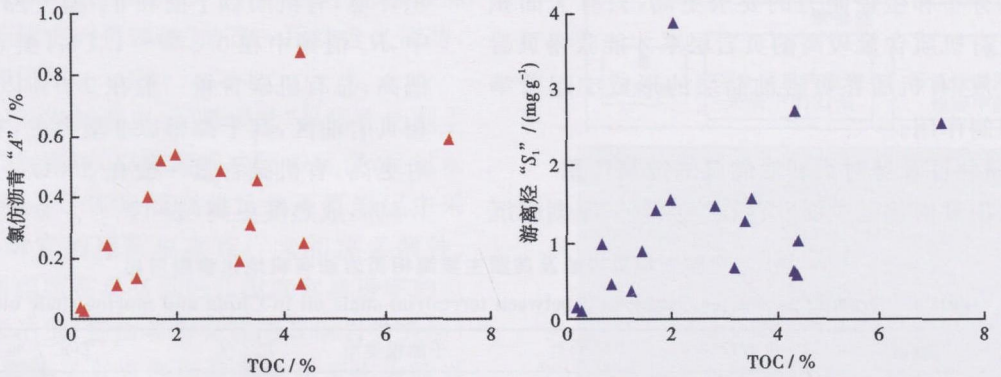


图 2 泌阳凹陷核桃园组三段泥页岩含油量与 TOC 关系

Fig. 2 Oil content vs. TOC of shale in Hetaoyuan Formation of Biyang sag

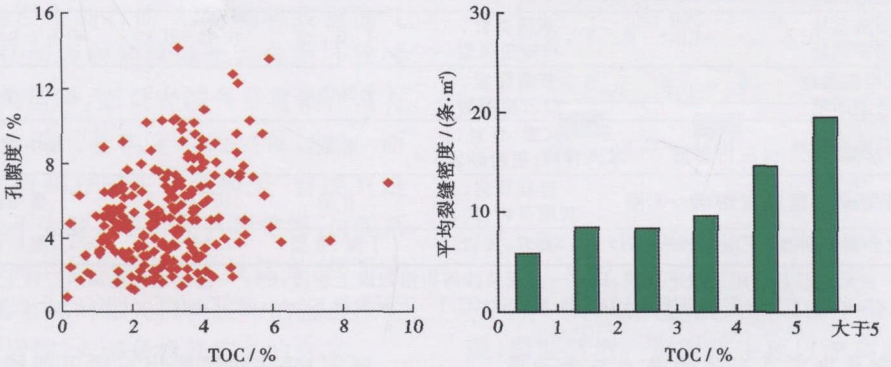
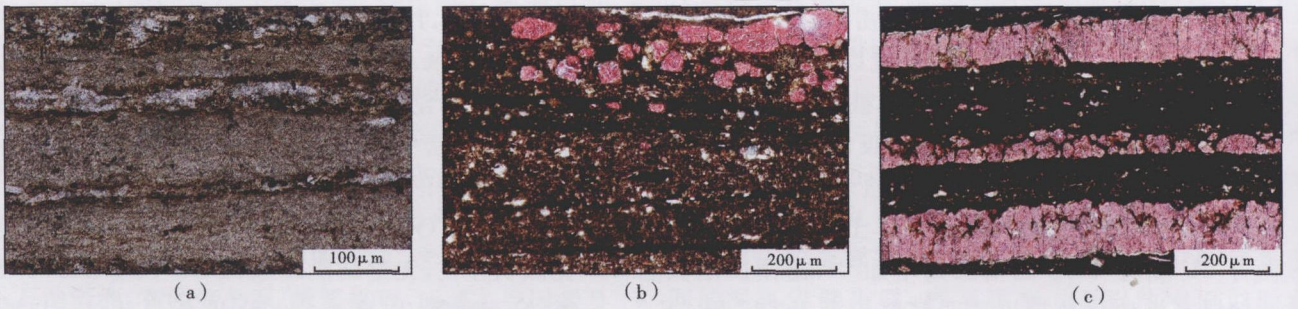


图 3 沾化凹陷罗 69 井沙河街组三段下亚段泥页岩孔隙度及裂缝发育程度与 TOC 关系

Fig. 3 Porosity and fracture development vs. TOC of shale in Shahejie Formation of Well L69, Zhanhua sag



(a)泥晶状方解石，TOC = 1.74%，泌阳凹陷核桃园组三段(核三段)，泌页 HF1 井 2 425.4 m；(b)颗粒状方解石，TOC = 3.67%，泌阳凹陷核三段，泌页 HF1 井 2 435.6 m；(c)针柱状方解石，TOC = 4.05%，泌阳凹陷核三段，泌页 HF1 井 2 440.7 m。

图 4 碳酸盐矿物结晶形态与有机质含量

Fig. 4 Carbonate mineral crystal morphology vs. TOC

从沾化凹陷罗 69 井柱状图(图 5)中可以看出，TOC 在 3 060 m 上、下明显分界，下部普遍小于 2%，上部基本都大于 2%，部分超过 4%，甚至更高。而相对应的，生烃潜力"$S_1 + S_2$"、氯仿沥青"A"、孔隙度及含油饱和度等参数在该界线向上也均明显变优，而该井试油资料显示其 3 040～3 066 m 段(TOC>2%段)为油层。而梁世君等统计马朗凹陷芦草沟组页岩储层不同产能页岩油层段的 TOC 发现：以产水为主的井，TOC 峰值为 1%～4%；低丰度页岩油层的 TOC 峰值为 3%～6%；高丰度页岩油层的 TOC 峰值为 4%～10%[7]。可见，有机质含量的确对页岩油储层的优劣具有控制作用，是影响页岩油储层产能的重要因素。

2.2 页岩矿物组成特征

页岩是指由粒径小于 0.062 mm 的碎屑、黏土等组成的一类细粒沉积岩，富含有机质，常具页状或纹层状层理。其矿物成分复杂，主要由石英、长石、方解石等脆性矿物和蒙脱石、伊/蒙混层、伊利石、高岭石等黏土矿物组成，常含少量黄铁矿。这些矿物组分可构成 4 种基本纹层：富有机质纹层、富碎屑纹层、碳酸盐纹层和黏土纹层，不同的纹层组合和比例构成不同的

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

岩相[18]。

不同的矿物组成决定了页岩的孔隙类型及结构。石英为刚性矿物，利于粒间孔隙的保存；长石为不稳定矿物，易沿解理形成溶蚀孔缝；碳酸盐矿物易溶解形成粒间或粒内溶孔，又易重结晶形成晶间孔隙；黏土矿物常呈卷曲片状，晶间孔隙大量发育。不同矿物组成还控制页岩的脆性，影响后期储层改造的效果。石英、方解石等脆性矿物含量越高，越容易产生天然裂缝，后期人工压裂时，也易形成复杂的诱导裂缝及造成裂缝网络的延伸和连通；而黏土矿物压裂时易塑性变形，易堵塞渗流通道，不利于后期储层改造。

调研不同地区页岩储层的矿物组成（表 2）[5-7,19]，海相页岩的硅质含量较高，而湖相页岩的灰质含量相对较高，黏土矿物含量一般都低于 50%。

2.3　页岩储渗空间特征

细粒泥页岩的成分和结构决定了页岩油储层的基质孔隙度小，孔喉半径小，原始渗透率极低，是典型的致密储层。常规的储层物性分析测试手段，如铸体薄片、孔渗测定、压汞等在页岩储层测试中效果不佳。因此在泥页岩储层表征技术方面，必须采用特殊的成像技术和分析测试方法，如利用氩离子抛光制样设备，三维微纳米成像 X 射线 CT、场发射扫描电镜、环境扫描电镜等高分辨率观测设备，结合能谱分析，实现页岩内部孔隙和矿物成分三维分布图像重构[20-21]；利用低压 N_2 和低压 CO_2 比表面积测定来有效反映页岩的孔隙结构、分布及微裂缝的信息[22]。

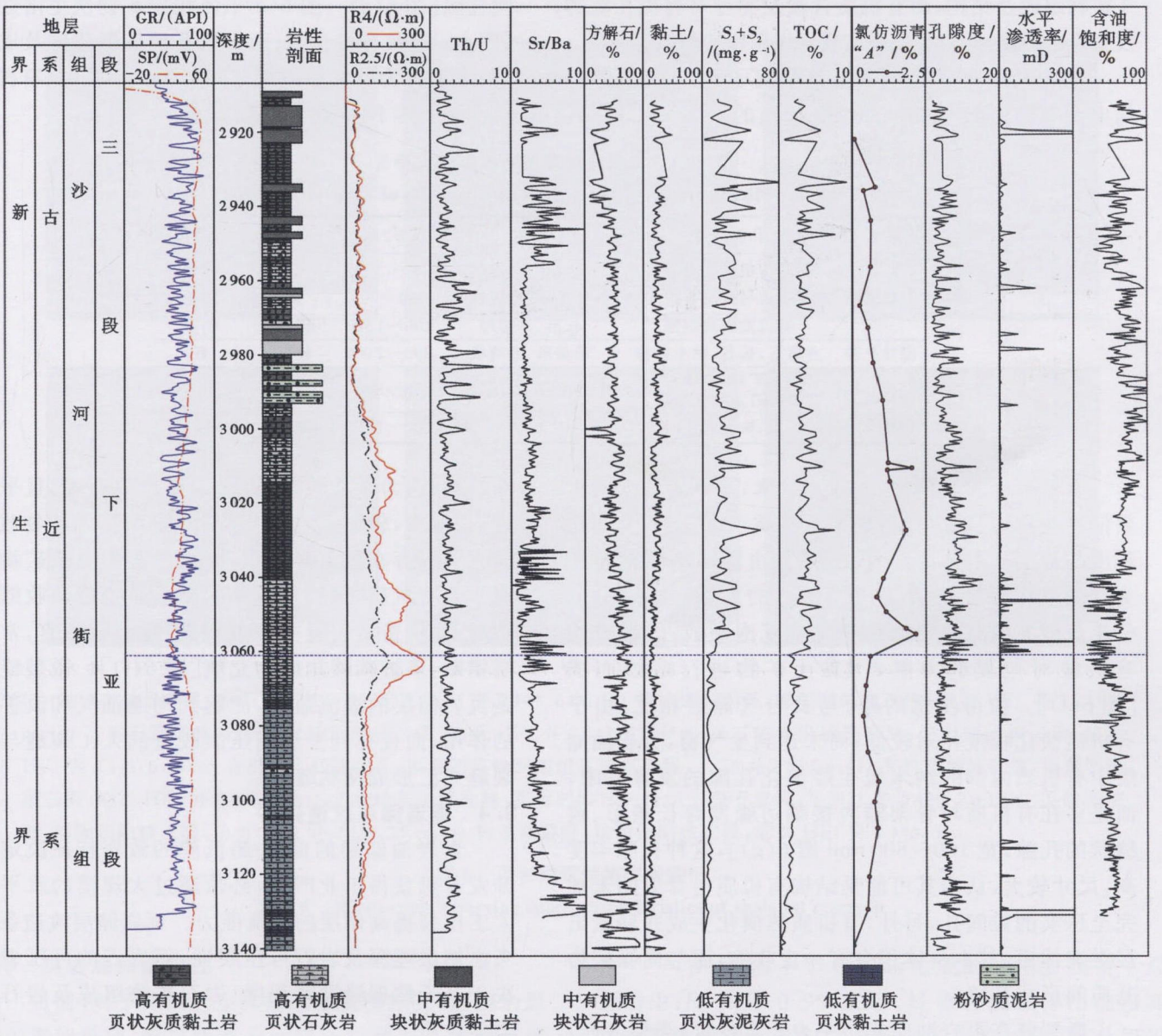


图 5　沾化凹陷罗 69 井储层特征柱状图

Fig. 5　Reservoir characteristics column of Well L69 in Zhanhua sag

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 不同地区页岩储层岩石矿物组成

Table 2 Rock mineral composition of shale reservoir in different regions

地区	地层	(石英+长石)/%	碳酸盐矿物/%	脆性矿物总量/%	黏土矿物/%
北美	Barnett(C_1)	40～60	小于 25	40～80	小于 50
黔北地区	$\in_1$	32～78，平均 56.3	小于 20	40～70	8～47，平均 30.5
鄂尔多斯盆地	Pz_2	32～54	/	40～58	/
	Mz	27～47	/	58～70	/
渤南洼陷	Es_3^x	3～48，平均 18	平均 58	平均 78	1～48，平均 19
马朗凹陷	P_2l	20～40	5～48	/	/
泌阳凹陷	Eh_3^s	34～57	23～31	68～83	16.9～31.5

注：Pz_2—上古生界；Mz—中生界。

国内外学者在页岩储集空间及页岩孔隙演化方面做了大量研究，认为页岩储集空间可以概括为 4 大类：粒间孔、粒内孔、有机质孔隙和裂缝。孔隙网络的发育取决于矿物组成及结构，而有机质含量及类型对有机孔隙的发育至关重要，孔隙类型还与成岩作用密切相关[20-21,23]。

笔者利用透射光显微镜及氩离子抛光-场发射扫描电镜观察泌阳、沾化、东营等凹陷的页岩岩心样品，总结认为页岩的储集空间主要有基质孔隙和裂缝，其孔径大小为微米—纳米级，以纳米级为主，微裂缝十分发育。基质孔隙类型主要包括：残余原生粒间孔隙、晶间孔隙[图 6(a)—图 6(c)]、不稳定矿物次生溶蚀孔隙[图 6(d)]及有机孔隙；而有机孔隙依据载体及成因不同，又可分为有机质边缘与碎屑颗粒间孔隙、有机质团块溶蚀孔隙和生烃演化孔隙(表 3，图 6)。

表 3 页岩储层微观孔隙类型及特征

Table 3 Microscopic pore types and characteristics of shale oil reservoir

孔隙类型	孔隙载体	形状	尺寸/nm	丰度	连通性
有机孔隙	有机质本身	蜂窝状、气泡状	50～300	低	较好
	有机质与碎屑颗粒间	长条形，狭缝状	100～800	高	较差
	有机质团块溶蚀	长形、不规则	100～1500	较高	中等
溶蚀孔隙	方解石、长石、黏土矿物	长条形、港湾状	200～2000	较高	好
晶间孔隙	黏土矿物、黄铁矿、方解石重结晶晶体	椭圆形、方形、长条形	80～800	中	中等
粒间孔隙	石英、长石、云母片	方形	100～1500	中低	差

有机孔隙为亲油性，一般不含水，是页岩油气的重要储存场所，其形成和富集受有机质丰度、类型及演化程度的控制。具体成因可能为：①由固体干酪根转化为烃类流体而在干酪根内部形成的孔隙[图 6(e)]；②生成液态或气态烃类聚积生成气泡而成；③释放的有机酸对包裹的方解石、黏土矿物进行溶蚀而成[图 6(f)]。值得注意的是，与页岩气储层相比，由于有机质演化程度相对较低，尚未达到生气窗，页岩油储层中有机质内部的纳米级生烃演化孔隙的发育有限，而是多在有机质与骨架颗粒接触边缘发育长条形、狭缝状的孔隙，宽 100～800 nm[图 6(g)]，这种孔隙丰度高，尺寸较大，认为其可能是结构有机质与骨架间未被完全压实的粒间孔，另外，有机质热演化生成并释放出烃类流体后，其本身体积会有一定收缩，而与周缘矿物基质间形成孔缝。

微裂缝在页岩油储集层中也非常发育，类型多样，成因上可分为构造缝、层间缝、矿物收缩缝及生烃超压缝等。其中以水平层间缝最为发育，在不同成分纹层间接触处，力学性质差异较大，易形成裂缝，且平行层理，长度大，较连续，宽 2～8 μm[图 6(h)]；矿物收缩裂缝主要发育在黏土矿物中，成岩过程中黏土矿物转化脱水及有机质排烃，导致片状黏土矿物层间收缩产生裂缝；而构造微裂缝主要为斜交，缝面较平直，常见纹层错断，多被碳酸盐矿物充填[图 6(i)]。微裂缝不仅是页岩储层的渗流通道，能起到沟通油气和改善物性的作用，而且有利于后期压裂改造的人工裂缝与自然裂缝交汇形成网状缝。

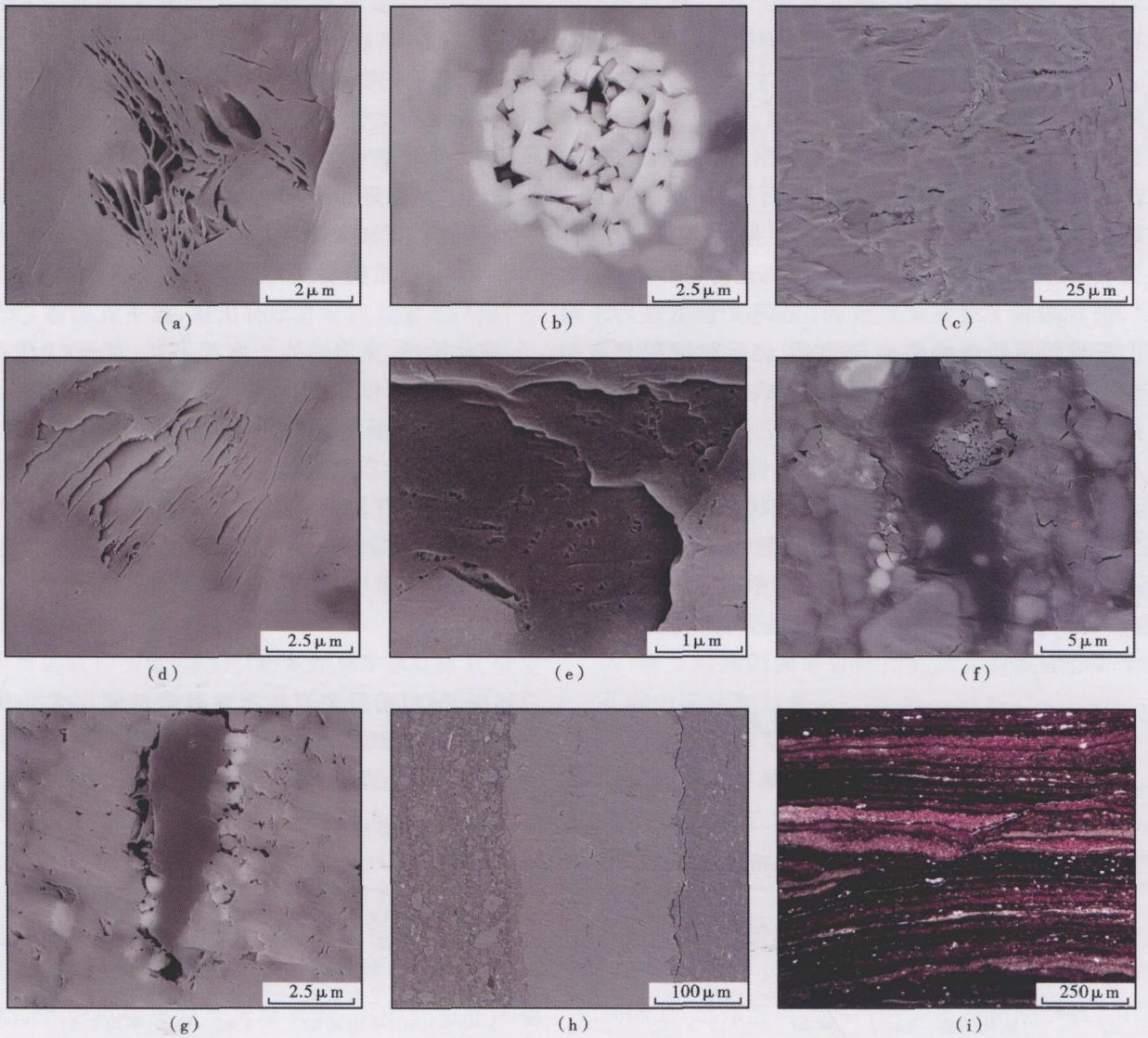
2.4 页岩储层改造条件

页岩油储层的低孔-超低渗的致密特征决定了其开发若想获得工业产能，必须通过大规模的水平井和人工压裂提高储层的导流能力。页岩储层改造条件需考虑储层埋深及岩石可压裂性，而岩石的可压裂性取决于其天然裂缝发育程度、岩石矿物组成及岩石本身力学性质[19]。

埋深一方面对储层物性造成影响，随着深度增加，压实作用增强，储层孔隙度和渗透率降低；另一方面埋

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

深增加导致钻完井等开发成本增加,降低储层的经济价值。页岩中天然裂缝的存在,降低了岩石的抗张强度,能够增强压裂效果,天然裂缝越发育,在实施人工压裂时就越容易形成诱导裂缝并相互连通。在页岩矿物组成上,脆性矿物含量越高,黏土矿物含量越低,则页岩脆性越大,可压裂性越大。而岩石力学性质方面,常用的表征参数有杨氏模量和泊松比,杨氏模量反映岩石的刚性大小,即页岩被压裂后保持裂缝的能力,而泊松比的大小反映了岩石弹性的大小,即页岩在压力下破裂的能力,因此杨氏模量越高,泊松比越低,页岩可压裂性越大。



(a) 黏土矿物晶间孔,泌阳凹陷核三段,泌页 HF1 井 2441.6 m;(b) 黄铁矿晶间孔,泌阳凹陷核三段,泌页 HF1 井 2441.6 m;(c) 方解石重结晶晶间孔,泌阳凹陷核三段,泌页 HF1 井 2447.5 m;(d) 长石粒内沿解理溶缝,泌阳凹陷核三段,泌页 HF1 井 2441.6 m;(e) 有机质生烃演化孔,东营凹陷沙河街组三段下亚段,牛 38 井 3350 m;(f) 有机酸溶蚀孔缝,泌阳凹陷核三段,泌页 HF1 井 2423.6 m;(g) 有机质边缘孔缝,东营凹陷沙河街组三段下亚段,牛页 1 井 3426.2 m;(h) 层间微裂缝,泌阳凹陷核三段,泌页 HF1 井 2437.25 m;(i) 构造微裂缝,泌阳凹陷核三段,泌页 HF1 井 2443.3 m。

图 6　页岩微观储集空间特征

Fig. 6　Microscopic reserving space characteristics of shale oil reservoir

2.5　页岩油聚集机理

目前,对于泥页岩生排烃过程及模拟实验、残余烃类的滞留机理、赋存状态等研究还较薄弱。关德范等开展烃源岩有限空间油气生排模拟研究,揭示烃源岩的生排烃特征随着热演化成熟度增加而呈现出阶段性[24-25],在 R_o 值小于 0.9%,生成的油主要残留于烃源岩中;R_o 大于 0.9% 之后,烃源岩破裂排出油可滞留在烃源岩表面及与之有连通的微裂缝中,部分可进入与烃源岩层互层的砂岩层内。多数学者公认烃类的释放和排出包括两个过程:烃类从干酪根中生成、释放

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的过程和生成的烃类在烃源岩内部初次运移的过程。在前一过程中，液态烃的释放受干酪根的吸附作用和烃类在干酪根网络中的扩散作用控制，主要取决于干酪根的化学性质；在后一过程中，控制泥页岩内滞留烃量的因素主要有烃源岩的岩性组合、有效运移通道、烃源岩内压力分布以及微裂缝发育等[26-27]。残留烃类的赋存状态主要受页岩有机、无机矿物组成、储集空间结构、油气组成及性质等的控制。邹才能依据相关分析并结合场发射和环境扫描电镜观察，提出了页岩油滞留聚集模式，认为液态烃主要以吸附态存在于有机质内部和表面，而在矿物基质（黏土、石英、长石、白云石、方解石）纳米级孔喉中，液态烃主要呈游离态赋存，其次为吸附态，在微裂缝中主要以游离态存在[8]。

页岩油属于滞留聚集成因，是泥页岩生烃后未经排出或排烃后残余的原油，原油未经运移或仅具有初次运移，是典型的自生自储聚集模式。在富有机质页岩持续生油阶段，石油在页岩储集层中滞留聚集，受储集空间结构、介质亲油/水性及原油性质不同等因素控制，页岩油主要以游离、吸附或溶解状态赋存于泥页岩层系的大型裂缝、基质孔隙及微裂缝或其他岩性夹层中。处于生油窗内的富有机质页岩中均可能聚集页岩油，大面积含油、储集体连续分布是页岩油藏的特点，其含油范围受富有机质页岩分布的控制。

3 页岩油储层评价要素及标准

基于页岩油“自生自储”的成藏特点及其储层需要压裂改造的开发条件，认为页岩油储层的评价主要围绕生油潜力、储集能力、储层改造条件及页岩油可动性等方面。评价参数具体可归结为：表征油源条件的有机地球化学参数（干酪根类型、成熟度，有机质丰度，岩石热解参数等），表征页岩油富集条件的储层性质参数（富有机质页岩面积、厚度，孔渗参数，含油丰度等），表征页岩油开采条件的参数（埋深，岩石矿物组成，裂缝发育，岩石力学参数、原油黏度、地层压力等），其中反应生油条件的有机地化参数是重要指标。

3.1 储层评价要素

3.1.1 有机质类型及成熟度

有机质类型及其热演化的阶段限制了页岩油的生成与富集。对于Ⅲ型有机质，以生气为主，无论处于何演化阶段，页岩油的产率都不高；对于Ⅰ、Ⅱ型有机质，在未熟、低熟和高熟阶段，由于生成油量有限或生成的油裂解成气，页岩油的产率较低；而在成熟阶段（0.7%＞R_o＞1.1%），页岩油处于富集窗，产率较高。因此，页岩油储层评价的对象主要为有机质类型为Ⅰ、$Ⅱ_1$型，R_o在0.6%～1.2%，处于低熟—成熟阶段的烃源岩，在此限定范围内，可按有机质丰度来进一步具体分级评价。

3.1.2 总有机碳含量（TOC）

通过前文中有机质对页岩油储层含油量、储集性能的控制和影响的分析，基本明确了有机质丰度控制页岩油储层的产能。

表 4 不同地区页岩油井的相关参数

Table 4 Relevant parameters of shale oil exploratory wells in different regions

地区	层位	井号	产量/($m^3 \cdot d^{-1}$)		试油段 TOC/%	孔隙度/%
			压前	压后		
沾化凹陷	Es_3^x	罗 67	0.69	2.09	1.63～3.85，平均 2.74	4.12～8.75，平均 5.99
		罗 42	79.9		3.27～7.73，平均 5.02	4.80～18.7，平均 10.11
		罗 20	2.3	9.2	3.48～5.50，平均 4.62	3.42～12.9，平均 8.47
		罗 19	1.80	1.98		
		新义深 9	24		0.50～4.02，平均 2.18	5.75～11.30，平均 9.21
泌阳凹陷	Eh_3^s	泌页 HF1	压后稳产：2.5，最高：23.6		2.16～4.96，平均 3.40	2.32～7.19，平均 4.80
		安深 1	压后稳产：0.50，最高：4.68		平均 3.03	
束鹿凹陷	Es_3^x	晋 97		17.7	平均 3.96	
		晋 116x	0.89	12.10	平均 2.17	

统计研究范围内的页岩油试油或产量的相关数据（表 4）可见，这些试油见产能的井段平均 TOC 都高于 2%，TOC 越高，产量越高，当 TOC 增加到 4% 以上时，产量更突出。基于生产数据及资料调研结果，并结合 TOC 对碳酸盐结晶形态影响的界限，分析认为，在其他条件满足的情况下，页岩油聚集并具备工业可采能力的 TOC 下限值为 2%，可以 2%，4% 为界：TOC＜2%，视为无效储层，即使压裂改造也基本不产油；2%＜TOC＜4%，为低丰度储层，有天然低产的可能，压裂后可能获工业油流；TOC＞4%，为高丰度储层，具有一定自然产能，可能达工业价值，压裂稳产后，单井产量较高，稳产时间较长。当然，不同地区的有机质类型及成熟度门限不完全相同，因而总有机碳的可比性存在差异，也并不能单靠 TOC 来“一刀切”式地评

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

价储层。笔者认为,在数据多的地区可以具体分析、确定本区的 TOC 分界值,而在资料较少的探区,推荐使用 TOC 为 2.0%和 4.0%作为页岩油储层及产能评价三分性的界限标准。

3.1.3　富有机质页岩厚度

页岩厚度控制着页岩油藏的含油量和经济效益,富含有机质页岩的厚度越大,页岩油的富集程度越高。目前国内外学者并没有关于页岩储层下限厚度的统一认识,美国成功开发区页岩层系的厚度不低于 30 m,有效页岩的厚度不小于 9 m[28]。储层厚度下限也要考虑其他因素,若有机碳含量高,则储层厚度下限即可适当降低。鉴于国内页岩油的勘探还处于起步阶段,建议具有良好页岩油商业开发价值的页岩层系厚度下限为 40 m,富有机质页岩有效厚度不小于 15 m。

3.1.4　岩石矿物组成

不同的矿物组成控制页岩的孔隙结构,也影响后期储层改造的效果。高脆性矿物含量容易产生天然裂缝及诱导裂缝,而黏土矿物易堵塞渗流通道,不利于后期储层改造。建议优质页岩储层的脆性矿物含量要大于 50%,而黏土矿物含量低于 40%。

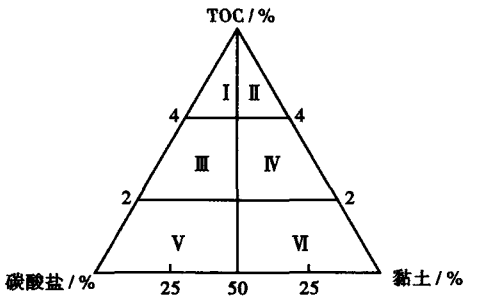
3.1.5　岩石类型

泥页岩常作为细粒沉积物的统称,但具体成分复杂,类型多样。基于有机质在页岩沉积、成岩及储层形成中的重要作用,笔者建议在页岩类型划分中考虑有机质特征,以成分为第一原则,有机碳含量与岩石矿物组成共同决定了页岩类型(图 7)。以 TOC、碳酸盐矿物、黏土矿物为三要素,TOC 以 2%、4%为界,将页岩细分为高有机质、中有机质及低有机质类型。

结合沾化凹陷罗家地区页岩油勘探实践,笔者认为最有利岩相为脆性矿物含量与有机碳含量均为高值的经重结晶的页状灰岩及灰质页岩,主要分布在风暴浪基面以下较为闭塞的半深湖相区,有机质含量高,在湖侵体系域较多发育。

3.1.6　页岩可压裂性

天然裂缝发育程度越高,杨氏模量越大,泊松比越低,页岩脆性矿物含量越高,黏土含量越低,则页岩的可压裂性越大。蒋裕强等提出较好的页岩储层应达到:泊松比 $\mu<0.25$,杨氏模量>20 GPa,脆性矿物含量>40%,黏土矿物含量<30%[29]。



Ⅰ—高有机质灰岩;Ⅱ—高有机质黏土岩;Ⅲ—中有机质灰岩;Ⅳ—中有机质黏土岩;Ⅴ—低有机质灰岩;Ⅵ—低有机质黏土岩。

图 7　页岩岩石类型划分

Fig.7　Petrology classification of shale

3.1.7　页岩油可动性

页岩油勘探开发的关键除了页岩含油量及可压裂性外,页岩油的可动性更与产能密切相关,而储层渗透率、原油密度及黏度、地层压力等是影响页岩油可动性的核心参数。通常较低的原油密度和黏度、高地层压力、高气油比的条件下,更利于页岩油在微米—纳米级孔喉中流动和开采。

鉴于基质型页岩油的储层原始渗透率均很低,主要靠后期人工压裂提高渗透率,而对于裂缝型,其渗透率变动幅度大,加之渗透率的测定方法目前并无统一标准,页岩油的渗流机理及采出条件还有待深入探究。

3.2　储层评价标准及应用

通过以上讨论,在实际研究及广泛调研[8-9,29-34]的基础上,选择与页岩油产能关系密切的参数,拟定以有机碳含量为核心的页岩油储层综合评价标准,以 TOC 为 2%、4%为界,同时综合考虑富有机质页岩厚度、孔隙度、脆性矿物、黏土矿物含量以及岩石力学参数等,将页岩油储层分为 3 级(表 5)。

表 5　页岩油储层评价参数及标准

Table 5　Parameters and criteria of shale oil reservoir evaluation

储层分类	TOC/%	R_o/%	页岩厚度/m	富有机质厚度/m	孔隙度/%	脆性矿物/%	黏土矿物/%	杨氏模量/GPa	泊松比
Ⅰ类-目标储层	大于 4	0.7~1.1	大于 40	大于 15	大于 6	大于 50	小于 40	大于 20	小于 0.25
Ⅱ类-有利储层	2~4	大于或等于 0.5	大于或等于 30	大于或等于 10	大于或等于 4	大于或等于 40	小于或等于 50	大于或等于 18	小于或等于 0.20
Ⅲ类-无效储层	小于 2	小于 0.5	小于 30	小于 10	小于 4	小于 40	大于 50	小于 18	大于 0.20

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

该评价标准应用在单井储层分级上，可先利用 TOC 实测数据和测井数据，建立测井-地球化学响应模型，系统地确定各井目标页岩层段 TOC 值在纵向上的变化，再依据上述标准，划分不同级别的页岩油储层。以泌阳凹陷为例，依据以上标准，大致将泌页 HF1 井进行单井储层分类评价(图 8)，该井 TOC 主体分布在 1.5%～3.5%，整体上划为Ⅱ类，不发育达到一定连续厚度的Ⅰ类。

而在平面上的应用，主要是通过多参数叠合，在 TOC 等值线图的基础上、综合 R_o 等值线图、岩相平面分布图、脆性矿物含量等值线图、富有机质页岩厚度等值线图、孔隙度等值线图及裂缝发育程度平面图等，最终圈定页岩储层有利区分布。

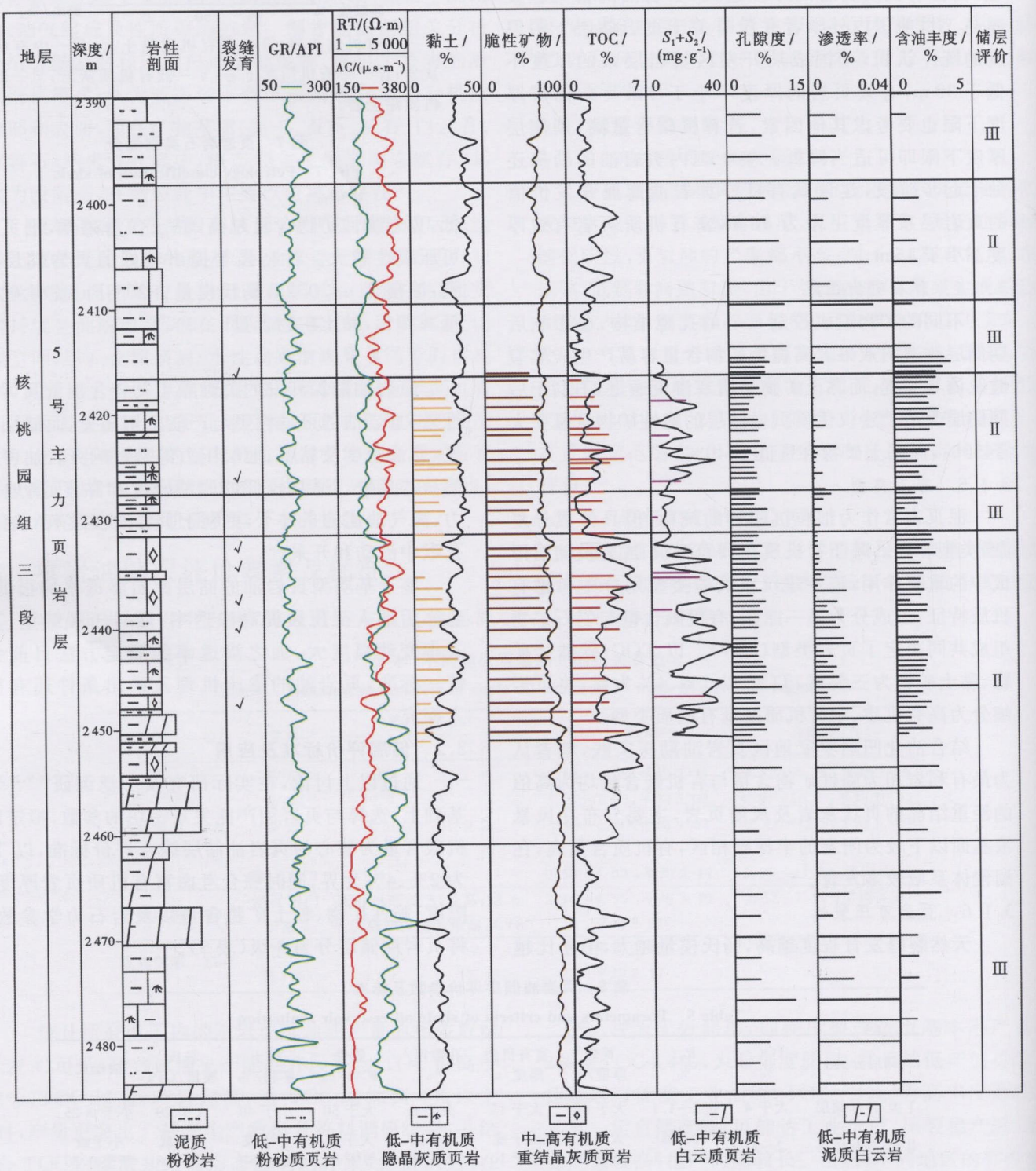


图 8 泌阳凹陷泌页 HF1 井页岩油储层综合评价柱状图

Fig. 8 Shale oil reservoir evaluation column of Well BYHF1 in Biyang sag

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 结　论

(1) 页岩油是指赋存于作为有效生烃源岩的泥页岩地层中的液态烃类。“致密油”与“页岩油”在使用上存在广义和狭义的概念，广义页岩油泛指蕴藏在具有低的孔隙度和渗透率的页岩层系内致密含油层(包括非泥页岩的其他岩类夹层)中的石油资源，而狭义页岩油则专指来自作为源岩的泥页岩中的石油资源。依据储集机理及开发产出特点不同将页岩油储层分为裂缝型和基质型 2 类。

(2) 页岩油储层具有机质含量高，矿物组成复杂、纹层结构发育，储集空间细小，多微米—纳米级孔喉，低孔-特低渗、储层需要压裂改造等基本特点。泥页岩生烃后未经排出或排烃后残余的原油，未经运移、或仅具有初次运移而在页岩储集层中滞留聚集，以游离、溶解或吸附状态赋存于泥页岩层系的大型裂缝、基质孔隙及微裂缝中。

(3) 有机质在页岩油储层的形成及评价中具有重要作用，页岩油储层评价的对象主体为有机质类型为Ⅰ、$Ⅱ_1$ 型，R_o 在 0.5%～1.0%，处于低熟—成熟阶段的烃源岩。提出一套以有机碳含量为核心的页岩油储层评价标准，以 TOC 为 2%、4% 为界，同时综合考虑富有机质页岩厚度、矿物组成及岩石类型、孔渗特征及岩石可压裂性等指标，将页岩油储层分为目标储层、有利储层及无效储层 3 类。

参 考 文 献

[1] EIA. Annual energy outlook 2012, with projections to 2035[M]. Washington: US Energy Information Administration, 2012.

[2] IEA. World energy outlook 2012[M]. London: International Energy Agency, 2012.

[3] Miller B, Paneitz J, Mullen M. The successful application of a compartmental completion technique used to isolate multiple hydraulic-fracture treatments in horizontal Bakken shale wells in North Dakota[R]. SPE 116469, 2008.

[4] Sonnenberg S A, Pramudito A. Petroleum geology of the giant Elm Coulee field, Williston Basin[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 1127-1153.

[5] 张善文，王永诗，张林晔，等. 济阳坳陷渤南洼陷页岩油气形成条件研究[J]. 中国工程科学，2012，14(6)：49-55.
Zhang Shanwen, Wang Yongshi, Zhang Linye, et al. Formation conditions of shale oil and gas in Bonan sub-sag, Jiyang Depression[J]. Engineering Science, 2012, 14(6): 49-55.

[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)：568-577.
Chen Xiang, Wang Min, Yan Yongxin, et al. Accumulation conditions for continental shale oil and gas in the Biyang Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 568-577.

[7] 梁世君，黄志龙，柳波，等. 马朗凹陷芦草沟组页岩油形成机理与富集条件[J]. 石油学报，2012，33(4)：588-594.
Liang Shijun, Huang Zhilong, Liu Bo, et al. Formation mechanism and enrichment conditions of Lucaogou Formation shale oil from Malang sag, Santanghu Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 588-594.

[8] 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 non-marine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.

[9] 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.

[10] 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，2012，3(4)：541-544.
Zhou Qingfan, Yang Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 3(4): 541-544.

[11] Mills R M. The myth of the oil crisis: overcoming the challenges of depletion, geopolitics, and global warming[M]. Westport: State of Connecticut, Greenwood Publishing Group, 2008: 158-159.

[12] 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，2011，34(2)：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, 34(2): 25-30.

[13] 邹才能，朱如凯，吴松涛，等. 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[J]. 石油学报，2012，33(2)：173-187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.

[14] 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)：343-349.
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): 343-349.

[15] 卢双舫，黄文彪，陈方文，等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发，2012，39(2)：249-255.
Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-255.

[16] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Bulletin,2007,91(4):475-499.

[17] 王冠民,任拥军,钟建华,等.济阳坳陷古近系黑色页岩中纹层状方解石脉的成因探讨[J].地质学报,2005,79(6):834-838.
Wang Guanmin,Ren Yongjun,Zhong Jianhua,et al. Genetic analysis on lamellar calcite veins in paleogene black shale of the Jiyang Depression[J]. Acta Geologica Sinica,2005,79(6):834-838.

[18] 王冠民.济阳坳陷古近系页岩的纹层组合及成因分类[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(3):666-671.
Wang Guanmin. Laminae combination and genetic classification of Eogene shale in Jiyang Depression[J]. Journal of Jilin University:Earth Science Edition,2012,42(3):666-671.

[19] 唐颖,邢云,李乐忠,等.页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J].地学前缘,2012,19(5):356-363.
Tang Ying,Xing Yun,Li Lezhong,et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability[J]. Earth Science Frontiers,2012,19(5):356-363.

[20] Loucks R G,Reed R M,Ruppel S C,et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin,2012,96(6):1071-1098.

[21] Slatt R M,O'Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales:contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin,2011,95(12):2017-2030.

[22] 田华,张水昌,柳少波,等.压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J].石油学报,2012,33(3):419-427.
Tian Hua,Zhang Shuichang,Liu Shaobo,et al. Determination of organic-rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods[J]. Acta Petrolei Sinica,2012,33(3):419-427.

[23] 朱日房,张林晔,李钜源,等.渤海湾盆地东营凹陷泥页岩有机储集空间研究[J].石油实验地质,2012,34(4):352-356.
Zhu Rifang,Zhang Linye,Li Juyuan,et al. Organic matter reservoir space of shale in Dongying Sag,Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment,2012,34(4):352-356.

[24] 关德范,徐旭辉,李志明,等.烃源岩生排烃理论研究与泥页岩油气[J].中外能源,2012,17(5):40-52.
Guan Defan,Xu Xuhui,Li Zhiming,et al. Theory study of hydrocarbon generation and expulsion of source rocks and oil and gas in shale[J]. Sino-Global Energy,2012,17(5):40-52.

[25] 李志明,郑伦举,马中良,等.烃源岩有限空间油气生排模拟及其意义[J].石油实验地质,2011,33(5):447-451.
Li Zhiming,Zheng Lunju,Ma Zhongliang,et al. Simulation of source rock for hydrocarbon generation and expulsion in finite space and its significance[J]. Petroleum Geology & Experiment,2011,33(5):447-451.

[26] Pepper A S,Corvi P J. Simple kinetic models of petroleum formation:Part I:Oil and gas generation from kerogen[J]. Marine and Petroleum Geology,1995,12(3):291-319.

[27] Stainforth J G. Practical klinetic modeling of petroleum generation and expulsion[J]. Marine and Petroleum Geology,2009,26(4):552-572.

[28] 王祥,刘玉华,张敏,等.页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J].天然气地球科学,2010,21(2):350-356.
Wang Xiang,Liu Yuhua,Zhang Min,et al. Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. Natural Gas Geoscience,2010,21(2):350-356.

[29] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等.页岩气储层的基本特征及其评价[J].天然气工业,2010,30(10):7-12.
Jiang Yuqiang,Dong Dazhong,Qi Lin,et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry,2010,30(10):7-12.

[30] 于炳松.页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J].地学前缘,2012,19(3):252-258.
Yu Bingsong. Particularity of shale gas reservoir and its evaluation[J]. Earth Science Frontiers,2012,19(3):252-258.

[31] 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 Luojia area in Zhanhua sag[J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(1):83-91.

[32] 骆杨,赵彦超,吕新华.东濮凹陷柳屯洼陷沙河街组三段上亚段盐间泥页岩储层特征[J].石油学报,2013,34(2):293-300.
Luo Yang,Zhao Yanchao,Lü Xinhua. Characterization of the upper Es3 inter-salt shale reservoir in Liutun sag,Dongpu depression[J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(2):293-300.

[33] Mullen J,Lowry J C,Nwabuoku K C. Lessons learned developing the eagle ford shale[R]. SPE 138446,2010.

[34] 苗建宇,祝总棋,刘文荣,等.泥岩有机质的赋存状态与油气初次运移的关系[J].沉积学报,2004,22(1):169-175.
Miao Jianyu,Zhu Zongqi,Liu Wenrong,et al. Relationship between occurrence of organic matter and the primary migration of the hydrocarbon in argillaceous rock[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2004,22(1):169-175.

(收稿日期 2013-06-10 改回日期 2013-08-30 责任编辑 张 怡)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net