

# 有机质在页岩沉积成岩过程及储层形成中的作用

梁超<sup>1,2</sup>, 吴靖<sup>3</sup>, 姜在兴<sup>4</sup>, 操应长<sup>1,2</sup>, 刘淑君<sup>1</sup>, 逢淑伊<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071; 3. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

**摘要:** 通过岩心、显微薄片及电镜样品的观察, 结合定量分析测试结果, 对有机质在页岩形成、演化及储层发育中重要作用进行研究。研究表明: 有机质利于碳酸钙的沉淀, 主要由底栖黏结、浮游黏结及生物颗粒 3 种形式形成碳酸盐, 形成的岩石类型包括骨架岩、黏结岩和颗粒灰岩; 有机质利于铁质络合物的形成, 有机质热演化形成微环境促进碳酸盐矿物的黄铁矿交代; 在埋藏演化过程中, 有机质演化产生有机酸, 对不稳定矿物进行溶蚀, 继而发生重结晶作用, 影响方解石的晶体大小和形态; 有机质直接或间接地产生大量有效的储集空间, 有利于页岩孔隙网络的形成, 继而影响页岩的储集物性; 页岩油产量受总有机碳含量(TOC)影响, 建议页岩油形成并具备工业可采能力的 TOC 下限值为 2%, 同时也需要富有机质页岩具有稳定的厚度, 还应考虑页岩矿物组成及岩石类型、镜质体反射率  $R_o$  等因素。  
**关键词:** 有机质; 埋藏演化; 储层评价; 页岩油; 湖相页岩

中图分类号: TE 122.2 文献标志码: A

引用格式: 梁超, 吴靖, 姜在兴, 等. 有机质在页岩沉积成岩过程及储层形成中的作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版) 2017, 41(6): 1-8.

LIANG Chao, WU Jing, JIANG Zaixing, et al. Significances of organic matters on shale deposition, diagenesis process and reservoir formation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science) 2017, 41(6): 1-8.

## Significances of organic matters on shale deposition, diagenesis process and reservoir formation

LIANG Chao<sup>1,2</sup>, WU Jing<sup>3</sup>, JIANG Zaixing<sup>4</sup>, CAO Yingchang<sup>1,2</sup>, LIU Shujun<sup>1</sup>, PANG Shuyi<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

3. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

4. College of Energy, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on well cores, microscopic sections, scanning electron microscope samples and the relative analysis data, the significances of organic matters on deposition process, diagenesis and shale reservoir were systematically studied. The study shows that organic matters are conducive to the precipitation of calcium carbonate, mainly in terms of benthic stick-knot, planktonic bonding and biological particles to form carbonate. Organic matters can promote the formation of the organic-iron complex, and the micro environment formed during organic matters thermal evolution can promote metasomatism of carbonate minerals by pyrite. During the burial, organic matters produce organic acids, which may cause the dissolution and recrystallization of calcite, and further control the calcite crystal size and conformation. Organic matters can generate abundant storage pores directly or indirectly, which is very important for the formation of pore networks in the shale and for the reser-

收稿日期: 2017-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602142); 国家科技重大专项(2016ZX05006-007, 2016ZX05006-003); 中国博士后基金项目(2015M582165, 2017T100523); 山东省自然科学基金项目(ZR2016DB16)

作者简介: 梁超(1987-), 男, 博士, 博士后, 研究方向为沉积学与非常规油气地质学。E-mail: liangchao0318@163.com。

voir physical properties. The analyses show that the shale oil production is closely related to the TOC content, which increases simultaneously with the TOC content. The study suggests that for the shale reservoir formation and industry capacity, the lower limit of TOC content is 2%, and an effective thickness of organic-rich shale needs to be reached. In addition, the mineral composition, lithofacies, burial depth,  $R_o$  also need to be considered.

**Keywords:** organic matters; burial evolution; reservoir evaluation; shale oil and gas; lacustrine shale

随着页岩油气勘探需求的日益迫切,页岩沉积成岩过程及储层形成机制等核心地质问题亟待解决。有机质作为页岩的重要组成部分,在页岩沉积成岩过程及储层形成中扮演重要角色<sup>[1-2]</sup>。理解有机质对于页岩沉积成岩过程的影响,有助于分析其对于页岩储层特性的控制作用,继而更好地为页岩油气勘探提供理论支撑。中国东部中生界湖相页岩以碳酸盐、黏土矿物、有机质等为主,碳酸盐含量普遍较高,甚至在多个盆地内页岩中,碳酸盐矿物平均含量超过 50%<sup>[3]</sup>。生物或生物化学作用在碳酸盐沉积过程中扮演重要角色<sup>[4-6]</sup>,对于碳酸盐建隆、古环境与气候恢复及油气成藏有着重要意义<sup>[7-10]</sup>。同时,在埋藏演化过程中,有机质的演化生烃与无机矿物的转化作用密不可分,且对于形成新的矿物序列和组合有着重要作用<sup>[11-12]</sup>。有机质演化产生的有机孔作为页岩气的主要储集空间已成普遍共识<sup>[13-17]</sup>,而有机孔对于页岩油的储集是否有效尚不明确。尽管无法确定是有机孔,还是有机质演化过程中产生的其他孔隙成为页岩油的储集空间,

但大量研究已证实烃源岩残余有机碳含量 TOC 与页岩储集物性及含油气量密切相关<sup>[16,18-19]</sup>,这充分说明这些储集空间的形成均与有机质存在直接或间接联系。无论是页岩油还是页岩气储层评价,有机质都是考虑的重要因素<sup>[1,18,20-22]</sup>,因此笔者依据东营凹陷沙三下亚段和沙四上亚段湖相富含有机质页岩,对有机质在页岩沉积过程、埋藏演化及储层形成方面的重要作用进行研究。

### 1 区域地质概况

东营凹陷是中国东部渤海湾盆地济阳拗陷中的一个次级构造单元,属于典型的中新生代的陆相断陷湖盆,油气资源丰富<sup>[1]</sup>。北以深大断裂与陈家庄凸起、滨县凸起接触,南与鲁西隆起及广饶凸起呈超覆关系,西邻林樊家构造、高青凸起,东与青坨子凸起接触,面积约 5 700 km<sup>2</sup>。东营凹陷由利津、博兴、牛庄和民丰等 4 个次级洼陷和中央背斜带、北部陡坡带、南部斜坡带等若干个二级构造带组成(图 1)。

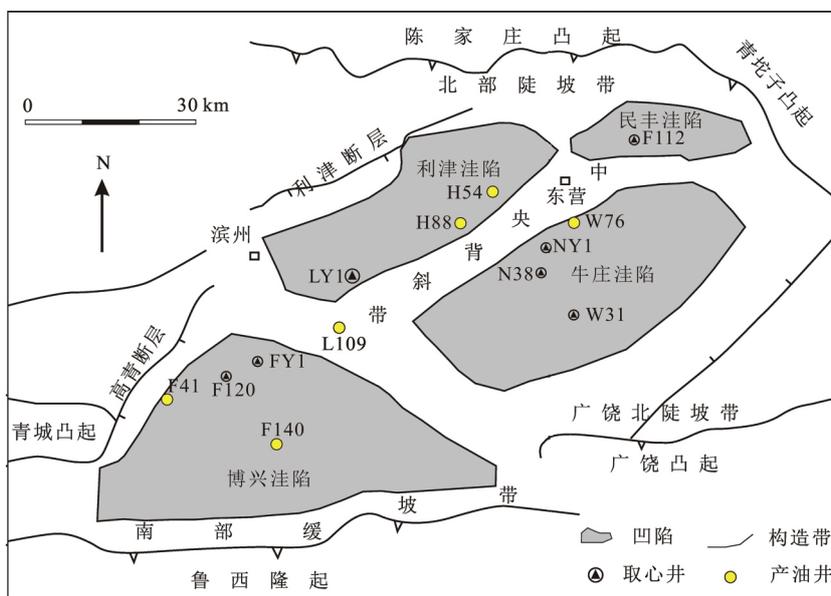


图 1 东营凹陷区域地质构造图

Fig.1 Structural sketch map of Dongying Depression

沙四段上亚段沉积时期,湖盆开始扩张,古气候开始转向暖湿,水体深度开始增大,在湖盆中央则形成了大面积的湖相页岩。沙三段下亚段沉积时期,

东营凹陷构造运动相对稳定,气候更加暖湿,雨量充沛,湖泊面积继续扩大,达到沙河街组沉积期的最大范围,水体深度也达到最大,该期物源供给缺乏,形

成了厚度约 300~500 m 的半深湖—深湖相富有机质页岩。总体上,东营凹陷沙四上一沙三下亚段富有机质页岩具有分布稳定,富含有机质,TOC 均值大于 2%,有机质类型以 I 型为主,主要来自浮游藻类,如沟鞭藻、颗石藻及渤海藻等。此外含有少量的 II 型和 III 型(图 2)。镜质体反射率  $R_o$  为 0.5%~1.9%,主要集中于 0.6%~0.8%,主体处于热成熟演化阶段(图 2)。

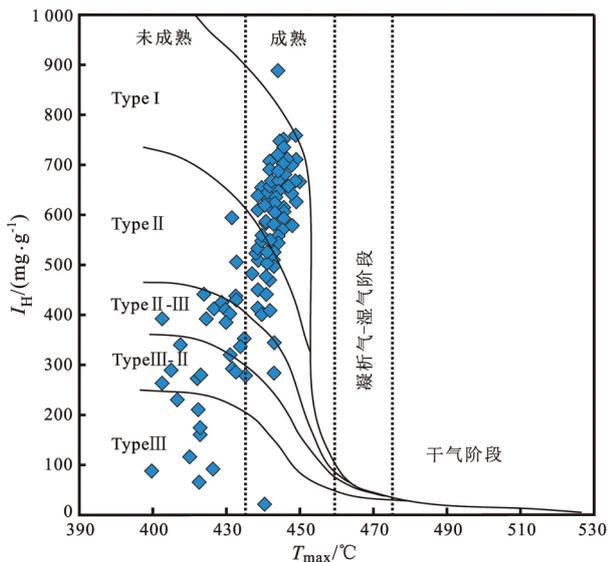


图 2 东营凹陷沙四上一沙三下亚段页岩有机质类型

Fig.2 Organic matter types of  $Es_4^s-Es_3^x$  shale in Dongying Depression

## 2 有机质与页岩沉积成岩作用

### 2.1 沉积过程

前已述及,中国中生界湖相页岩细粒物质以碳酸盐、黏土矿物、粉砂及有机质为主,大量研究已证实,碳酸盐的沉积过程与生物或生物化学作用密不可分。其主要包括以下表现形式:①生物(植物、藻类及细菌类生物)通过光合作用利用水体中  $CO_2$  和  $HCO_3^-$  中的 C,使水溶液的 pH 值提高从而引起碳酸盐的沉积;②生物或生物群(蓝藻、绿藻)通过分泌黏液,捕获或黏结碳酸盐颗粒形成碳酸盐岩;③由食甲烷古菌(ANME)和硫酸盐还原细菌(SRB)共存体形成的甲烷厌氧氧化(AOM)可以产生大量碳酸盐<sup>[4-6]</sup>;④生物体钙化形成生物钙质骨架。生物作用利于  $CaCO_3$  沉淀,岩心观察可以见到中华直管藻垂直生长,黏结方解石形成碳酸盐岩(图 3(a))。同时,浮游藻类黏结碳酸盐颗粒重力大于浮力时一同下沉,或吸附于黏土矿物表面,发生  $CaCO_3$  的沉淀,显微薄片下可以见到多种藻丝体,有呈放射丝状的藻丝体(图 3(b)),还存在呈颗粒形态的藻团(图 3(c))。此外,钙质生物死亡后,其骨架沉积下来,形成了页岩中重要组成部分(图 3(d)、(e))。页岩中古生物化石对于恢复沉积古环境有着重要意义,通过颗石藻、有孔虫等海相生物化石及海相自生矿物海绿石的识别,结合研究区 NY1 井 Sr/Ba 异常,推断东营凹陷沙四上时期存在海侵事件。

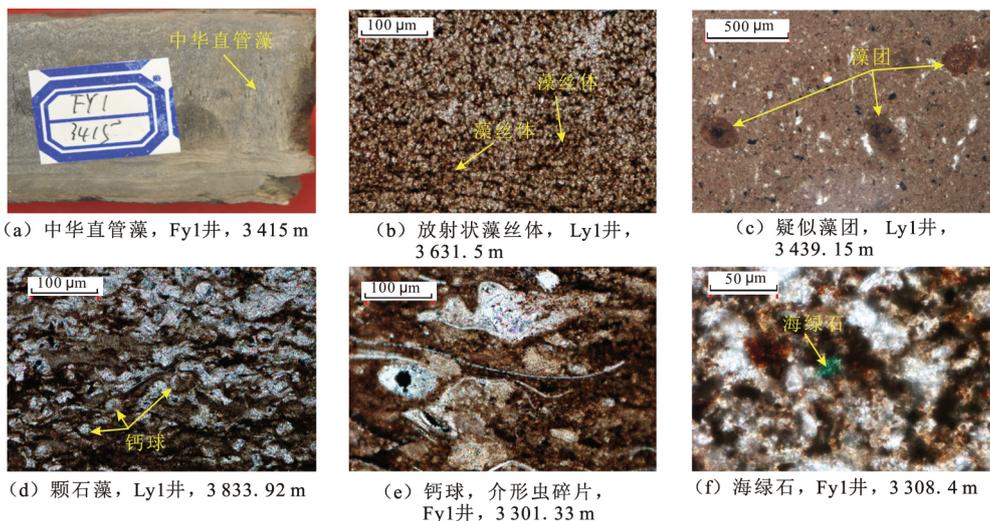


图 3 沙四上一沙三下亚段页岩中藻类及生物化石

Fig.3 Algae and fossils characteristics in  $Es_4^s-Es_3^x$  shale

### 2.2 埋藏演化

细粒物质具有不稳定性特点,在埋藏成岩过程中会发生转化作用<sup>[23-24]</sup>。无机矿物转化以黏土矿

物的转化作用占据主导,如蒙脱石向伊蒙混层继而向伊利石转化。其间伊利石化过程还伴随着二氧化硅析出,是研究区页岩中自生硅质的主要来源。除

了无机矿物的转化过程,有机质与地下环境介质发生生物、化学及物理作用,且随着介质条件的变化发生不同的演化<sup>[25-26]</sup>。研究区沙四上一沙三下页岩中有机质多已进入成熟阶段,在有机质的演化过程中,将释放大量的有机酸,这些有机酸的释放使得地层水酸性增强,促使碳酸盐矿物、长石及黏土矿物被溶解,后期或被黄铁矿等充填(图4)。对于研究区高碳酸盐含量的页岩,碳酸盐矿物特别是方解石溶蚀后,当页岩中流体运移不畅,Ca<sup>2+</sup>以及CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>物质的量浓度逐渐升高,流体pH值逐渐升高,使得

碳酸盐矿物发生重结晶,这在研究区页岩中非常普遍。同时,研究表明碳酸盐矿物的结晶程度与TOC密切相关。

对泥晶方解石、粒状及柱状晶方解石的TOC统计表明,柱状方解石TOC最高,均值大于4%,粒状方解石TOC主要集中在2%~4%,而泥晶方解石TOC一般小于2%(表1)。研究认为,这种现象主要与有机酸排出量有关,高TOC意味着更多的有机酸排出,使得溶解的泥晶方解石量增加,解除Mg<sup>2+</sup>束缚,致使重结晶后碳酸盐颗粒增大。

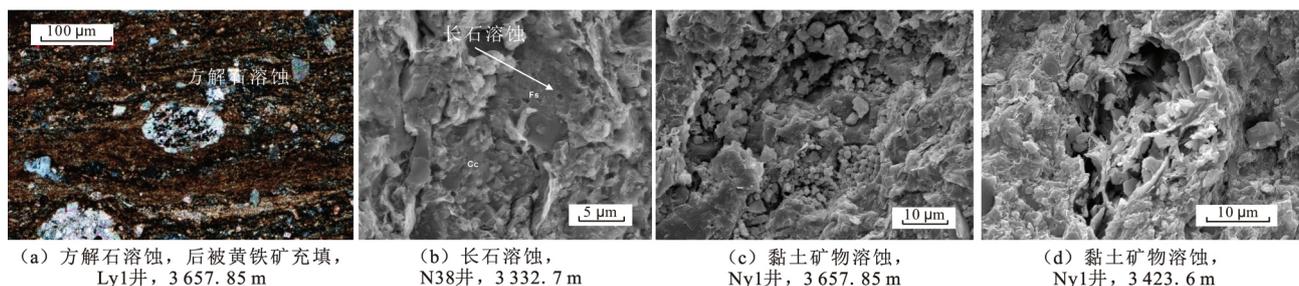


图4 页岩中不稳定矿物溶蚀现象

Fig.4 Dissolution of unstable minerals in shale

表1 不同形态方解石 TOC

Table 1 TOC content of shale with different calcite crystals

形态(样品个数)	TOC 含量/%		
	最小值	最大值	平均值
泥晶方解石(22)	0.58	3.85	2.07
粒状方解石(15)	1.13	4.40	2.68
柱状方解石(7)	2.62	11.40	5.99

沉积物中有机质可与活性铁结合成有机OC-Fe大分子结构,这种强大的关联可以抑制有机碳的微生物降解,从而利于有机碳的保存<sup>[26]</sup>。电镜下可以见到有孔虫钙质骨架被黄铁矿化,内部为有机质充填(图5)。值得注意的是,样品中钙质含量普遍较高,而黄铁矿化主要沿着化石骨架。这是由于有机质埋藏演化过程中,在其周围形成了利于黄铁矿沉淀的微环境,从而使得黄铁矿化围绕有机质。

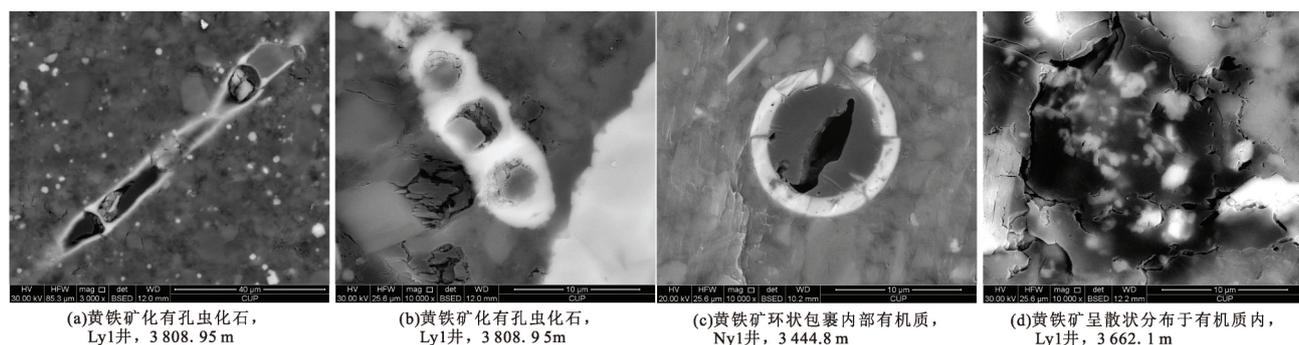


图5 有孔虫壳体被黄铁矿交代

Fig.5 Foraminifera shells replaced by pyrite

### 3 有机质与储层形成

#### 3.1 储集空间类型及物性

有机质对储层发育的影响主要表现在对页岩储集空间的控制。

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<sup>[13,15,17]</sup>。有机质生烃演化过程中,在有机质颗粒内部会产生大量的有机孔。剖光后电镜下观察有机孔孔径介于几十至几百纳米之间,呈椭圆状、气泡状或串珠状(图6(a)、

(b) )。能谱分析表明暗色区域成分主要为 C、O、Si、Al( 图 6(c) ) , 从而证实了这些孔隙为有机质孔。在被黄铁矿包裹的有机质内往往可见较大孔隙( 图 6(d) )。此外, 在富有机质层内, 见到大量的有机质团孔隙, 孔径介于 5~20 μm, 成层出现( 图 6(e) ) ,

放大后可观察到孔隙内为黏土矿物、方解石及石英等( 图 6(f) )。此外有机质在向外排烃过程中对包裹的微晶方解石以及黏土矿物进行溶蚀, 从而形成孔隙, 这种孔隙较有机质颗粒内孔隙大, 可能对于页岩油的储集更为有效。

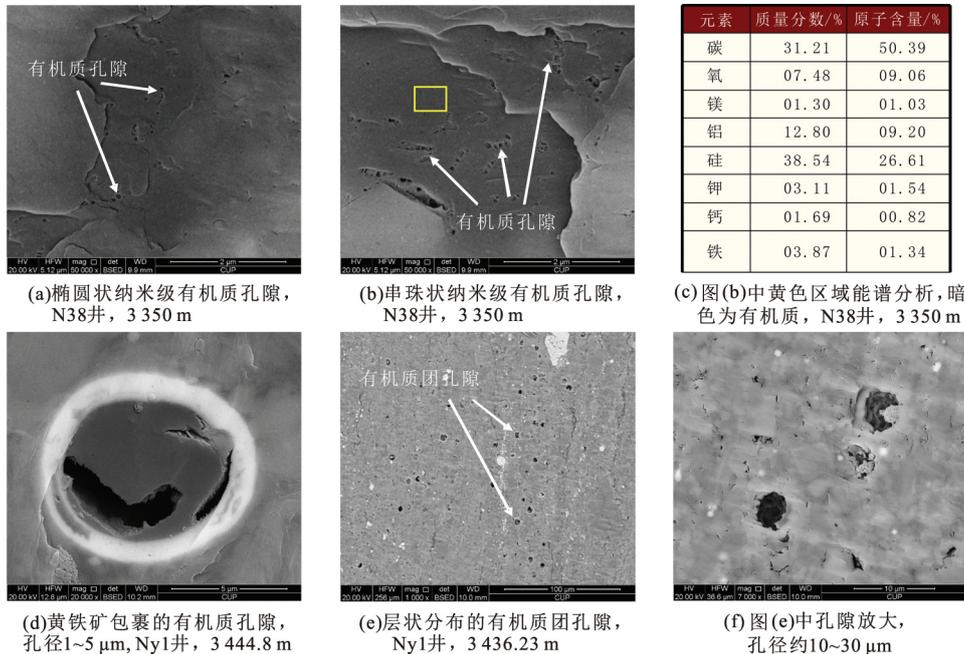


图 6 东营凹陷沙四上一沙三下页岩有机孔发育特征

Fig.6 Organic pores in Es<sub>4</sub><sup>s</sup>-Es<sub>3</sub><sup>x</sup> shale of Dongying Depression

有机质演化过程产生的孔隙并不局限于有机孔。有机质演化排出的有机酸对碳酸盐、长石等矿物进行溶蚀, 形成大量的溶蚀孔隙( 图 7(a)、(b) ) , 同时容易发生重结晶作用而产生重结晶晶间孔, 孔径为 5~50 μm。这普遍存在于重结晶的方解石和

白云石内( 图 7(c)、(d) )。这种由有机质生烃作用引起的溶蚀及重结晶作用, 一方面提供了重结晶晶间孔、溶蚀孔缝、层间缝等储集空间, 一定程度上提高了孔隙度, 另一方面也改变了岩石的力学性质, 增大了岩石脆性, 对页岩储层压裂改造十分有利。

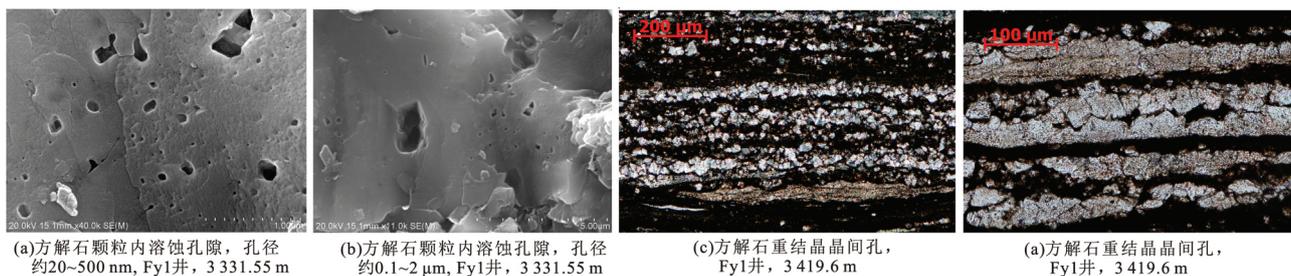


图 7 页岩中溶蚀孔隙及重结晶晶间孔

Fig.7 Dissolution pores and recrystallization intercrystalline pores

有机质的丰度及成层性利于页理的发育, 因此高有机质含量意味着高丰度的页理缝。有机质对储层控制作用还表现在其对裂缝发育的影响。统计数据表明, 构造裂缝发育程度与有机质含量密切相关, 二者具有良好的正相关关系( 图 8(a) )。这是由于有机质排烃后留下的残余碳质导致岩石脆性变强,

在外力作用下, 岩石易于断裂和破碎。研究表明, 有机碳含量与孔隙度大致呈正相关关系( 图 8(b) )。同时, 在对四川盆地志留系龙马溪页岩的研究中发现, TOC 与孔隙体积和含气量呈较好的正相关, 这一方面表明了有机质孔隙对于页岩孔隙网络的重要贡献, 还表明了其对于储层物性的重要作用。

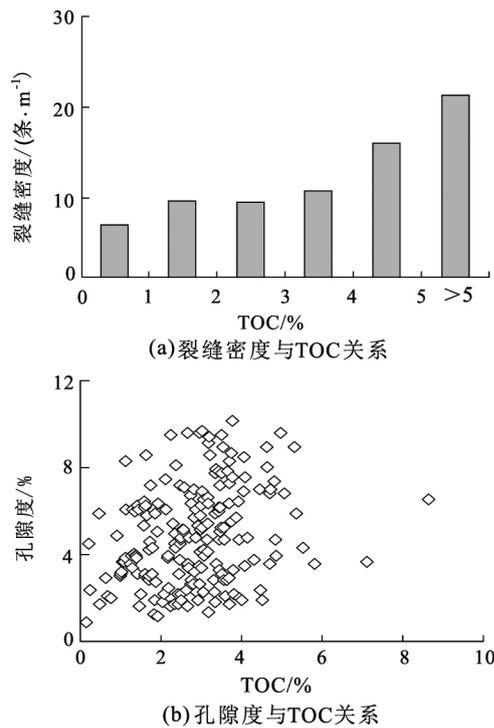


图8 东营凹陷页岩 TOC 与裂缝密度、孔隙度关系

Fig.8 Relationships between TOC content and fractures density and porosity

### 3.2 油气评价

有机质含量对于页岩油气的重要作用不仅表现在对生烃能力的指示,同时还是页岩储层形成的重要参数。对研究区页岩储层而言,有机质的作用除了本身提供基质孔隙(有机孔)外,还通过有机酸的排出对周围不稳定矿物进行溶蚀,再发生重结晶作用,可以产生孔隙空间较大的重结晶间孔。此外,有机质对页理缝及构造裂缝的形成有着促进作用。

大量统计数据表明,页岩油产量(或试油产量)与 TOC 含量存在直接关系(表 2)。TOC 小于 2%, 无效储层,压裂改造也基本不产油; TOC 为 2%~4%, 低丰度储层,有天然低产的可能,压裂后可获工业油流; TOC 大于 4%, 高丰度储层,具有一定自然产能,可达工业价值,压裂稳产后,单井产量较高,稳产时间较长。可见有机质对于页岩油储层形成的重要作用,同时基于这种关联,在页岩油储层评价时 TOC 应当作为重要的参数。建议页岩油形成并具备工业可采能力的 TOC 下限值为 2%,同时需要富有机质页岩具有稳定的厚度,此外,页岩油评价时还应当考虑到岩石矿物构成、岩石类型、埋深、 $R_o$  等参数。

表 2 中国不同凹陷湖相页岩油产量

Table 2 Lacustrine shale oil products of main basins in China

地区	层位	井号	试油/压裂深度/m	油产量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )		试油井段 TOC/%	岩性
				压裂前	压裂后		
沾化凹陷	古近系沙河街组	L67	3 287~3 310	0.69	2.09	1.63~3.85, 平均值 2.74	页岩、钙质页岩
		L42	2 828~2 861	79.90		3.27~7.73, 平均值 5.02	
		L20	2 870~2 880	2.30	9.20	3.48~5.50, 平均值 4.62	
		L19	3 061~3 070	1.80	1.98		
		XYS9	3 370~3 566	24.00		0.5~4.02, 平均值 2.18	
泌阳凹陷	古近系核桃园组	BYHF1	2 431~2 441	压后稳产 2.50 最高: 23.60		2.16~4.96, 平均值 3.40	粉砂质页岩、灰质页岩
		AS1	2 488~2 498	压后稳产 0.23 最高: 4.68		平均值 3.03	
束鹿凹陷	古近系沙河街组	J97	3 623~3 747.2		17.7	平均值 3.96	页岩、泥灰岩
		J116x	3 857~3 944	0.89	12.1	平均值 2.17	
马朗凹陷	二叠系芦草沟组			压裂, 工业油流 最高: 22.2		1.38~11.9, 集中在 3~6	灰质、云质页岩

## 4 结论

(1) 东营凹陷沙四上一沙三下页岩以 I 型有机质为主, 具有高 TOC 特点, 且多已进入成熟阶段。埋藏过程中, 有机质通过自身排酸或有机-无机相互作用对于新的矿物序列和组合起到重要作用, 同时对方解石的晶体大小和形态有着重要影响。

(2) 有机质对于页岩油气的重要作用不仅表现在对生烃能力的指示, 同时还通过直接或间接的方式产生大量的有效储集空间, 增强页岩储层的储集能力。

(3) 重结晶作用及排烃过程将使得页岩脆性增强, 利于页岩储层的人工改造。TOC 与页岩油产量(或试油产量)有着直接关系, 建议页岩油形成并具

备工业可采能力的 TOC 下限值为 2% ,同时也需要富有机质页岩具有稳定的厚度 ,除此之外还应当考虑到页岩矿物组成及岩石类型、 $R_o$  等因素。

#### 参考文献:

- [1] 王永诗,李政,巩建强,等.济阳拗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):83-90.  
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): 83-90.
- [2] 刘传联,舒小辛,刘志伟.济阳拗陷下第三系湖相生油岩的微观特征[J].沉积学报,2001,19(2):293-297.  
LIU Chuanlian, SHU Xiaoxin, LIU Zhiwei. Micro-characteristics of Paleogene lacustrine petroleum source rocks in Jiyang Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 293-297.
- [3] LIANG C, JIANG Z X, CAO Y C, et al. Sedimentary characteristics and origin of lacustrine organic-rich shales in the salinized Eocene Dongying Depression [J/OL]. GSA Bulletin, 2017 [2017-08-29]. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsabulletin/article/353728/?searchresult=1>.
- [4] MICHAELIS W, SEIFERT R, NAUHAUS K, et al. Microbial reefs in the black sea fueled by anaerobic oxidation of methane [J]. Science, 2002, 297(5583): 1013-1015.
- [5] HALLAM S J, PUTNAM N P, RESTON C M, et al. Reverse metha genesis: testing the hypothesis with environmental genomics [J]. Science, 2004, 305(1457): 1457-1462.
- [6] PECKM J, GOEDERT J L, Geobiology of ancient and modern methane-seeps [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 227(1/2/3): 1-5.
- [7] 刘传联.东营凹陷沙河街组湖相碳酸盐岩碳氧同位素组分及其古湖泊学意义[J].沉积学报,1998,16(3): 109-114.  
LIU Chuanlian. Carbon and oxygen isotopic compositions of lacustrine carbonates of the Shahejie Formation in the Dongying Depression and their paleolimnological significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3): 109-114.
- [8] 卢粤晗,孙永革,翁焕新.湖泊沉积有机质的地球化学记录与古气候古环境重建[J].地球化学,2004,33(1):20-26.  
LU Yuehan, SUN Yongge, WENG Huanxin. Lacustrine sediments as a record of changes of regional climate and environment [J]. Geochimica, 2004, 33(1): 20-26.
- [9] REID R P, VISSCHER P T, DECHO A W, et al. The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites [J]. Nature, 2006, 406: 989-992.
- [10] 王月,沈建伟,杨红强,等.微生物碳酸盐沉积及其研究意义[J].地球科学进展,2011,26(10):1038-1049.  
WANG Yue, SHEN Jianwei, YANG Hongqiang, et al. Microbial carbonates and its research significance [J]. Advances in Earth Sciences, 2011, 26(10): 1038-1049.
- [11] TUCKER M E. Sedimentary petrology [M]. Oxford: Wiley-Blackwell, 2001: 92-93.
- [12] APLIN A C, MACQUAKER J S H. Mudstone diversity: origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.
- [13] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79: 848-861.
- [14] 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.
- [15] 邹才能,朱如凯,白斌,等.中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J].岩石学报,2011,27(6): 1857-1865.  
ZOU Caineng, ZHU Rukai, BAI Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1865.
- [16] 梁超,姜在兴,杨镜婷,等.四川盆地五峰组-龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J].石油勘探与开发,2012,39(6):691-698.  
LIANG Chao, JIANG Zaixing, YANG Yiting, et al. Shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 691-698.
- [17] LIANG C, JIANG Z X, CAO Y C, et al. Deep-water depositional mechanisms and significance for unconventional hydrocarbon exploration [J]. AAPG Bulletin, 2016, 100: 773-794.
- [18] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-654.  
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al.

Geological characteristics , formation mechanism and re-source potential of shale gas in China [J]. *Petroleum Exploration and Development* , 2010 ,37( 6) : 641-654.

[19] 董大忠 程克明 王玉满 等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征 [J]. *石油与天然气地质* , 2010 ,31( 3) : 288-301.

DONG Dazhong , CHENG Keming , WANG Yuman , et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region , China [J]. *Oil & Gas Geology* , 2010 ,31( 3) : 288-301.

[20] 邹才能 杨智 崔景伟 等. 页岩油形成机制、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.

[21] 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.

[22] LIANG C , CAO Y C , JIANG Z X , et al. Shale oil potential of lacustrine black shale in the Eocene Dongying Depression , implications for geochemistry and reservoir [J/OL]. *AAPG Bulletin* 2017 [2017-02-15]. <http://archives.datapages.com/data/bulletns/aop/2017-02-15/aapgbtln15249aop.html>.

[23] HOWER J , ESLINGER E V , HOWER M E , et al. Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment: mineralogical and chemical evidence [J]. *Geological Society of America Bulletin* , 1976 ,87: 725-737.

[24] ESSENE E J and PEACOR D R , Clay mineral thermometry: a critical perspective [J]. *Clays and Clay Minerals* , 1995 ,43( 5) : 540-553.

[25] PELTONEN C , MARCUSSEN A , BJORLYKKE K , et al. Clay mineral diagenesis and quartz cementation in mudstones: the effects of smectite to illite reaction on rock properties [J]. *Marine and Petroleum Geology* , 2009 ,26: 887-898.

[26] KARINE L , ALFONSO M , ALEXANDRE O , et al. Preservation of organic matter in sediments promoted by iron [J]. *Nature* , 2012 ,438: 198-200.

(编辑 徐会永)