

文章编号: 0253-2697(2018)07-0754-13 DOI:10.7623/syxb201807003

## 东营凹陷页岩油储层孔隙演化

张 顺<sup>1,2</sup> 刘惠民<sup>1,3</sup> 王 敏<sup>1,2</sup> 傅爱兵<sup>1</sup> 包友书<sup>1</sup> 王伟庆<sup>1</sup> 滕建彬<sup>1</sup> 方正伟<sup>1</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院 山东东营 257022;

2. 中国石油化工集团公司胜利油田博士后科研工作站 山东东营 257000; 3. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司 山东东营 257000)

**摘要:** 东营凹陷古近系沙河街组三段下亚段—沙河街组四段上亚段为一套较低成熟度陆相页岩层系,通过岩石薄片、氩离子抛光扫描电镜观察分析、核磁共振、高压压汞和低温氮气吸附实验,获取了页岩储层孔隙结构及孔隙度等信息,分析了矿物成分和有机质含量对孔隙度及孔径的影响,进一步结合成岩热模拟实验,探讨了主要孔隙类型的演化特征。结果表明:①页岩储层孔隙结构复杂,微米—纳米级储集空间具有保存液态烃类的储集能力,游离相原油主要分布在孔径较大的方解石晶间溶蚀孔隙、重结晶晶间孔、黏土矿物晶间收缩缝等孔隙中。②页岩储层孔隙度及孔径主要受控于架构矿物和有机质的含量;孔隙度与长英质矿物含量、有机质含量均呈线性正相关关系,与碳酸盐矿物含量呈负相关。③埋深2500~3500 m是孔隙演化的关键深度段,在此深度区间,有机质生烃排出的有机酸浓度以及压力系数增大区间与孔隙度高值段有良好的对应关系;页岩油储层储集空间的形成几乎都与黏土矿物的成岩演化有关;抗压实能力强的方解石等碳酸盐晶粒形成的架构空间,以及伴随生、排烃过程的溶蚀作用形成碳酸盐晶间和晶内溶蚀孔隙,均增加了储层孔隙度;生烃超压和溶蚀的匹配作用造成3500~3800 m出现孔隙度局部增大的现象,孔隙大小、分布及连通性明显变好。

**关键词:** 页岩储层;孔径;孔隙度;成岩阶段;孔隙演化;古近系;东营凹陷

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## Pore evolution of shale oil reservoirs in Dongying sag

Zhang Shun<sup>1,2</sup> Liu Huimin<sup>1,3</sup> Wang Min<sup>1,2</sup> Fu Aibing<sup>1</sup> Bao Youshu<sup>1</sup>

Wang Weiqing<sup>1</sup> Teng Jianbin<sup>1</sup> Fang Zhengwei<sup>1</sup>

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257022, China*; 2. *Postdoctor Scientific Research Stations, Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257000, China*; 3. *Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257000, China*)

**Abstract:** The Paleogene Lower sub-member 3 and Upper sub-member 4 of Shahejie Formation in Dongying sag are a set of low-maturity continental shale reservoirs. By means of rock thin sections, argon ion polishing and scanning electron microscopy (SEM) analysis, magnetic resonance technology, high-pressure Hg injection and cold nitrogen gas adsorption experiment, the pore structure, porosity and other information of shale reservoirs are acquired to further analyze the influences of mineral content and organic matter content on porosity and pore size. On this basis, the evolutionary characteristics of main pore types is explored using diagenetic thermal simulation experiment. The results show that (1) Shale reservoirs have complex pore structure, the micron-nanometer reserving space has the reserving capability of liquid hydrocarbons, and the free-phase oil is mainly distributed in the intergranular dissolution pores of calcite with large pore size, the recrystallized intergranular pores, the intergranular contracted fractures of clay mineral and other pores. (2) Shale reservoir porosity and pore size are directly controlled by framework mineral and organic matter content; the porosity is linearly and positively correlated to felsic mineral content and organic matter content, while negatively correlated to carbonate mineral content. (3) The buried depth of 2500-3500 m is the key depth interval of pore evolution. In this interval, the concentration of organic acid and the increase range of pressure coefficient for organic-matter hydrocarbon generation and expulsion are well corresponding to the high-value zone of porosities; the formation of reserving spaces in shale oil reservoirs are almost all related to the diagenetic evolution of clay minerals; the reservoir porosity is increased by the framework space consisting of calcite and other carbonate crystals with high compaction resistance as well as the carbonate intergranular and intergranular dissolution pores formed by dissolution associated with hydrocarbon generation and expulsion; the matching effect of hydrocarbon overpressure and dissolution results in a partial increase of porosity in 3500-3800 m, where the size, distribution and connectivity of pore system are significantly improved.

**Key words:** shale oil reservoir; pore size; porosity; diagenetic stage; pore evolution; Paleogene; Dongying sag

**基金项目:** 国家科技重大专项(2017ZX05049)、国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB239102)和国家自然科学基金项目(No. 41572087)资助。

**第一作者及通信作者:** 张 顺,男,1985年8月生,2009年获中国石油大学(华东)学士学位,2015年获中国石油大学(华东)博士学位,现为中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院博士后,主要从事石油地质综合研究。Email: satisfactoryshun@163.com

引用:张顺,刘惠民,王敏,傅爱兵,包友书,王伟庆,滕建彬,方正伟. 东营凹陷页岩油储层孔隙演化[J]. 石油学报,2018,39(7):754-766.  
Cite:ZHANG Shun,LIU Huimin,WANG Min,FU Aibing,BAO Youshu,WANG Weiqing,TENG Jianbin,FANG Zhengwei. Pore evolution of shale oil reservoirs in Dongying sag[J]. Acta Petrolei Sinica,2018,39(7):754-766.

页岩油气是油气生成后由于泥页岩岩石致密、孔径小、渗透率低而在泥页岩地层中大量滞留的结果。页岩油气的广泛勘探开发,已经改变了石油地质学及全球油气储量的分布。伴随页岩油勘探开发技术的研究,在细粒物质成分及成因<sup>[1-6]</sup>、油气资源评价<sup>[7-12]</sup>、页岩沉积环境<sup>[13-15]</sup>、孔隙类型及特征<sup>[16-18]</sup>、成岩演化模拟<sup>[19-23]</sup>等方面取得了创新性认识和重要进展。与页岩气勘探成果比较,近年来中国页岩油勘探形式严峻,根据油气资源评价结果,中国东部断陷盆地古近系页岩油可采资源量超过  $56.59 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[24]</sup>。在储层研究方面,储集空间和储集性能一直是研究的热点,对页岩储层研究不仅要刻画这些孔隙,还要厘清这些储集空间的成因以及具体控制因素,探寻孔隙的垂向演化规律和分布,从而寻找有利储集层段和优势储集相带。笔者以东营凹陷古近系中一低成熟度页岩储层(沙河街组三段下亚段—沙河街组四段上亚段泥页岩)为研究对象,定量表征了孔隙孔径和孔隙度等参数,分析了矿物含量、有机质丰度和成熟度对孔隙发育的影响,并以评价页岩含油性及储集性能为目的,充分考虑“生储一体”的特点,对页岩成岩阶段进行了划分,分析了重要孔隙类型在不同成岩阶段的演化特征,这一研究成果对页岩油井位部署工作有一定的指导意义。

## 1 地质背景

东营凹陷是济阳拗陷内典型的开阔中生代—新生代箕状凹陷,也是济阳拗陷内最大的次级负向构造单元,构造演化经历了裂陷期、断陷期和拗陷期3个阶段,沙河街组四段(沙四段)沉积中—晚期—沙河街组三段(沙三段)沉积期是东营凹陷强烈断陷期<sup>[25]</sup>。沙四段沉积中—晚期,气候由沙四段沉积早期的干旱开始变湿润,降水量增加,盆地下沉,湖水盐度较高,属于常年闭流湖性质。沙三段沉积早期,气候湿润,湖盆范围增大,盆地断陷作用增强,可容空间较大<sup>[25]</sup>。广泛分布的深水—半深水环境为泥页岩等细粒物质的沉积提供了有利的条件与场所,形成了厚150~500m的沙河街组四段上亚段(沙四上亚段,  $E_{s_4}^s$ )—沙河街组三段下亚段(沙三下亚段,  $E_{s_3}^s$ )页岩,其中沙四上亚段页岩主要为咸水湖沉积,沙三下亚段页岩为微咸水湖沉积。对3口页岩系统取心井进行了分析化验测试(牛页1井、樊页1井、利页1井),其岩石类型以纹层状泥质灰岩、灰质泥岩及脉状亮晶灰岩为主,在沙四上亚段底部发育咸水环境下块状、纹层状泥质白云岩以及硬石膏等。

## 2 储层孔隙特征及控制因素

### 2.1 页岩油的赋存与孔隙基本特征

东营凹陷页岩油主要赋存在渗透率极低的暗色泥页岩与泥质粉砂岩、碳酸盐岩夹层系统中,呈自生自储、连续分布的特点。页岩储层孔隙类型多样<sup>[13,24]</sup>,其中黏土矿物收缩孔缝[图1(a)]、方解石晶间孔[图1(b)]、方解石重结晶晶间孔[图1(c)]、有机质孔[图1(d)]、碳酸盐岩溶蚀孔[图1(e)、图1(f)]较为发育,部分孔隙与微裂缝难以区分,具有一体化的特征。游离相原油主要分布在微孔隙与裂缝中[图1(g)—图1(i)],而吸附相态的油气聚集主要受控于页岩有机质及颗粒表面物质的吸附作用,吸附气体均以游离态形式存在于有机质孔和无机质孔中。

对东营凹陷牛页1井沙三下亚段—沙四上亚段不同埋深、不同岩相类型的6个样品(取样深度及基本特征见表1)进行了氩离子抛光扫描电镜观察分析、核磁共振实验、毛细管高压压汞和低温氮气吸附实验等平行样品测试,依次获取了孔隙大小、形貌及孔隙度等微观孔隙结构信息。所有测试均在中国石油化工集团公司页岩油气勘探开发重点实验室完成,主要岩石类型的孔隙发育情况和孔隙度特征见表1。

不同岩石的孔隙类型和孔隙结构存在明显差异。以核磁共振实验为例,6个样品的核磁共振  $T_2$  谱曲线普遍呈2~3个峰,反映不同孔径的孔隙和微裂缝均发育<sup>[26]</sup>;不同类型页岩  $T_2$  谱峰形态不同(图2),说明不同岩石类型孔、缝发育状况差异较大。纹层状泥质灰岩和泥质白云岩左峰普遍局部起伏,说明相同级别孔隙孔径存在较强的不均一性;脉状重结晶灰岩  $T_2$  弛豫时间较长,且右峰谱峰值大于其他岩石类型,该峰下包面积占  $T_2$  谱总下包面积的20%,反映孔径分布范围较大,裂缝占总孔隙空间比例较大。

结合孔径和孔隙度数据,孔径大于30nm孔隙占总孔体积比例越高,孔隙度越大。从孔径大小看,脉状重结晶灰岩、纹层状泥质灰岩孔径 $>30 \text{ nm}$ 孔隙比例较高(表1),且孔隙开放性和连通性较好。原油呈浸染状、液状与微粒混生[图1(g)、图1(h)],总体上,以微裂缝和较大孔隙为中心,轻质原油在岩石表面呈覆膜状产出并在裂缝周围富集[图1(g)—图1(i)],微米—纳米级储集空间具有保存液态烃类的储集能力。胜利油田勘探开发研究院根据高压压汞、含油饱和度和GRI孔隙度(样品粉碎,以氦气作为扩充气)联合测



试结果表明:原油主要赋存在 10 nm 以上孔隙中,孔隙度 3.5%可能是有效含油的下限。因此从孔径大小对总孔隙度贡献及含油性而言,纹层状泥质灰岩及脉状重结晶灰岩中发育的有机质收缩微缝、孔径较大的方解石晶间溶蚀孔隙(120~900 nm)、重结晶晶间孔(100~40 000 nm)、黏土矿物晶间收缩缝(20~1 200 nm)是重要的孔隙类型,也是本文研究的重点。

## 2.2 孔隙发育受控因素

### 2.2.1 矿物含量与孔径、孔隙度的关系

东营凹陷古近系泥页岩中的石英多为陆源搬运成因,黏土矿物主要为陆源搬运、悬浮絮凝沉降成因,其中伊/蒙混层矿物主要由蒙脱石经成岩演化而成;在自然演化剖面上,石英与黏土矿物含量变化趋势一致。碳酸盐矿物来源广泛,主体为非陆源沉积形成。根据

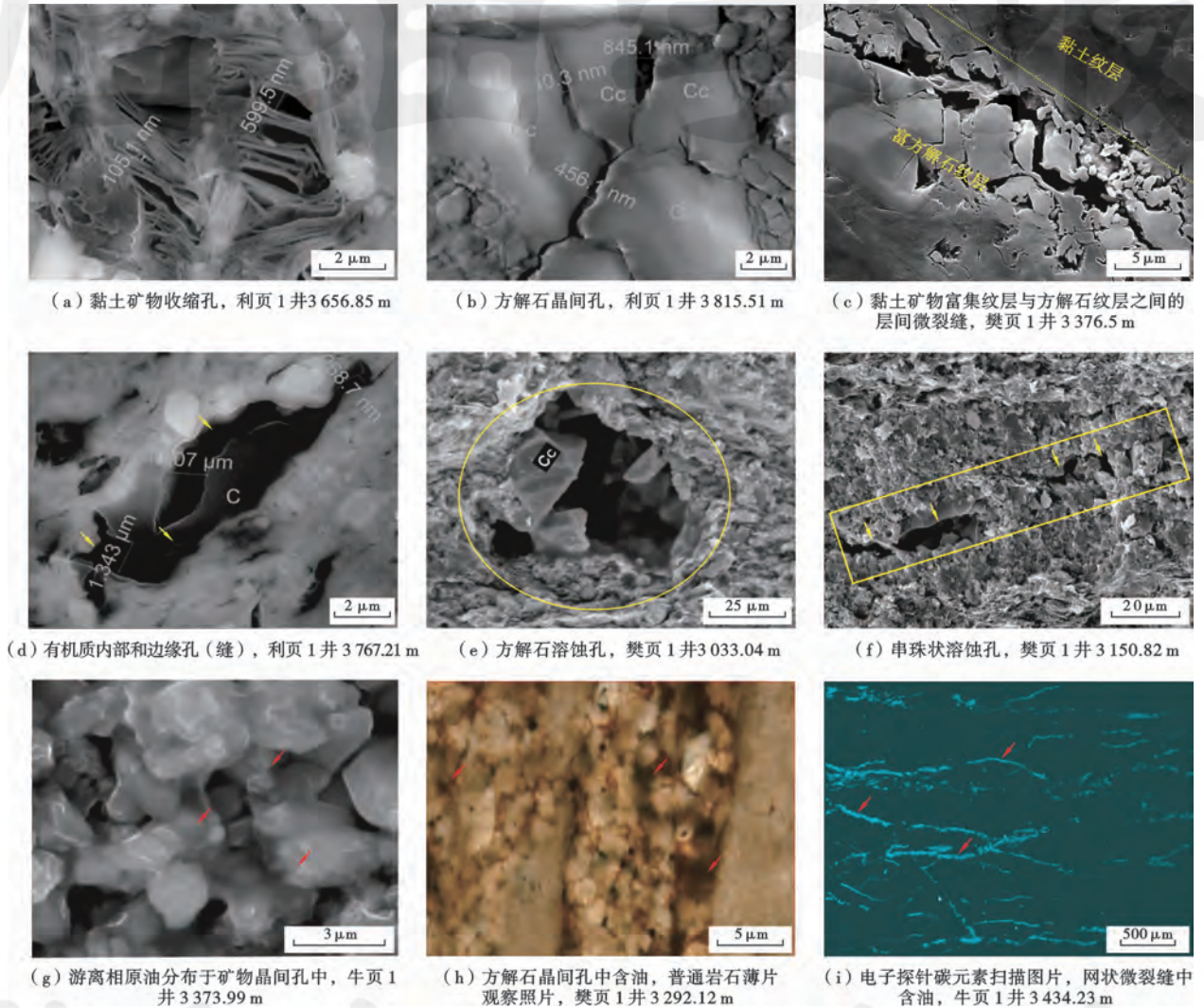


图1 东营凹陷古近系页岩储层储集空间类型及页岩油赋存位置

Fig. 1 Types of reservoir space and the occurrence position of shale oil in the Paleogene shale reservoir of Dongying sag

表1 主要岩石孔隙类型及孔径大小

Table 1 Sizes and types of pores in major rocks

样品号	深度/m	层位	岩石类型	主要孔隙(裂缝)类型	孔隙度(核磁法)/%	微米孔隙平均孔径/μm	纳米孔隙平均孔径/nm
11#	3296.14	Es <sub>3</sub> <sup>x</sup>	脉状重结晶灰岩	方解石重结晶晶间孔、溶蚀孔、有机质收缩缝	12.50		40.32
39#	3301.82	Es <sub>3</sub> <sup>x</sup>	层状泥质白云岩	白云石化晶间孔、层间微缝、晶内溶蚀孔	7.90	18.2	32.09
95#	3316.55	Es <sub>3</sub> <sup>x</sup>	纹层状泥质灰岩	方解石原生晶间孔、黄铁矿晶间孔、层间微缝、异常高压缝	10.76	22.0	30.15
562#	3436.37	Es <sub>4</sub> <sup>s</sup>	纹层状白云质泥岩	黏土矿物絮凝成因孔、黏土矿物收缩缝	8.90	8.2	12.05
650#	3462.83	Es <sub>4</sub> <sup>s</sup>	(纹)层状灰质泥岩	黏土矿物絮凝成因孔、黏土矿物收缩缝、方解石原生晶间孔	12.79	12.0	14.00
759#	3496.71	Es <sub>4</sub> <sup>s</sup>	膏质泥岩	黏土矿物收缩缝、石膏晶间孔	6.13	7.2	15.09

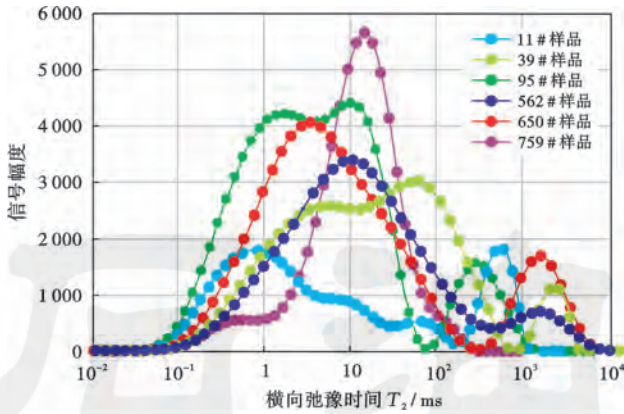


图 2 东营凹陷页岩核磁共振  $T_2$  谱

Fig. 2 NMR  $T_2$  spectrum of shale in Dongying sag

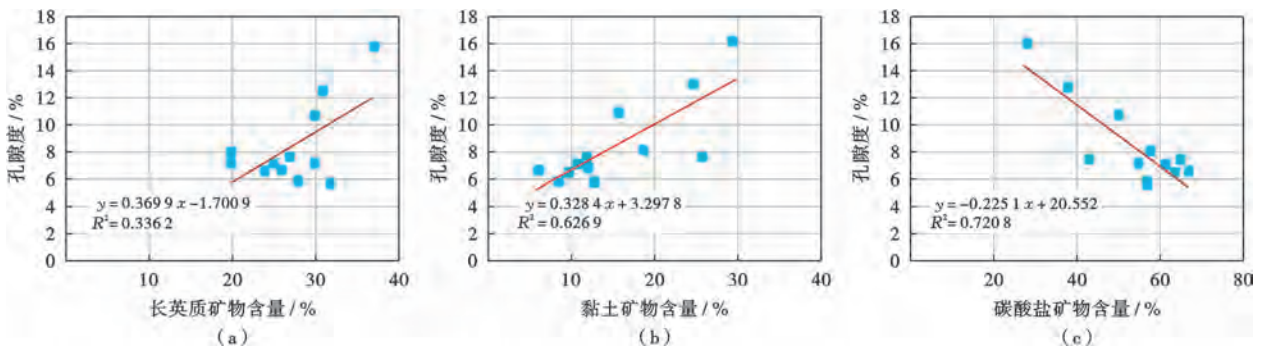
牛页 1 井不同深度 12 个样品(包含 2.1 节中的 6 个样品)的核磁共振测试结果,储层孔隙度与长英质矿物含量呈线性正相关关系[图 3(a)],与黏土矿物含量呈弱正相关关系[图 3(b)],与碳酸盐矿物呈线性负相关关系[图 3(c)]。这一相关性与显微镜下观察结果一致:硅质矿物虽然粒度细小,但在埋深成岩过程中,刚性的石英颗粒便于大量孔隙的保存,除此之外,黏土矿物大大提高了储层的比表面积,在矿物转化过程中体积缩

小,形成大量成岩晶间孔缝。镜下观察显示,泥、微晶方解石使岩石变得致密,孔径和孔体积变小,与黏土等矿物均匀混合沉积时,碳酸盐矿物的化学胶结及充填作用对孔隙的破坏作用更加显著。在孔隙数目上,方解石含量较高的纹层状泥质灰岩优于纹层状灰质泥岩,孔体积则恰恰相反,纹层状泥质灰岩孔体积平均为  $0.6 \mu\text{m}^3$ ,纹层状灰质泥岩孔体积大于  $1 \mu\text{m}^3$ 。

长英质矿物及黏土矿物含量与微米级孔隙平均孔径呈弱正相关关系,与纳米级孔隙孔径呈负相关关系[图 4(a)];碳酸盐矿物含量与纳米、微米级孔径的关系恰恰相反[图 4(c)]。一方面由于黏土矿物和长英质矿物与碳酸盐矿物成反比,垂向演化剖面上呈现此消彼长的关系;另一方面可能与碳酸盐矿物尤其是方解石胶结和重结晶作用,减少了原本泥微晶方解石(或与黏土矿物)之间空间,破坏了原本发育的晶间孔隙,使原生孔径较大的晶间孔数量骤减<sup>[24]</sup>。

### 2. 2. 2 有机质含量与孔隙发育的关系

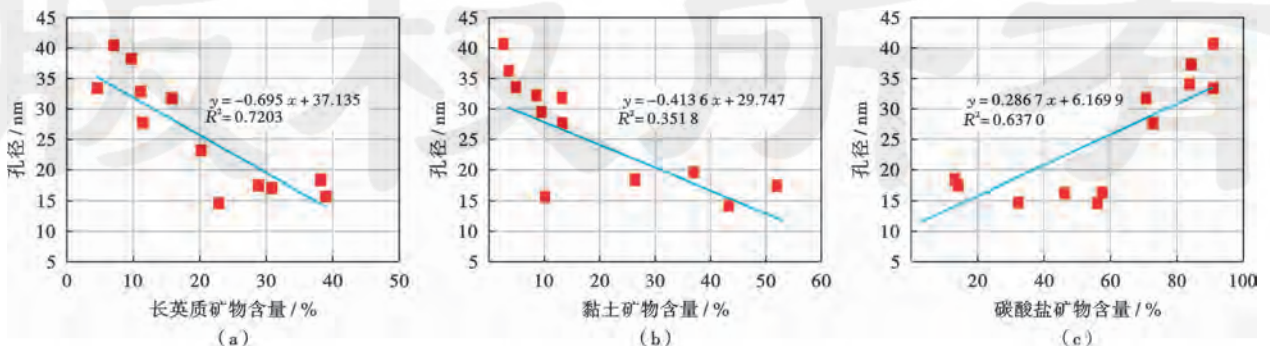
东营凹陷沙三下亚段和沙四上亚段页岩有机质丰度较高,干酪根以 I 型为主。TOC > 4.0% 时,储层在演化程度较高的条件下,生烃转化形成 4% 以上的次生孔隙<sup>[16,18]</sup>,且高丰度烃源岩一般具有较高的有机生



注:测试采用核磁共振法。

图 3 页岩孔隙度与主要矿物含量关系

Fig. 3 Relationship between major minerals content and porosity of shale



注:测试采用氮气吸附法。

图 4 纳米级孔隙孔径大小与主要矿物含量关系

Fig. 4 Relationship between major minerals content and nano-pore size



烃孔隙。对不同埋深不同岩相类型的样品进行 TOC 和孔隙度分析测试,绘制两者关系散点图[图 5(a)],可见其呈线性正相关关系。需要注意的是 TOC 过高或过低都不利于总孔隙度增加:含量过低没有足够的有机质生烃,发育有机质孔和溶蚀孔等次生孔隙少;含量适中时,压实效应由方解石等无机矿物抵消,有机质生烃增孔作用主导;有机质含量过高时,有机质塑性

强,易被压实,不利于总孔隙度增加。通过统计页岩系统取心井不同层位样品(干酪根类型均为 I 型)  $R_o$  与孔隙度关系,发现总孔隙度与  $R_o$  呈弱正相关关系[图 5(b)],有机质孔隙的发育和聚集与有机质丰度和有机质成熟度有关<sup>[27]</sup>,伴随热演化  $R_o$  增大,有机质孔由较低成熟度的边缘缝到密集产出的有机质内部孔演化,有机质孔隙度增大。

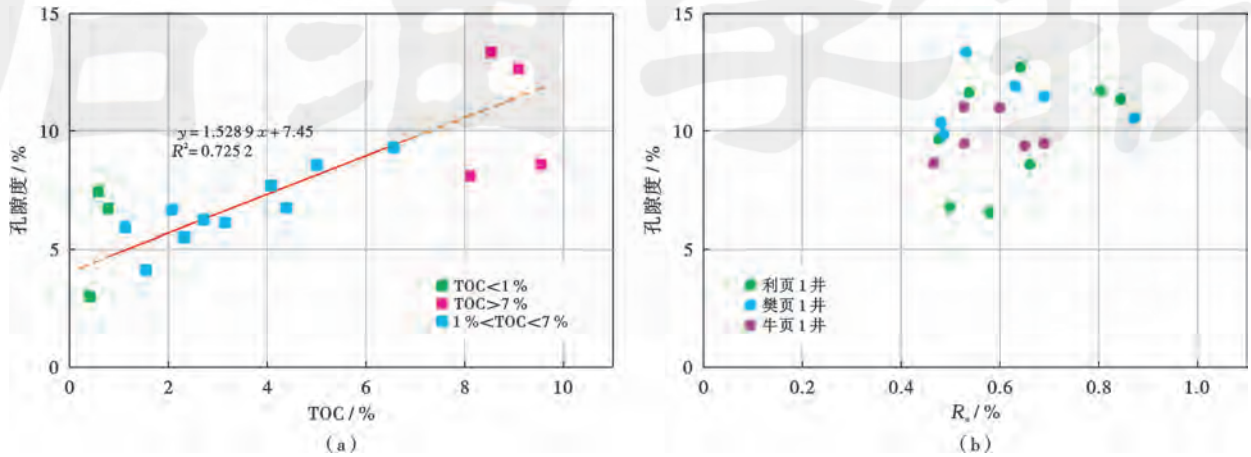


图 5 有机质含量及成熟度与孔隙度关系

Fig. 5 Relationship between the organic content, maturity and porosity

### 3 储层孔隙演化特征

#### 3.1 成岩及物性演化特征

页岩与砂岩在孔隙骨架的稳定性、成岩矿物转化程度、成岩流体来源与数量等方面均有较大差异。矿物类型的多样性和成岩体系的封闭性使东营凹陷页岩成岩及孔隙演化较为复杂。前人研究表明,黏土矿物的脱水收缩与转化、方解石重结晶、碳酸盐岩的溶蚀、有机质生烃

演化等是控制页岩油储集空间形成与发育的关键成岩作用<sup>[13,24]</sup>。结合上述孔隙发育主要受控因素,参照碎屑岩、碳酸盐岩及黏土岩的成岩阶段划分标志<sup>[28-29]</sup>,进一步结合东营凹陷泥页岩自身岩石矿物特征,以评价页岩含油性及储集性能为目的,考虑到“生储一体”的特点,笔者对咸水—半咸水湖盆页岩成岩阶段进行了划分,主要划分标志(表 2)显示东营凹陷沙三下亚段—沙四上亚段泥页岩处于中成岩阶段,少数处于晚成岩阶段(图 6)。

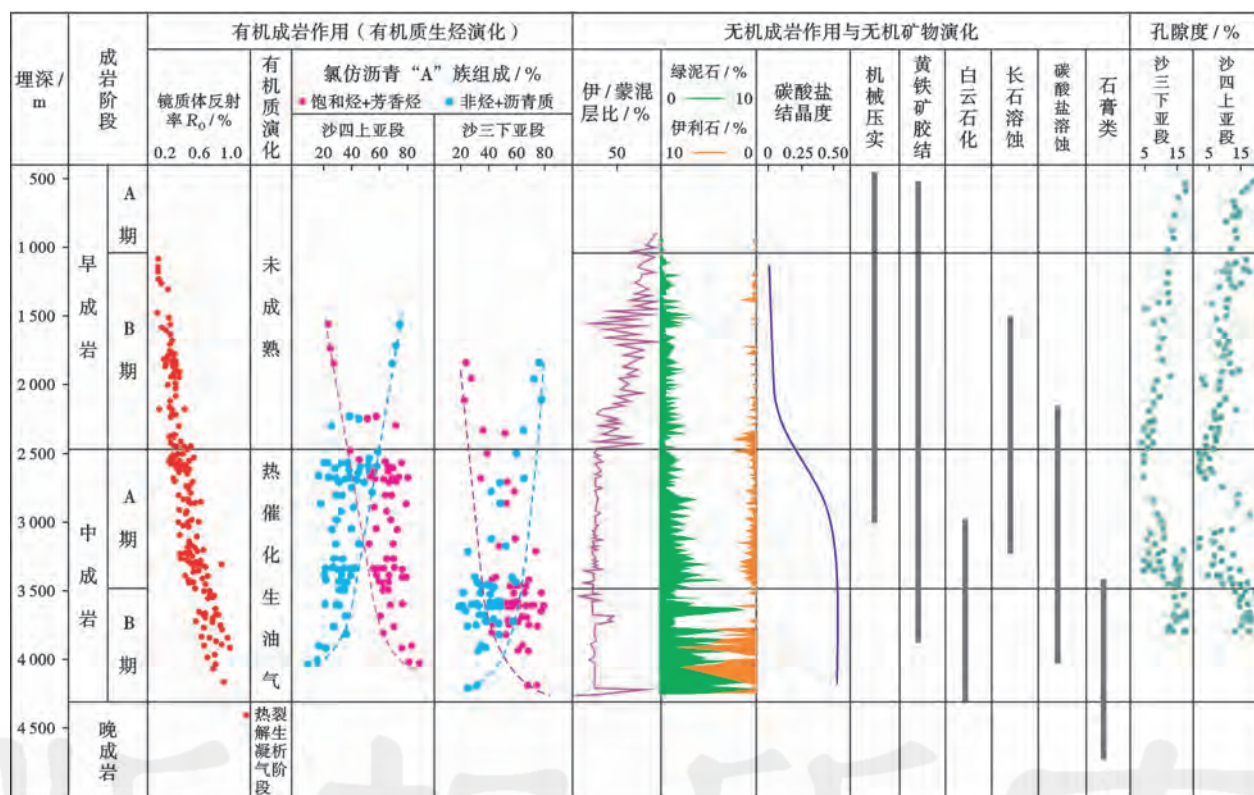
表 2 东营凹陷沙三下亚段—沙四上亚段泥页岩成岩阶段划分标志

Table 2 Identified symbols of diagenesis stage division in shale of Dongying sag during the stage of Lower Es<sub>3</sub> and Upper Es<sub>4</sub>

划分标志	主要特征	最高成岩阶段
埋深	2 700~4 000 m	中成岩阶段 B 期
$R_o$	0.5%~1.2%	中成岩阶段
$T_{max}$	430~445 °C	中成岩阶段 B 期
黏土矿物及其组合特征	(C+I/S+D)	中—晚成岩阶段
	绒球状、叶片状绿泥石	中成岩阶段 B 期—晚成岩阶段
	伊/蒙混层类型为部分有序、有序混层 伊/蒙混层比最小为 15%	中成岩阶段 A 期 中成岩阶段
碳酸盐结晶程度	泥晶	早成岩阶段
	泥晶—中晶(粒状晶) 中晶—粗晶(柱状晶)	中成岩阶段 A 期 中成岩阶段 B 期—晚成岩阶段
亮晶方解石部分包裹体测温	盐水包裹体测温 92~131.2 °C	中成岩阶段 A 期
氧同位素 $\delta^{18}O$	高负值达 -12.52‰	中成岩阶段 B 期
其他自生矿物	铁白云石	中—晚成岩阶段
	重晶石	中成岩阶段 B 期
排烃门限	2 400~3 000 m	中成岩阶段

以孔隙度局部增大深度段为例(图 6),在埋深 2 500~3 000 m,储层含油饱和度增加,原油非烃及沥青质含量高,密度、黏度较高,页岩孔隙度呈现增大趋势。一方面有机质生烃演化排出有机酸(尤其是咸水环境的沙四上亚段页岩储层,在 2 500 m 便开始排烃<sup>[13,24]</sup>),有机质收缩贡献一部分孔隙体积,有机酸溶蚀原生方解石形成晶内溶蚀孔隙;另一方面黏土矿物压实后脱水收缩贡献一部分孔体积。埋深大于 3 km,储层含油饱和度迅速增高,原油总烃含量逐步增高,非烃、沥青质降低,密度、黏度降低明显,页岩储层大规模排烃,造成异常高压,为层间缝的开启提供条件<sup>[15,30]</sup>。岩心及薄片观察发现,方解石大规模重结晶的深度约在 3 km<sup>[31-32]</sup>,一般埋藏越大,晶粒越粗,形成时的温度越高<sup>[33]</sup>,配合生烃超压及酸性流体溶蚀等增孔扩容机制,形成重结晶晶间孔—黏土矿物收缩缝—有机质孔

等有效的储集空间组合<sup>[16-17]</sup>。埋深进一步增大,溶液很快趋于饱和而重新沉淀,许多裂缝和孔隙又会被各种新生矿物(如碳酸盐矿物、自生石英、黄铁矿、硬石膏等)以及重结晶的黏土矿物等充填胶结<sup>[34-35]</sup>,把邻近的一些孔隙和喉道堵塞,导致 3 300~3 500 m 处孔隙度降低<sup>[35]</sup>。储层含油饱和度逐步下降,原油总烃含量大于非烃、沥青质,轻重比例迅速增加,黏度稳定至低值,生烃超压和溶蚀的匹配作用造成 3 500~3 800 m 处出现孔隙度局部增大的现象,孔隙系统的大小、分布及连通性明显变好,增孔程度大于由于胶结等破坏成岩作用带来的减孔量,证明页岩碎屑及矿物基质在较高演化阶段也能形成大量次生微孔隙。因此,中成岩 A 期—B 期是孔隙演化以及孔隙度增大的关键时期,烃类流体演化在形成有机质孔的同时,影响了其他类型孔隙的生成和演化。



注:测试数据来源于中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院及文献<sup>[15-18,35]</sup>,其中 3 200~3 500 m 的孔隙度和 R<sub>0</sub> 数据来自利页 1 井和樊页 1 井。

图 6 东营凹陷泥页岩成岩阶段划分及孔隙度演化特征

Fig. 6 Evolution characteristics of shale porosity and process of shale diagenesis in Dongying sag

### 3.2 主要孔隙类型不同成岩阶段演化特征

在岩心观察描述、地球化学数据及地应力数据分析基础上,对东营凹陷 3 口系统取心井大量样品进行岩石薄片和扫描电镜观察分析,统计了孔隙类型、孔径、孔隙度等数据。对研究区最为发育的纹层状泥质灰岩(实验模拟样品深度为 3 007.10 m, TOC = 4.5%,

R<sub>0</sub> = 0.46%)进行低成熟度页岩高温高压成岩改造模拟实验(实验在中国石油勘探开发研究院完成),温度、压力设置条件及反应产物的地球化学特征数据见表 3,伴随温度、压力条件变化,架构矿物类型和形貌发生变化,主要孔隙类型模拟演化特征如图 7 所示。笔者结合镜下观察孔隙自然演化特征和统计分析结果,进一



表3 成岩热模拟实验条件及热模拟产物地球化学数据

Table 3 Information of experimental conditions and geochemical parameters of simulated samples of diagenetic thermal simulation

初始静岩压力	最终静岩压力/MPa	初始温度/°C	升温时间/h	最终温度/°C	TOC/%	R <sub>o</sub> /%	S <sub>1</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> )	S <sub>2</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> )	T <sub>max</sub> /°C
常压	55.0	25	96	300	4.39	0.49	1.03	27.90	438
常压	82.5	25	96	350	4.21	0.53	1.48	28.09	441
常压	110.0	25	96	400	2.25	1.35	0.05	0.49	565
常压	137.5	25	96	450	2.32	2.39	0.02	0.13	602
常压	165.0	25	96	500	3.37	2.81	0.23	0.65	516

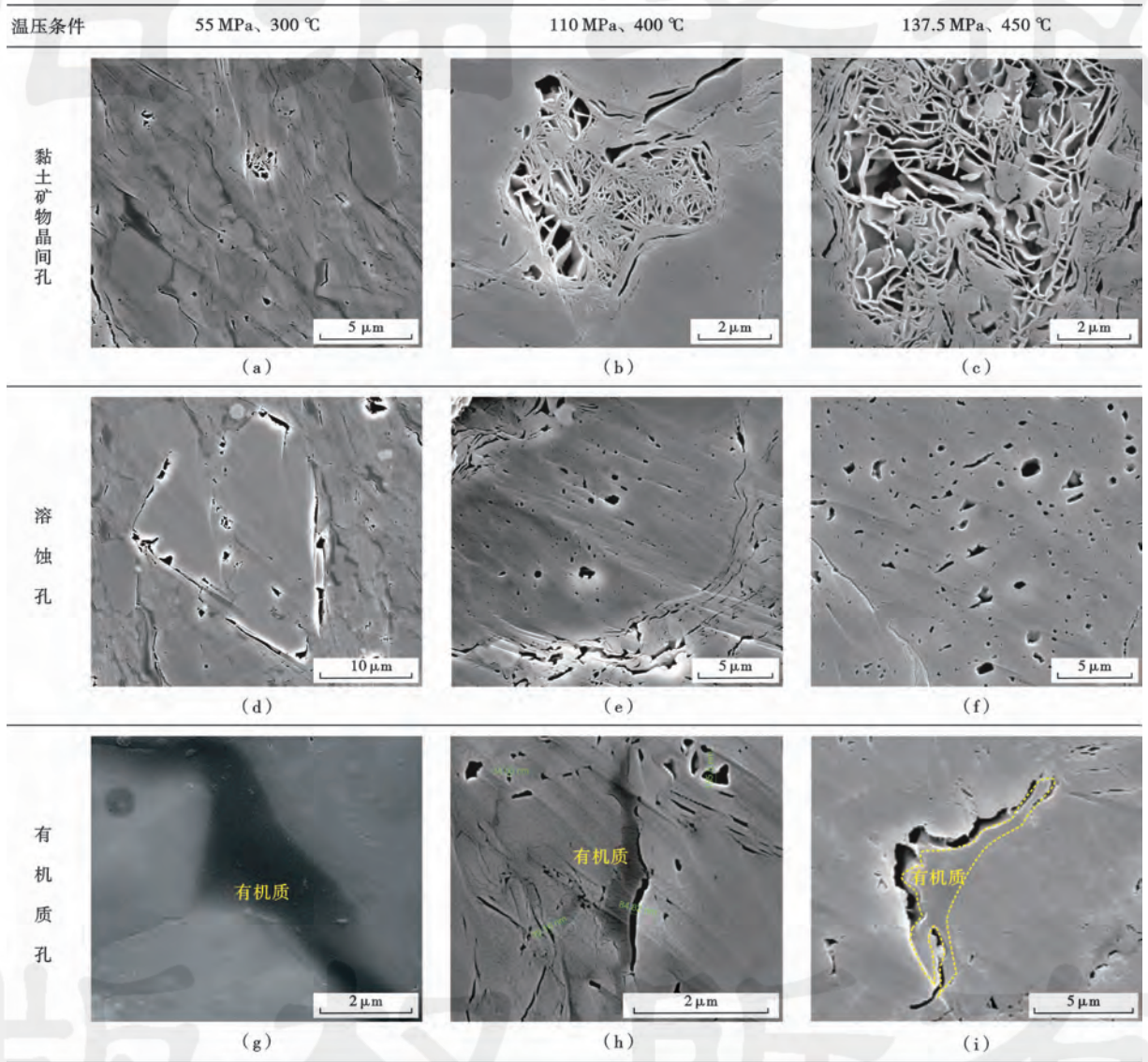


图7 不同温压条件下主要孔隙类型演化特征

Fig. 7 Major pore types evolution characteristics at different temperature-pressure conditions

步探讨了黏土矿物晶间孔、方解石晶间孔及溶蚀孔在不同成岩阶段演化特征。

3.2.1 黏土矿物晶间孔

页岩储层储集空间的形成几乎都与黏土矿物的成岩演化有关。如图8所示,早成岩阶段(1 km以浅)压实作用使细粒物质紧密压实、孔隙体积大量丧失,饱含原始沉积水的、絮凝成因的黏土矿物从湖底软泥状态

逐渐被压固,大量絮凝晶间孔被压扁。早成岩阶段B期,蒙皂石持续脱水开始发生伊利石化,伊/蒙混层在经历了1000~1500 m的降低后又呈现增大趋势;埋深大于1500 m,机械压实和化学压实作用促使黏土矿物脱水收缩和转化,转化过程中一方面消耗大量K<sup>+</sup>,另一方面析出Mg<sup>2+</sup>,产生硅质。大量蒙脱石向伊利石转化、体积缩小产生微孔隙的过程中形成过渡态伊/

蒙混层,对有机质生烃具有促进作用。中成岩阶段 A 期,对应埋深 3 000~3 500 m,黏土矿物中大部分蒙脱石完成了向伊利石的转化<sup>[27,36-37]</sup>,有机质生烃作用达到高峰后开始减弱。黏土矿物类型及富集方式决定了孔隙大小和形貌<sup>[36-38]</sup>,伊/蒙混层结晶度较低,晶间孔及收缩缝更为发育(图 6 和图 8)。中成岩阶段中后期—晚成岩阶段,碱性成岩流体环境中绿泥石含量增多,发育绒球状绿泥石,一方面可能堵塞溶蚀孔隙<sup>[39]</sup>,另一方面形成绿泥石晶间孔(图 8)。

封闭体系成岩热模拟实验结果显示,随着温度、压力增大,黏土矿物转变总体趋势呈现片状到丝片状到

絮状的特征[图 7(a)—图 7(c)],代表了蒙脱石和伊/蒙混层向伊利石转化,转化过程中黏土矿物脱水收缩增加黏土矿物晶间孔和收缩缝的发育丰度<sup>[22,40]</sup>。

### 3.2.2 方解石晶间孔、溶蚀孔

东营凹陷古近系页岩中的碳酸盐矿物来源广泛,主体非陆源沉积形成,主要为生物(化学)成因或后期重结晶成因。页岩储层底部到顶部,方解石含量整体表现由小到大再变小至再次增大的演化规律。根据岩石薄片和扫描电镜观察统计结果,沙四上亚段—沙三下亚段,受沉积水介质和成岩作用影响,晶体形貌呈现由粗晶、微晶—泥晶—粗晶—泥微晶—粗晶的演化特征<sup>[24]</sup>。

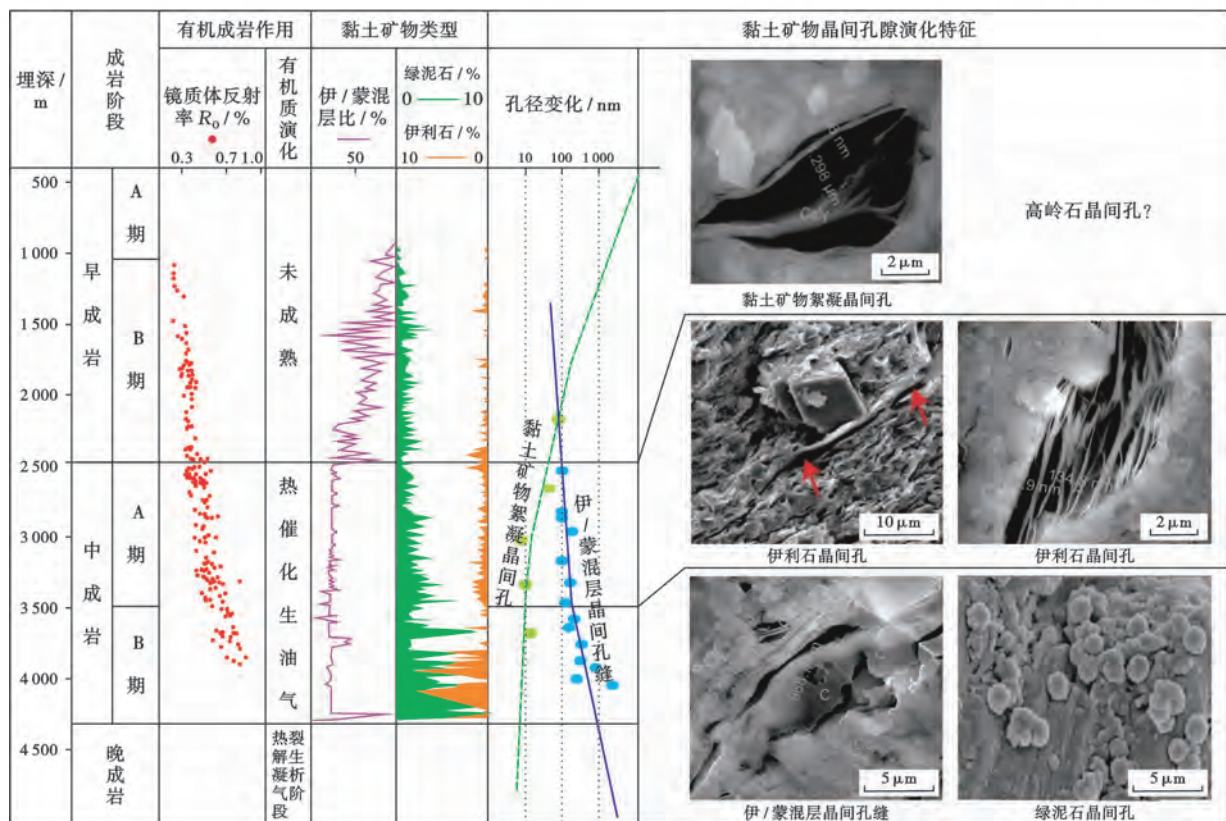


图 8 不同成岩阶段黏土矿物晶间孔演化特征

Fig. 8 Clay-mineral pores evolution characteristics at different diagenetic stage

架构矿物发育程度、晶体形貌决定了孔隙的类型及微观结构,对应方解石晶体间孔隙呈现规律性变化:早成岩阶段,生物化学作用促进泥晶方解石发育,在固结程度不够强时,原生方解石晶体间孔隙发育,伴随压实作用增强,细粒堆积物紧实致密,原生方解石晶体间孔隙骤减[图 1(b)和图 9]。在埋深大于 2 km 时配合黏土矿物排水收缩作用,晶体间孔隙特征显著。进入中成岩阶段 A 期,灰泥沉积物中的文石和高镁方解石经新生变形作用转变为低镁方解石,重结晶作用使原始沉积的泥晶质点增大至微晶、粉晶及细晶,最终成脉状在黏土层间产出<sup>[41]</sup>,重结晶内部发育一些晶间孔,

该部分晶间孔主要是重结晶晶体间未长满的空间、解理缝及后期溶蚀形成的溶蚀孔等共同组成的储集空间组合[图 1(c)和图 9]。因此,方解石等脆性碳酸盐矿物的演化,对东营凹陷古近系页岩储层孔隙演化的影响不容忽视。

泥页岩生烃排酸过程有利于次生孔隙发育<sup>[23]</sup>,而方解石溶蚀是东营凹陷页岩层系最常见的溶蚀现象<sup>[30]</sup>,对牛页 1 井页岩样品进行扫描电镜观察,溶蚀孔较发育,溶蚀孔隙的孔隙结构受晶体形貌及结构影响;就溶蚀强度而言,沙三下亚段底部溶蚀和沙四上亚段中、下部溶蚀较强。自然演化剖面揭示,自底部至顶



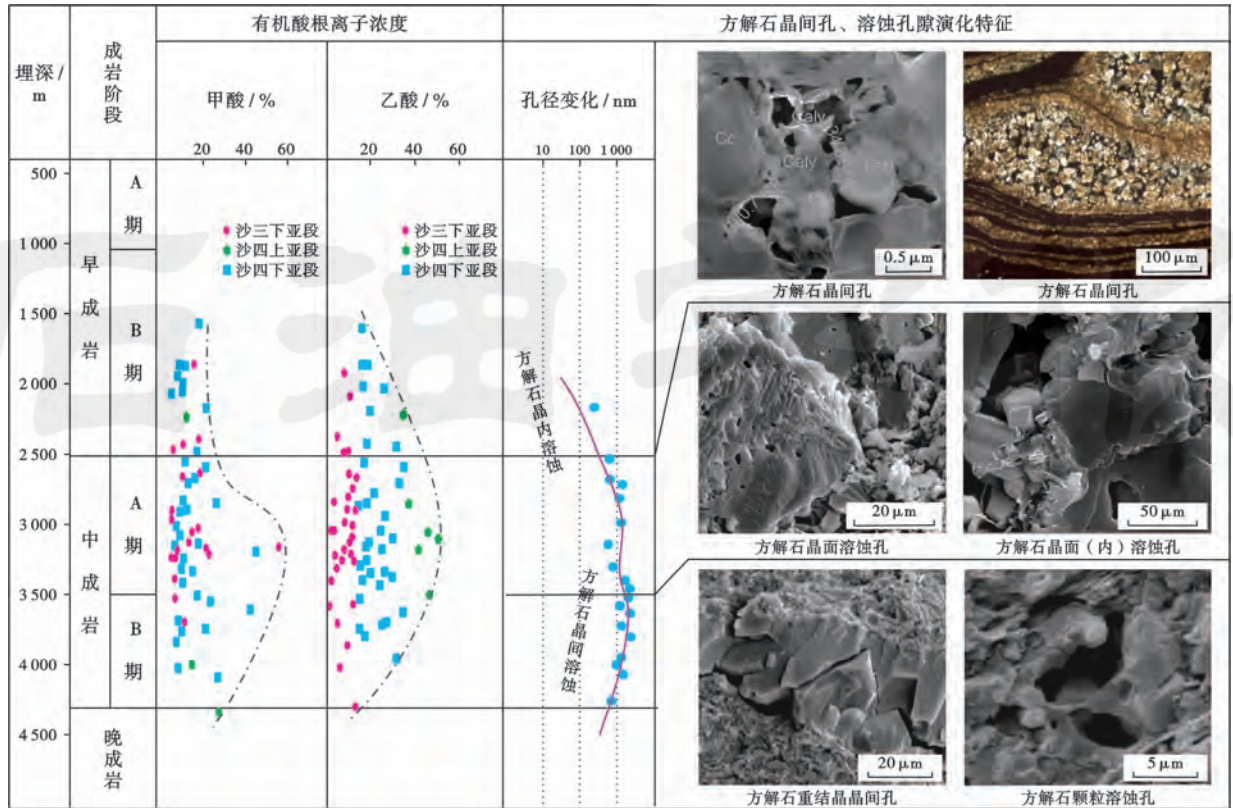


图9 不同成岩阶段方解石晶间孔、溶蚀孔演化特征

Fig. 9 Carbonate intergranular pores and dissolution pores evolution characteristics at different diagenetic stage

部,溶蚀孔呈现晶缘溶蚀孔—纹层界面(晶面)溶蚀孔—晶内溶蚀孔的演化特征;从溶蚀孔形貌上,呈现串珠状晶内溶蚀[图 10(a)]、缝状界面溶蚀[图 10(d)]、阶状晶缘溶蚀[图 10(e)、图 10(f)]的特点。

除了自然演化剖面,封闭体系的成岩热模拟实验也反映了不同温度、压力条件下的溶蚀孔隙的发育演化过程。在 55 MPa、300℃条件下发育碳酸盐矿物晶缘溶蚀孔隙[图 7(d)],孔隙主要发育在微晶方解石颗粒周缘及表面,部分呈微小坑洞状或呈现港湾状形态,多数发育于方解石晶体与富有机质黏土矿物周缘,在方解石晶体内部发育少量晶内溶蚀孔。需要注意的是,由于白云石反应的 Gibbs 自由能增量比相同温度、压力条件下的方解石小,自动向溶解方向进行的趋势比方解石更大,因此,白云石晶体在该温度、压力条件下溶蚀明显。在 82.5 MPa、350℃,晶内溶蚀孔数量增多,局部较密集,一小部分溶蚀孔隙连通、合并成孔径较大的溶蚀孔;继续加温加压,在 110 MPa、400℃时,部分晶内溶蚀孔孔径较大[图 7(e)],碳酸盐矿物晶体边缘显示强烈溶蚀的特征,出现晶内溶蚀孔黏土化,溶蚀残余部分晶形不完整;在 137.5 MPa、450℃时,原本呈孤立状态的坑洞状溶蚀孔逐渐连通[图 7(f)],合并成短线状、不规则状溶蚀孔隙,孔径

较大可达 2.5 μm;当成岩模拟温度达到 500℃、围压达到 165 MPa 时,溶蚀孔隙没有出现继续增多、孔径增大的趋势,仅部分溶蚀孔呈现边缘整齐、规则等特点,总体溶蚀量降低。

综合上述分析发现,有机质生烃演化与溶蚀孔隙发育演化密切相关。早成岩阶段,有机质未成熟,与骨架矿物的接触关系保持了成岩作用最初的形态,由于有机质干酪根开始生成成极少量液态烃,酸性流体开始溶蚀长石等不稳定矿物,然后对(铁)方解石等碳酸盐矿物进行溶蚀。在地下高温、高压条件下,当有机质达到成熟并产生有机酸时,页岩中的碳酸盐矿物尤其是对酸敏感性更强的文石开始发生溶解,并随温度、压力条件增高,其溶解速率增大<sup>[42]</sup>。在 3000~3500 m,方解石溶蚀孔隙的孔径最大,溶隙浅而孔壁较圆滑(图 9)。该深度段对应有机酸离子浓度高值段,尤其是比碳酸溶蚀能力更强的乙酸的生成也进入高峰期,酸离子浓度最大处(3 km)对应溶蚀孔隙孔径大于 1 μm,在该成岩阶段,既有表面反应控制的溶蚀,也有扩散作用控制的溶蚀<sup>[43-45]</sup>。配合生烃高压作用<sup>[46]</sup>(3000~3500 m 的压力系数大于 1.6)导致层理发育的泥页岩中大量水平缝开启,流体环境相对畅通,给碳酸盐纹层界面部分的溶蚀孔隙发育创造了良好条件[图 10(c)、图 10(d)]。

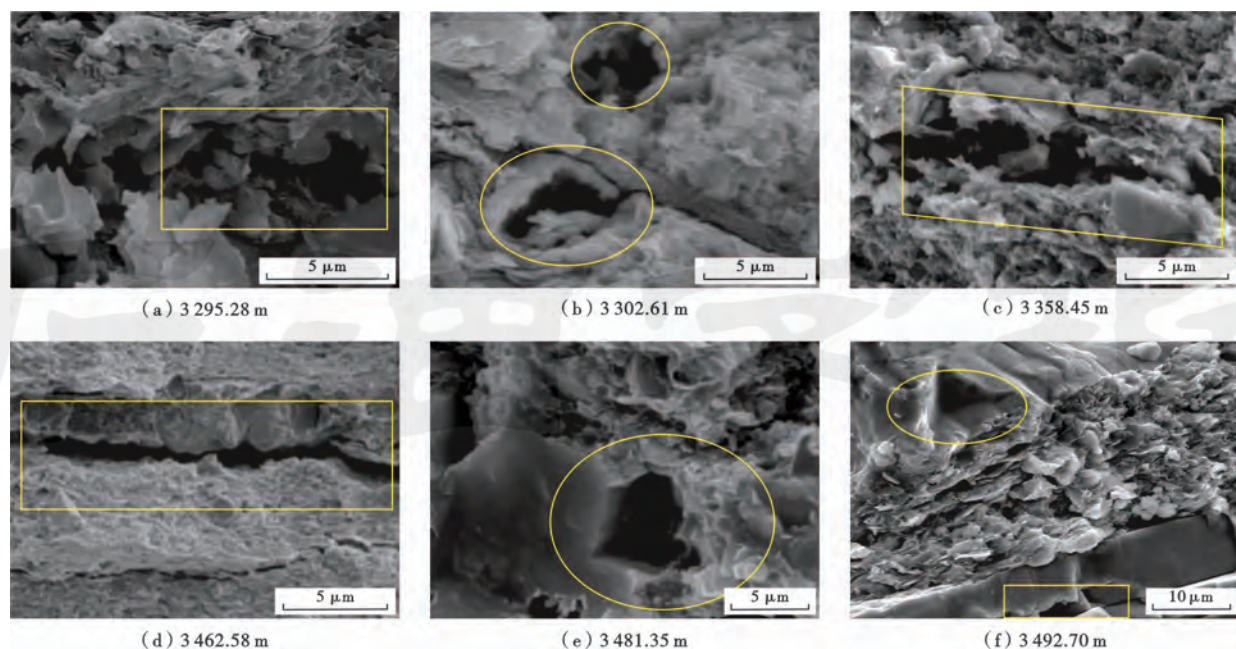


图 10 牛页 1 井不同埋深的泥页岩样品方解石溶蚀孔发育特征

Fig. 10 Carbonate dissolution pores from shale samples of different depths, Well NY1

在 3500 m 以下,饱和烃、芳香烃等易流动组分增多,有机质生烃排酸能力开始减弱,由于成岩体系的相对封闭性,流体交换不明显,未排出的有机酸继续溶蚀方解石晶间部分,一方面使重结晶晶间孔局部发育,另一方面溶蚀未重结晶的泥微晶方解石矿物,造成方解石颗粒完全溶蚀,形成矿物集合体内部颗粒溶蚀孔隙(图 9)。相较于中成岩阶段 A 期,溶蚀能力变弱,溶蚀现象变得不再普遍,但溶蚀孔隙的连通性变好,溶蚀部位图像景深更明显,孔径较大。晶体解理发育的亮晶方解石晶间、晶内的溶蚀缝相互连通呈锯齿状(图 9);层理(间)缝的发育,使裂缝周围一些尺度较小孔隙更容易延伸连接至层理缝上,自然增大了孔隙的连通性<sup>[47-48]</sup>。

## 4 结 论

(1) 东营凹陷沙三下亚段—沙四上亚段页岩中的游离相原油主要分布在微孔隙与裂缝中,从孔径大小对总孔隙度贡献及含油性而言,孔径较大的方解石晶间溶蚀孔隙(30~900 nm)、重结晶晶间孔(100~40 000 nm)、黏土矿物晶间收缩缝(20~1 200 nm)是重要的孔隙类型;孔径大于 30 nm 孔隙占总孔体积比例越高,孔隙度越大;重结晶灰岩、纹层泥质灰岩孔径大于 30 nm 孔隙比例较高。

(2) 矿物类型的多样性和成岩体系的封闭性使东营凹陷页岩成岩及孔隙演化较为复杂。方解石等碳酸盐矿物晶粒形成架构空间,同时伴随生、排烃过程的溶

蚀作用形成碳酸盐矿物内部和边缘溶蚀孔隙,增加了储层孔隙度。

(3) 不同成岩演化阶段,孔隙架构矿物垂向演化造成了现今储层的基本面貌;中成岩阶段是孔隙发育演化的关键时期,对应埋深 2500~3500 m。页岩油储层储集空间的形成几乎都与黏土矿物的成岩演化有关,对于以生油为主的陆相中、低成熟度页岩,方解石等脆性、易溶矿物的成岩演化以及有机质生、烃排酸对储层发育演化起重要作用,配合超高压作用,使得在埋深大于 3500 m 时页岩储层物性改善。

**致谢** 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院张守鹏专家、郝雪峰专家、李政专家、谢忠怀专家以及中国地质大学(武汉)陆永潮教授、南京大学姚素平教授给予本文许多指导和宝贵意见,在此深表感谢!

**符号注释:**  $R$ —镜质体反射率;  $S_1$ —游离烃含量, mg/g;  $S_2$ —热解烃含量, mg/g;  $T_{\max}$ —最高热解峰温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_2$ —核磁共振弛豫时间, ms。

## 参 考 文 献

- [1] 姜在兴,张文昭,梁超,等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 184-196.  
JIANG Zaixing, ZHANG Wenzhao, LIANG Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184-196.
- [2] 姜在兴,梁超,吴靖,等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J].



- 石油学报,2013,34(6):1031-1039.
- JANG Zaixing,LIANG Chao,WU Jing,et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(6):1031-1039.
- [3] 柳波,吕延防,孟元林,等. 湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义——以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦苇沟组为例[J]. 石油勘探与开发,2015,42(5):598-607.
- LIU Bo,LÜ Yanfang,MENG Yuanlin,et al. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration:a case study of Permian Lucaogou Formation in Malang sag, Santanghu Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development,2015,42(5):598-607.
- [4] APLIN A C,MACQUAKER J H S. Mudstone diversity:origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. AAPG Bulletin,2011,95(12):2031-2059.
- [5] LIANG Chao,JIANG Zaixing,CAO Yingchang,et al. Deep-water depositional mechanisms and significance for unconventional hydrocarbon exploration:a case study from the lower silurian Longmaxi shale in the southeastern Sichuan Basin[J]. AAPG Bulletin,2016,100(5):773-794.
- [6] YANG Renchao,FAN Aiping,HAN Zuozhen,et al. Lithofacies and origin of the Late Triassic muddy gravity-flow deposits in the Ordos Basin,central China[J]. Marine and Petroleum Geology,2017,85:194-219.
- [7] 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.
- [8] LIANG Chao,CAO Yingchang,JIANG Zaixing,et al. Shale oil potential of lacustrine black shale in the Eocene Dongying depression:implications for geochemistry and reservoir characteristics[J]. AAPG Bulletin,2017,101(11):1835-1858.
- [9] 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):249-256.
- 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):249-256.
- [10] 张林晔,李政,李钜源,等. 东营凹陷古近系泥页岩中存在可供开采的油气资源[J]. 天然气地球科学,2012,23(1):1-13.
- ZHANG Linye,LI Zheng,LI Juyuan,et al. Feasibility analysis of existing recoverable oil and gas resource in the Palaeogene shale of Dongying depression[J]. Natural Gas Geoscience,2012,23(1):1-13.
- [11] 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.
- [12] 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):83-91.
- 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.
- [13] 张顺,陈世悦,谭明友,等. 东营凹陷西部沙河街组三段下亚段泥页岩沉积微相[J]. 石油学报,2014,35(4):633-645.
- ZHANG Shun,CHEN Shiyue,TAN Mingyou,et al. Characterization of sedimentary microfacies of shale in the lower third sub-member of Shahejie Formation, western Dongying sag[J]. Acta Petrolei Sinica,2014,35(4):633-645.
- [14] 张顺,陈世悦,蒲秀刚,等. 断陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及储层特征——以东营凹陷沙河街组和沧东凹陷孔店组为例[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(3):568-581.
- ZHANG Shun,CHEN Shiyue,PU Xiugang,et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of fine-grained sedimentary rocks in Paleogene,southern Bohai fault-depressed lacustrine basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2016,45(3):568-581.
- [15] 刘庆,张林晔,沈忠民,等. 东营凹陷富有机质烃源岩顺层微裂隙的发育与油气运移[J]. 地质论评,2004,50(6):593-597.
- LIU Qing,ZHANG Linye,SHEN Zhongmin,et al. Microfracture occurrence and its significance to the hydrocarbons expulsion in source rocks with high organic matter abundance,Dongying depression[J]. Geological Review,2004,50(6):593-597.
- [16] 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.
- [17] 陈世悦,张顺,王永诗,等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征[J]. 石油勘探与开发,2016,43(2):198-208.
- CHEN Shiyue,ZHANG Shun,WANG Yongshi,et al. Lithofacies types and reservoirs of Paleogene fine-grained sedimentary rocks in Dongying sag,Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2016,43(2):198-208.
- [18] 张林晔,李钜源,李政,等. 湖相页岩有机储集空间发育特点与成因机制[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2015,40(11):1824-1833.
- ZHANG Linye,LI Juyuan,LI Zheng,et al. Development characteristics and formation mechanism of intra-organic reservoir space in lacustrine shales[J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences,2015,40(11):1824-1833.
- [19] 崔景伟,朱如凯,崔京钢. 页岩孔隙演化及其与残留烃量的关系:来自地质过程约束下模拟实验的证据[J]. 地质学报,2013,87(5):730-736.
- CUI Jingwei,ZHU Rukai,CUI Jinggang. Relationship of porous evolution and residual hydrocarbon:evidence from modeling experiment with geological constrains[J]. Acta Geologica Sinica,2013,87(5):730-736.
- [20] 胡海燕. 富有机质 Woodford 页岩孔隙演化的热模拟实验[J]. 石

- 油学报,2013,34(5):820-825.
- HU Haiyan. Porosity evolution of the organic-rich shale with thermal maturity increasing[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(5): 820-825.
- [21] 吴松涛,朱如凯,崔京钢,等.鄂尔多斯盆地长7湖相泥页岩孔隙演化特征[J]. *石油勘探与开发*,2015,42(2):167-176.
- WU Songtao,ZHU Rukai,CUI Jinggang, et al. Characteristics of lacustrine shale porosity evolution, triassic Chang 7 Member, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(2): 167-176.
- [22] 董春梅,马存飞,梁国强,等.泥页岩热模拟实验及成岩演化模式[J]. *沉积学报*,2015,33(5):1053-1061.
- DONG Chunmei, MA Cunfei, LUAN Guoqiang, et al. Pyrolysis simulation experiment and diagenesis evolution pattern of shale[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(5): 1053-1061.
- [23] 吉利明,吴远东,贺聪,等.富有机质泥页岩高压生烃模拟与孔隙演化特征[J]. *石油学报*,2016,37(2):172-181.
- JI Liming, WU Yuandong, HE Cong, et al. High-pressure hydrocarbon-generation simulation and pore evolution characteristics of organic-rich mudstone and shale[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(2): 172-181.
- [24] 张顺,刘惠民,宋国奇,等.东营凹陷页岩油储集空间成因及控制因素[J]. *石油学报*,2016,37(12):1495-1507.
- ZHANG Shun, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Genesis and control factors of shale oil reserving space in Dongying sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(12): 1495-1507.
- [25] 陈中红,查明,金强.东营凹陷古近系中深层湖盆演化中的无机元素响应[J]. *沉积学报*,2008,26(6):925-932.
- CHEN Zhonghong, ZHA Ming, JIN Qiang. Mineral elemental response to the evolution of Terrestrial Brine Faulted-basin: a case study in the Paleogene of Well Haoke-1, Dongying sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(6): 925-932.
- [26] 丁媛娇,郭保华,燕兴荣,等.页岩储层有效性识别及物性参数定量评价方法[J]. *测井技术*,2014,38(3):297-303.
- DING Yujiao, GUO Baohua, YAN Xingrong, et al. On identification shale reservoirs validity and physical parameters quantitative evaluation method[J]. *Well Logging Technology*, 2014, 38(3): 297-303.
- [27] 蔡进功,李颖莉,曾翔,等.泥质沉积物(岩)有机-无机相互作用及其意义[C]//中国矿物岩石地球化学学会第15届学术年会论文摘要集(4).上海:同济大学海洋地质国家重点实验室,2015.
- CAI Jingong, LI Yingli, ZENG Xiang, et al. Organic inorganic interaction and its significance in argillaceous sediments [C] // Proceedings of 15th Annual Conference of Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Shanghai: State Key Laboratory for Marine Geology, Tongji University, 2015.
- [28] 赵明,季峻峰,陈小明,等.山东东营凹陷黏土矿物的演化与成岩作用[C]//中国矿物岩石地球化学学会第14届学术年会论文摘要辑.南京:南京大学地球科学与工程学院,2013.
- ZHAO Ming, JI Junfeng, CHEN Xiaoming, et al. Evolution and diagenesis of clay minerals in Dongying sag, Shandong [C] // Proceedings of 14th Annual Conference of Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Nanjing: College of Geoscience and Engineering, Nanjing University, 2013.
- [29] 刘立安.东营凹陷古近系沙四上粘土矿物的分布特征及其意义[J]. *资源与产业*,2011,13(增刊1):176-180.
- LIU Li'an. Distribution and significance of clay minerals in the upper Member 4 of the Paleogene Shahejie Formation, Dongying depression[J]. *Resources & Industries*, 2011, 13(S1): 176-180.
- [30] LIU Huimin, ZHANG Shun, SONG Guoqi, et al. A discussion on the origin of shale reservoir inter-laminar fractures in the Shahejie Formation of Paleogene, Dongying depression[J]. *Journal of Earth Science*, 2017, 28(6): 1064-1077.
- [31] 隋风贵,刘庆,张林晔.济阳断陷盆地烃源岩成岩演化及其排烃意义[J]. *石油学报*,2007,28(6):12-16.
- SUI Fenggui, LIU Qing, ZHANG Linye. Diagenetic evolution of source rocks and its significance to hydrocarbon expulsion in Shahejie Formation of Jiyang depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(6): 12-16.
- [32] 王冠民.济阳拗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.
- [33] 周书欣,张秀莲.论碳酸盐岩的成岩环境与孔隙演化[J]. *石油与天然气地质*,1993,14(3):215-222.
- ZHOU Shuxin, ZHANG Xiulian. Diagenetic environment and pore evolution of carbonate rocks[J]. *Oil & Gas Geology*, 1993, 14(3): 215-222.
- [34] 郭秋麟,陈晓明,宋焕琪,等.泥页岩埋藏过程孔隙度演化与预测模型探讨[J]. *天然气地球科学*,2013,24(3):439-449.
- GUO Qiulin, CHEN Xiaoming, SONG Huanqi, et al. Evolution and models of shale porosity during burial process[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 439-449.
- [35] 李钜源.渤海湾盆地东营凹陷古近系泥页岩孔隙特征及孔隙度演化规律[J]. *石油实验地质*,2015,37(5):566-574.
- LI Juyuan. Pore characteristics and their evolution in Paleogene mud shales, Dongying sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(5): 566-574.
- [36] 曹茜,周文,陈文玲,等.鄂尔多斯盆地南部延长组长7段陆相页岩气地层孔隙类型、尺度及成因分析[J]. *矿物岩石*,2015,35(2):90-97.
- CAO Qian, ZHOU Wen, CHEN Wenling, et al. Analysis of pore types, sizes and genesis in continental shale gas reservoir of Chang 7 of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2015, 35(2): 90-97.
- [37] 周瑶琪,周振柱,陈勇,等.东营凹陷民丰地区深部储层成岩环境变化研究[J]. *地学前缘*,2011,18(2):268-276.
- ZHOU Yaoqi, ZHOU Zhenzhu, CHEN Yong, et al. Research on diagenetic environmental changes of deep reservoir in Minfeng area, Dongying sag[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(2): 268-276.



- [38] 薛莲花,杨巍,仲佳爱,等. 富有机质页岩生烃阶段孔隙演化——来自鄂尔多斯延长组地质条件约束下的热模拟实验证据[J]. 地质学报, 2015, 89(5): 970-978.  
XUE Lianhua, YANG Wei, ZHONG Jiaai, et al. Porous evolution of the organic-rich shale from simulated experiment with geological constrains, samples from Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(5): 970-978.
- [39] 张顺,王永诗,刘惠民,等. 渤海湾盆地东营凹陷细粒沉积微相对页岩油储层微观结构的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 923-934.  
ZHANG Shun, WANG Yongshi, LIU Huimin, et al. Controlling effect of fine-grained sedimentary microfacies upon the micro-structure of shale oil reservoirs in the Dongying sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 923-934.
- [40] 王秀平,牟传龙,王启宇,等. 川南及邻区龙马溪组黑色岩系成岩作用[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1035-1047.  
WANG Xiuping, MOU Chuanlong, WANG Qiyu, et al. Diagenesis of black shale in Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin and its periphery[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2015, 36(9): 1035-1047.
- [41] ZHANG Jiangguo, JIANG Zaixing, JIANG Xiaolong, et al. Oil generation induces sparry calcite formation in lacustrine mudrock, Eocene of east China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 71: 344-359.
- [42] 王冠民,熊周海,张婕,等. 济阳拗陷古近系页岩文石含量与烃源岩热演化的对应关系[J]. 石油学报, 2017, 38(8): 855-862.  
WANG Guanmin, XIONG Zhouhai, ZHANG Jie, et al. The correspondence between the aragonite content of Palaeogene shale and the thermal evolution of source rocks in Jiyang depression [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2017, 38(8): 855-862.
- [43] 余敏,寿建峰,沈安江,等. 碳酸盐岩溶蚀规律与孔隙演化实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 564-572.  
SHE Min, SHOU Jianfeng, SHEN Anjiang, et al. Experimental simulation of dissolution law and porosity evolution of carbonate rock[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 564-572.
- [44] 余敏,寿建峰,沈安江,等. 从表生到深埋藏环境下有机酸对碳酸盐岩溶蚀的实验模拟[J]. 地球化学, 2014, 43(3): 276-286.  
SHE Min, SHOU Jianfeng, SHEN Anjiang, et al. Experimental simulation of dissolution for carbonate rocks in organic acid under the conditions from epigenesis to deep burial environments [J]. *Geochimica*, 2014, 43(3): 276-286.
- [45] BERNER R A. Rate control of mineral dissolution under earth surface conditions[J]. *American Journal of Science*, 1978, 278(9): 1235-1252.
- [46] 赵国欣. 烃源岩层中异常高压研究——以渤海湾盆地东营凹陷古近系为例[J]. 石油实验地质, 2008, 30(4): 340-344.  
ZHAO Guoxin. Study of the abnormal high-pressure in hydrocarbon source rocks-taking paleogene in the Dongying sag, the Bohai Bay Basin as an example[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(4): 340-344.
- [47] 宁传祥,姜振学,高之业,等. 用核磁共振和高压压汞定量评价储层孔隙连通性——以沾化凹陷沙三下亚段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 578-585.  
NING Chuanxiang, JIANG Zhenxue, GAO Zhiye, et al. Quantitative evaluation of pore connectivity with nuclear magnetic resonance and high pressure mercury injection: a case study of the lower section of Es<sub>3</sub> in Zhanhua sag[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(3): 578-585.
- [48] 张顺. 东营凹陷页岩储层成岩作用及增孔、减孔机制[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 546-562.  
ZHANG Shun. Diagenesis and the mechanism of shale reservoir pore increase and reduction in Dongying sag[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(3): 546-562.

(收稿日期 2017-10-27 改回日期 2018-03-30 编辑 王培玺)

版权所有