

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2017.04.001

# 济阳坳陷页岩油勘探实践与认识

孙焕泉

(中国石化油田勘探开发事业部)

**摘要:** 北美在海相页岩油的勘探开发中已获得巨大成功,显示页岩油工业化勘探开发的价值。在中国东部陆相断陷盆地典型代表济阳坳陷页岩油勘探实践中,利用烃源岩综合评价技术揭示了咸化湖泊泥页岩具有生烃早、生烃转化率高的成烃机制,利用泥页岩微观孔隙结构表征技术明确了纹层状岩相具有孔隙度高、孔径大和连通性好的储集性能,利用游离油定量评价技术建立了济阳坳陷不同沉积环境泥页岩有利岩相中游离油差异富集模式。与北美页岩油对比研究认为,济阳坳陷有利岩相发育是页岩油富集的基础,适宜演化程度是页岩油富集的条件,充足游离组分是页岩油富集的关键,良好可压性能是实现有效开发的保证。在此基础上,建立了适合于中国东部陆相断陷盆地咸化湖泊沉积页岩油选区评价标准。

**关键词:** 济阳坳陷;页岩油;咸化湖泊;游离油;纹层状岩相

**中图分类号:** TE122.9

**文献标识码:** A

## Exploration practice and cognitions of shale oil in Jiyang depression

Sun Huanquan

(SINOPEC Oilfield Exploration and Development Division)

**Abstract:** Great success has been achieved for the exploration and development of marine shale oil in North America, revealing the significant value of industrial shale oil exploration and development. When shale oil exploration is practically carried out in the Jiyang depression which is the typical representative of continental faulted basin in eastern China, a series of technologies are adopted. It is revealed by the comprehensive source rock evaluation technology that the hydrocarbon generation in mud shale of saline lake is characterized by early hydrocarbon generation and high hydrocarbon-generating transformation ratio. It is confirmed by the mud shale micropore structure characterization technology that laminated lithofacies has the reservoir properties of high porosity, large pore diameter and good connectivity. And by virtue of the quantitative free oil evaluating technology, the differential enrichment mode of free oil in favorable lithofacies of mud shale in different sedimentary environments in the Jiyang depression is established. The shale oil in the Jiyang depression is compared with that in North America. It is indicated that in the Jiyang depression, the development of favorable lithofacies is the base of shale oil enrichment, appropriate evolution degree is the condition of shale oil enrichment, sufficient free composition is the key to shale oil enrichment, and good crushability is the guarantee of effective development. And finally, the shale oil zone selection and evaluation criterion suitable for the saline lake deposit within continental faulted depression in eastern China is prepared.

**Key words:** Jiyang depression, shale oil, saline lake, free oil, laminated lithofacies

页岩油在北美地区的突破,引起了众多勘探家越来越多的关注<sup>[1-3]</sup>,2010年以来,美国依靠水平井+多分段压裂技术促进了页岩油产量迅速增长,2016年产量已达 $2.12 \times 10^8$ t,占原油总产量的52.6%,显示页岩油具有巨大的勘探开发前景。中国东部陆相断

陷盆地常规油气经过数十年的勘探开发已进入中后期,急需寻找新的资源接替,页岩油就是现实的接替领域。以往常规勘探过程中,在陆相泥页岩发育段常常发现油气显示甚至获得工业油气流<sup>[4-13]</sup>,呈现出其中赋藏着丰富的油气资源。近年来,中国学者已在

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目“中国东部古近系陆相页岩油富集机理与分布规律”(2014CB239105);山东省地质勘查项目“山东省页岩气成矿条件研究和资源潜力预测”[鲁勘字(2013)1号];中国石化科技攻关课题“东营凹陷不同类型泥页岩烃类特征研究”(P15117)。

第一作者简介:孙焕泉(1965-),男,山东诸城人,博士,2002年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所,教授级高级工程师,从事油气田勘探开发与研究工作。地址:北京市朝阳区门北大街22号中国石化油田勘探开发事业部,邮政编码:100728。E-mail:sunhquan@sinopec.com

收稿日期:2017-06-25;修改日期:2017-07-05

国东部陆相盆地页岩油勘探、评价方法、资源预测等方面开展了一些探索性的研究工作<sup>[14-22]</sup>,但总体处于起步阶段,对页岩油形成与富集的基本条件以及有效开采的认识还不够清晰。本文选择在中国东部陆相断陷盆地中具有典型意义的济阳坳陷泥页岩开展研究,分析页岩油生成条件、储集条件和泥页岩含油性,并与国外具有商业性开采页岩油的页岩对比,剖析页岩油富集可采的影响因素,以期为中国东部陆相页岩油勘探开发的突破提供借鉴。

## 1 页岩油勘探现状

### 1.1 区域地质概况

济阳坳陷位于渤海湾盆地东南部,受多期构造作用,形成车镇、沾化、惠民及东营 4 个南缓北陡的非对称凹陷,各凹陷之间被青城、滨县、陈家庄、义和庄、孤岛等凸起分割,构成了凸凹相间排列的格局(图 1),勘探面积为 25510km<sup>2</sup>。

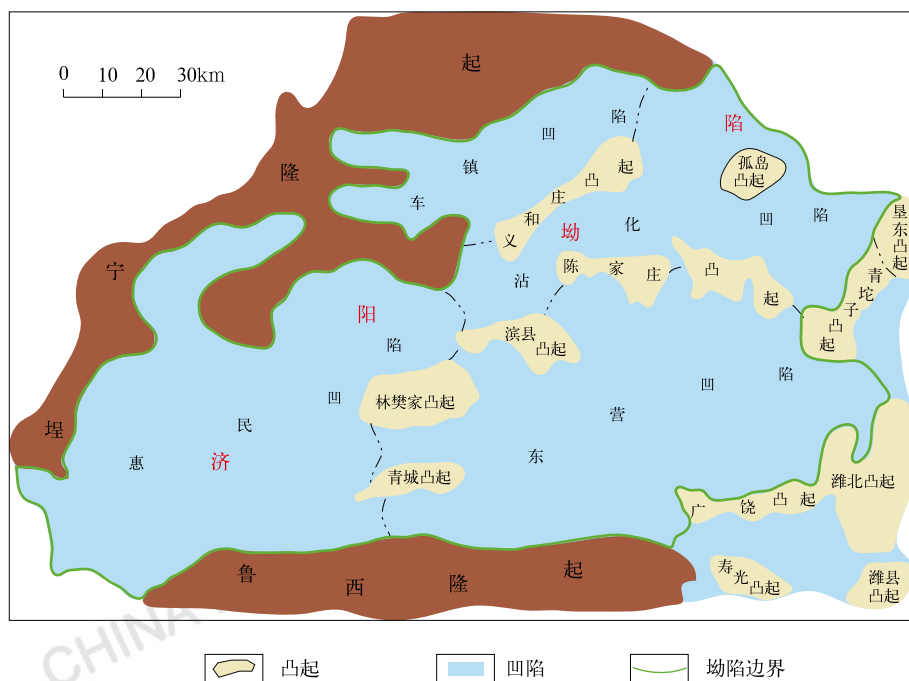


图 1 济阳坳陷区域构造位置图

### 1.2 页岩油勘探历程

#### 1.2.1 偶遇阶段 (1969—2006 年)

该阶段以常规油气勘探为目的,但在钻探过程中发现多口井在泥页岩发育段见油气显示,其中 25 口井获得工业油流,平均日产油 29.9t,日产气 1066.5m<sup>3</sup>,东营凹陷河 54 井产能最高,在沙三下亚段 2962~2964.4m 井段中途测试,日产油 91.4t,日产气 2740m<sup>3</sup>,展示了济阳坳陷具有页岩油气形成的条件。

#### 1.2.2 关注阶段 (2007—2010 年)

该阶段加强了对探井钻探过程中有良好油气显示的泥页岩发育井段的试油测试,在东营凹陷和沾化凹陷共获得工业油气流井 4 口,平均日产油 49.8t,日产气 18012.4m<sup>3</sup>。东营凹陷新利深 1 井产能最高,在沙四上亚段 4271.21~4374m 井段中途测试,日产油

99t,日产气 25448m<sup>3</sup>,表明济阳坳陷深层具备页岩油气勘探的极大潜力。

#### 1.2.3 攻关阶段 (2011 年至今)

该阶段针对页岩油部署钻探探井 14 口,其中取心井 4 口(罗 69 井、牛页 1 井、樊页 1 井、利页 1 井),兼探井 5 口(义 182 井、义 186 井、义 187 井、梁 758 井、牛 52 井),水平井 3 口(渤页平 1 井、渤页平 2 井、梁页 1HF 井),老井重新压裂 1 口(义 283 井)。5 口兼探页岩油井均获工业油气流,义 187 井沙三下亚段 3440.42~3504.47m 页岩发育井段中途测试,日产油 156t,日产气 13400m<sup>3</sup>,投产后累计产油 5515t;义 283 井对沙三下亚段 3671.0~3730.5m 页岩发育井段进行老井重新压裂,获最高日产油 22.79t。3 口水平井虽然产油,但均未达到工业油流标准;4 口系统取心井共计取心 1010.26m,为济阳坳陷页岩油气的深入研究奠定了坚实的基础。

### 1.3 页岩油勘探效果

济阳拗陷在页岩中发现油气始于20世纪60年代,截至2016年底,已在800多口探井泥页岩发育段见油气显示,37口探井获工业油气流,4个凹陷均有发现。平面上以沾化凹陷、东营凹陷最多,其次为车镇凹陷,惠民凹陷最少;纵向上主要以沙三下亚段、沙四上亚段为主,其次在沾化凹陷的沙一段也获得了工业性页岩油气。页岩油气产出以油为主,初期产能为12~72t/d,东营凹陷河54井累计产量最高达27896t,沾化凹陷罗42井、新义深9井累计产量均在10000t以上,展示了良好的勘探前景。济阳拗陷页岩油勘探中的兼探井在页岩发育段见高产油气流,而水平井虽然采用与国外同步的钻完井技术、钻井液、压裂措施,但效果并不理想,表明页岩油有效开发依然存在问题,亟待解决,页岩油作为新兴的石油资源,需要长期艰苦的攻关。

## 2 页岩油实践研究

中国石化胜利油田分公司于2007年开始关注页岩油气领域,2009年正式立项研究,2013年中国石化石油勘探开发研究院与胜利油田分公司携手共建

立中国石油化工页岩油气勘探开发重点实验室和国家能源局页岩油研发中心两个实验平台,开展了页岩油联合研究国际合作。在此基础上,结合济阳拗陷页岩油勘探实践,针对陆相页岩油生成、页岩油储集、页岩油富集方面开展了系统研究。

### 2.1 揭示了咸化湖泊泥页岩优越的成烃机制

有机质是页岩油生成的物质基础,其成烃演化决定了页岩的含油丰度。在沉积水介质类型划分基础上,利用基于不同沉积环境的泥页岩开展宏观和微观、有机和无机特征研究的泥页岩综合评价技术,对陆相断陷湖盆连续沉积的不同水介质类型的沙四上亚段、沙三下亚段、沙三中亚段3套区域性主体处于成熟演化阶段泥页岩的母质来源、有机质组成、生烃性等特征进行剖析,明确不同沉积环境下泥页岩的成烃差异。

#### 2.1.1 不同水介质类型沉积有机质赋存方式差异

济阳拗陷沙四上亚段泥页岩为咸水—半咸水湖相沉积,厚度约为40~120m。镜下观察可见到小古囊藻、渤海藻、颗石藻、葡萄藻以及大量被降解后的藻类遗体,这些浮游藻类组成的有机质往往顺层分布,形成大量有机质富集层<sup>[23]</sup>(图2)。沙三下亚段泥页岩分布广,全区发育,为半咸水—微咸水湖相沉积,厚度

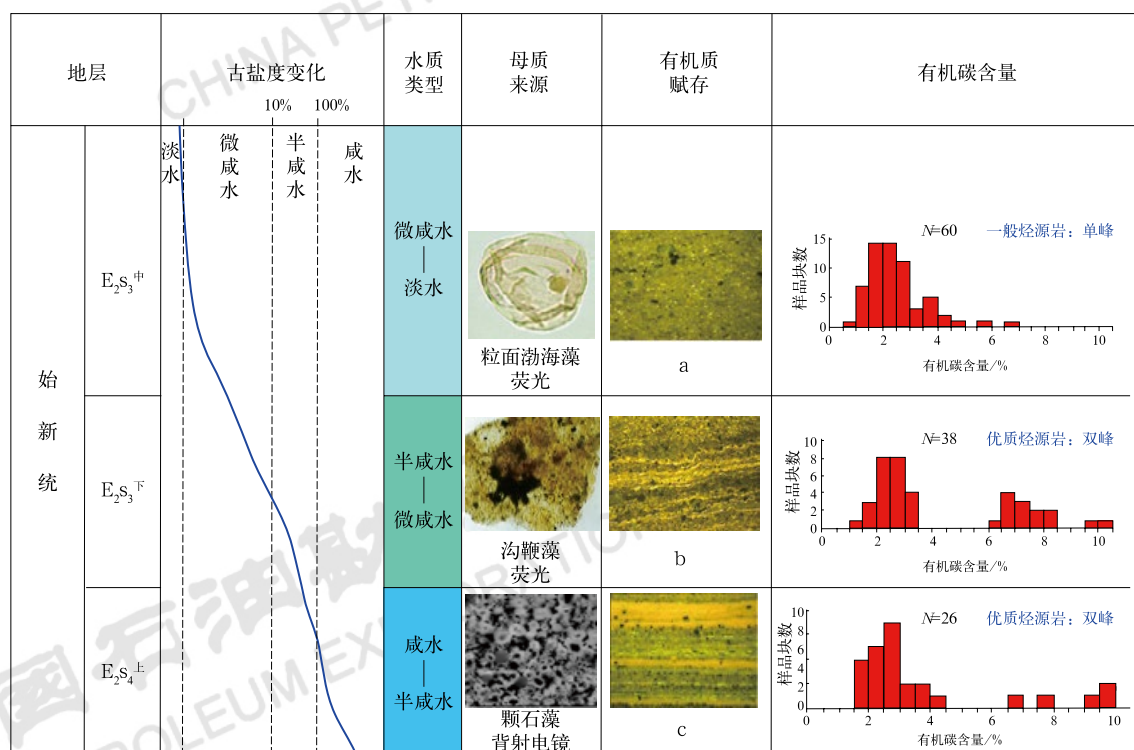


图2 济阳拗陷东营凹陷不同水介质类型泥页岩有机质赋存及有机碳含量对比图

a—荧光下分散有机质清晰可见;薄片,荧光,×200,史125井;b—有机质纹层,由层状藻组成,藻体较为破碎;薄片,荧光,×200,河130井;  
c—碳酸盐纹层(浅色小薄层)和泥质纹层(暗色纹层);薄片,荧光,×200,纯372井,2607.3m

为150~200m。镜下观察浮游生物极为发育,沟鞭藻类、疑源类、介形类及鱼等生物遗体往往顺层分布,形成夹在泥质纹层中间的有机质富集层(图2)。沙三中亚段泥岩全区分布,属微咸水—淡水三角洲相沉积,厚度为200~400m。镜下观察局部发育水平层理,有机质的赋存状态以分散为主,有机质富集层不发育,镜下既能见到低等水生生物来源的盘星藻、沟鞭藻等藻类,也能见到一定数量来源于高等植物的组分(图2)。相比较而言,咸化沉积有机质沿纹层集中富集,淡水沉积有机质分散分布。

### 2.1.2 不同水介质类型沉积有机碳含量差异

不同沉积环境有机质赋存方式决定了有机碳含量具有差异性。从济阳拗陷东营凹陷3套泥页岩的有机碳含量频率分布来看(图2),半咸水—微咸水沉积的沙三下亚段和咸水—半咸水沉积的沙四上亚段泥页岩有机碳含量分布范围宽,含量高,频率多呈现双峰型分布,为优质烃源岩的特点。沙四上亚段泥页岩有机碳含量第一频率主峰为2%~3%,分布范围为1.5%~4.5%,第二频率分布范围为6.5%~10%;沙三下亚段泥页岩有机碳含量第一频率主峰为2%~3%,分布范围为1%~3.5%,第二频率分布范围为6%~10.5%。而微咸水—淡水沉积的沙三中亚段泥页岩有机碳含量频率主峰只有一个,为1.5%~3%,频率分布范围为1%~5%,表现为一般烃源岩。咸化沉积有机质富集层的存在与否是区分济阳拗陷优质烃源岩与一般烃源岩的重要标志之一。

### 2.1.3 不同水介质类型有机质成烃演化差异

从沙三下亚段泥页岩氯仿沥青“A”/TOC随埋深变化剖面来看(图3),埋深2200~3000m,氯仿沥青“A”/TOC开始缓慢增加,但增速较小,一般小于0.1;埋深大于3000m,氯仿沥青“A”/TOC迅速增加,至3200m左右达到峰值,可达到0.35~0.4,这些特征表明烃源岩已经成熟并进入生烃高峰。沙三中亚段在埋深小于3000m时与沙三下亚段具有同样的变化趋势,但其绝对值和变化速率明显小于后者,至埋深3000m,氯仿沥青“A”/TOC值一般仍不足0.2;埋深3000~3500m,仍保持逐渐增加的趋势,3500m以后(根据地震分析,已接近烃源岩的最大埋深)氯仿沥青“A”/TOC仅略高于0.2。在沙四段上亚段泥页岩氯仿沥青“A”/TOC与深度关系图上,埋深2500~2600m左右,氯仿沥青“A”/TOC值有近半数已超过0.2,并接近峰值,表明在埋深2500~2600m时已接近或达到生烃高峰,比沙三下亚段、沙三中亚段浅200~400m。

总体看来,咸水—半咸水环境的沙四上亚段泥页岩,其沉积环境有利于有机质保存,有机质丰度高,顺层富集,且由于可溶有机质大分子烃和含硫干酪根的早期降解,在埋藏较浅的低成熟阶段泥页岩中石油烃浓度急剧增加;半咸水—微咸水环境的沙三下亚段泥页岩沉积,尽管也有富集有机质的存在,但由于水体盐度相对较低、还原环境相对较差,使沉积于烃源岩中的可溶有机质大分子烃难以大量保存,含硫干酪

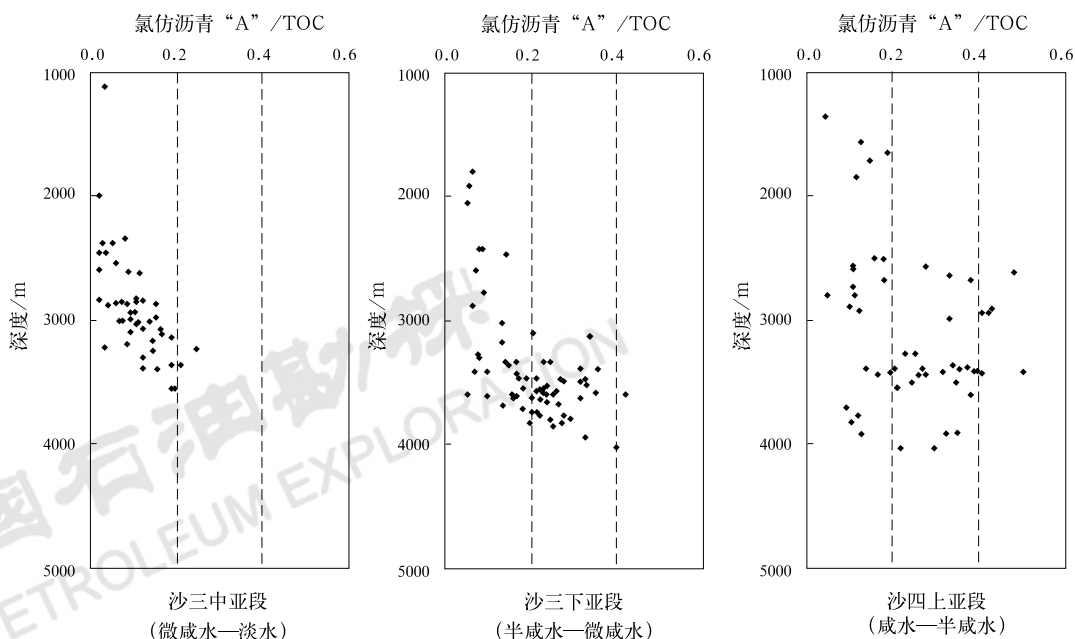


图3 济阳拗陷东营凹陷不同沉积环境泥页岩氯仿沥青“A”/TOC随埋深变化图

根也难以形成,在低成熟阶段不能够形成低熟油;微咸水—淡水环境的沙三中亚段泥岩,有机质丰度相对较低,呈分散状分布,在相同埋深下生烃转化率低于咸水—半咸水沉积环境的沙四上亚段泥页岩。

由此看来,咸化沉积泥页岩生烃早、生烃转化率高,热演化成烃区间范围和生烃量优于淡水沉积泥页岩。济阳拗陷页岩油主要发现于咸水—半咸水沉积的沙四上亚段和半咸水—微咸水沉积的沙三下亚段,是主要研究目标层系。

## 2.2 明确了纹层状岩相具有较好储集性能

泥页岩储层作为一种非常规油气储集体,其孔隙体系的研究越来越受到重视。与海相沉积相比,陆相泥页岩沉积环境的多样性,造成泥页岩类型丰富,不同类型泥页岩的孔隙结构具有较大差异,岩石架构是储集空间发育的物质基础,岩相是连接微观研究与宏观预测的桥梁。因此,有必要对不同类型泥页岩岩相进行详细划分,明确不同类型泥页岩孔隙特征。

### 2.2.1 陆相泥页岩岩相划分

针对陆相泥页岩非均质性较强特征,基于大量

岩心资料研究,遵循经典岩石学研究领域分类命名,提出了“沉积构造—岩石组分—有机质丰度”泥页岩岩相划分方案<sup>[24]</sup>,在纹层状泥质灰岩和灰质泥岩、层状泥质灰岩和灰质泥岩、块状泥质灰岩和灰质泥岩的基础上,派生出辅以有机碳含量的更具代表性的岩相划分方案,丰富了泥页岩岩相的研究。其中岩石层理发育程度反映岩石沉积水体动力情况及沉积速度快慢;矿物组成是陆源输入沉积作用及(生物)化学沉积作用共同作用的结果;有机质丰度能够反映气候条件及水体营养度。

根据该岩相划分方案,对济阳拗陷4口取心井沙三下亚段和沙四上亚段泥页岩样品进行系统岩相划分,可分为纹层状、层状和块状三大岩相类型,其中纹层状岩相主要为富有机质纹层状泥质灰岩相、富有机质纹层状灰质泥岩相两种类型;层状岩相主要为富有机质层状泥质灰岩相、富有机质层状灰质泥岩相,此外含有机质层状泥质灰岩相、含有机质层状灰质泥岩相也有一定数量的样品;块状岩相主要为含有机质块状灰质泥岩相(图4)。


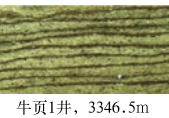

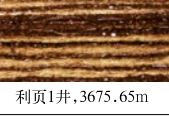
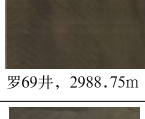
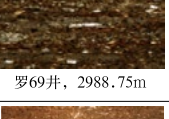
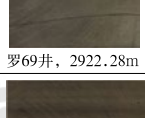
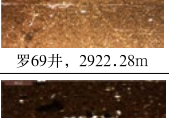
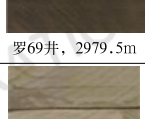
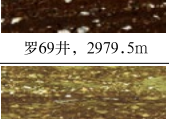
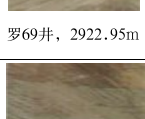
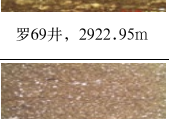
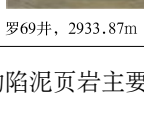
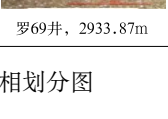
岩石构造	有机碳含量	岩石组成	岩心特征	微观特征	特征描述
纹层状	富有机质	泥质灰岩	 牛页1井, 3346.5m	 牛页1井, 3346.5m	富含有机质泥质纹层与灰质纹层互层,方解石显微晶结构,岩心表现为明暗相间的纹层状构造,碳酸盐含量高于黏土矿物含量
		灰质泥岩	 利页1井, 3675.65m	 利页1井, 3675.65m	富含有机质泥质纹层与灰质纹层互层,方解石为隐晶结构,岩心表现为明暗相间的纹层状构造,黏土矿物含量高于碳酸盐含量
层状	富有机质	泥质灰岩	 罗69井, 2988.75m	 罗69井, 2988.75m	泥质与隐晶方解石互层,方解石呈透镜状、条带状、不连续层状分布显层,碳酸盐含量高于黏土矿物含量
	含有机质		 罗69井, 2922.28m	 罗69井, 2922.28m	成分以碳酸盐矿物与泥质为主,层状构造,碳酸盐含量高于黏土矿物含量
	富有机质	灰质泥岩	 罗69井, 2979.5m	 罗69井, 2979.5m	泥质与隐晶方解石相混,介形虫碎片、炭屑及碎屑等顺层排列显层,黏土矿物含量高于碳酸盐含量
	含有机质		 罗69井, 2922.95m	 罗69井, 2922.95m	成分以泥质与碳酸盐矿物为主,碳酸盐纹层连续性差,层状构造,黏土矿物含量高于碳酸盐含量
块状	含有机质	灰质泥岩	 罗69井, 2933.87m	 罗69井, 2933.87m	泥质、粉砂及隐晶碳酸盐矿物均匀相混,块状构造,黏土矿物含量高于碳酸盐含量

图4 济阳拗陷泥页岩主要岩相划分图

### 2.2.2 不同岩相泥页岩孔隙结构特征

富生烃盆地泥页岩矿物成分多样、基质孔隙细小、孔缝系统复杂, 如何进行表征是目前勘探家所关注的问题。在大量资料调研与勘探实践的基础上, 开发集成了泥页岩微观孔隙结构表征方法: 利用薄片鉴定、普通电镜观测、氩离子抛光—场发射电镜联合分析、双束电镜三维观测、环境扫描电镜观察、荧光分析、原子力显微镜观测等技术描述样品孔隙面貌、形态特征及分布; 利用煤油法、酒精法孔隙度测试、空气法渗透率测试、GRI 法基质物性测试、压汞分析、 $N_2$  或  $H_2$  等气体吸附法分析, 获取孔隙结构及物性定量参数; 利用小角散射法、核磁法等, 分析孔隙结构和储油有效性。

利用所建立的泥页岩微观孔隙结构表征方法, 对济阳坳陷不同岩相泥页岩孔隙结构进行研究, 建立了济阳坳陷不同岩相陆相泥页岩孔隙结构表征模式(图5)。从模式图中可以看出块状岩相主要以纳米级孔隙为主, 细介孔含量较高; 相比而言, 纹层状岩相和层状岩相具有纳米孔和微米孔大量存在、中介孔含量较高的特点, 其中纹层状岩相纳米孔所占空间多于层

状岩相。利用氩离子抛光—场发射电镜联合分析济阳坳陷不同岩相泥页岩孔隙结构参数可以看到(表1), 纹层状岩相泥页岩孔隙度最高, 为5%~16%; 层状岩相泥页岩孔隙度其次, 为4%~13%; 而块状岩相泥页岩孔隙度最低, 为3%~8%。与块状岩相和层状岩相相比, 纹层状岩相相同的无机矿物孔的孔径较大, 孔喉配位数较高, 而孔喉分选系数低, 表明纹层状岩相具有更好的储集性能, 层状岩相其次, 块状岩相较差。这与所建立的不同岩相泥页岩的三维模型结果一致(图5), 与块状岩相泥页岩和层状岩相泥页岩相比, 纹层状岩相泥页岩孔缝系统受纹层发育的控制, 其层内近似于均质, 而层间非均质性强, 体现为泥质粉砂单层以碎屑颗粒间残余孔(泥质粉砂)为主, 而灰质纹层层间孔隙以微晶—细晶方解石晶间孔为主, 层间孔隙与纹层缝相连形成网状孔隙系统, 连通性相对更为优越。从目前济阳坳陷页岩油勘探实践来看, 除夹薄层砂岩和碳酸盐岩的泥页岩岩相之外, 纹层状泥质灰岩相和灰质泥岩相是目前获得工业性页岩油气流最多的泥页岩岩相(图6)。

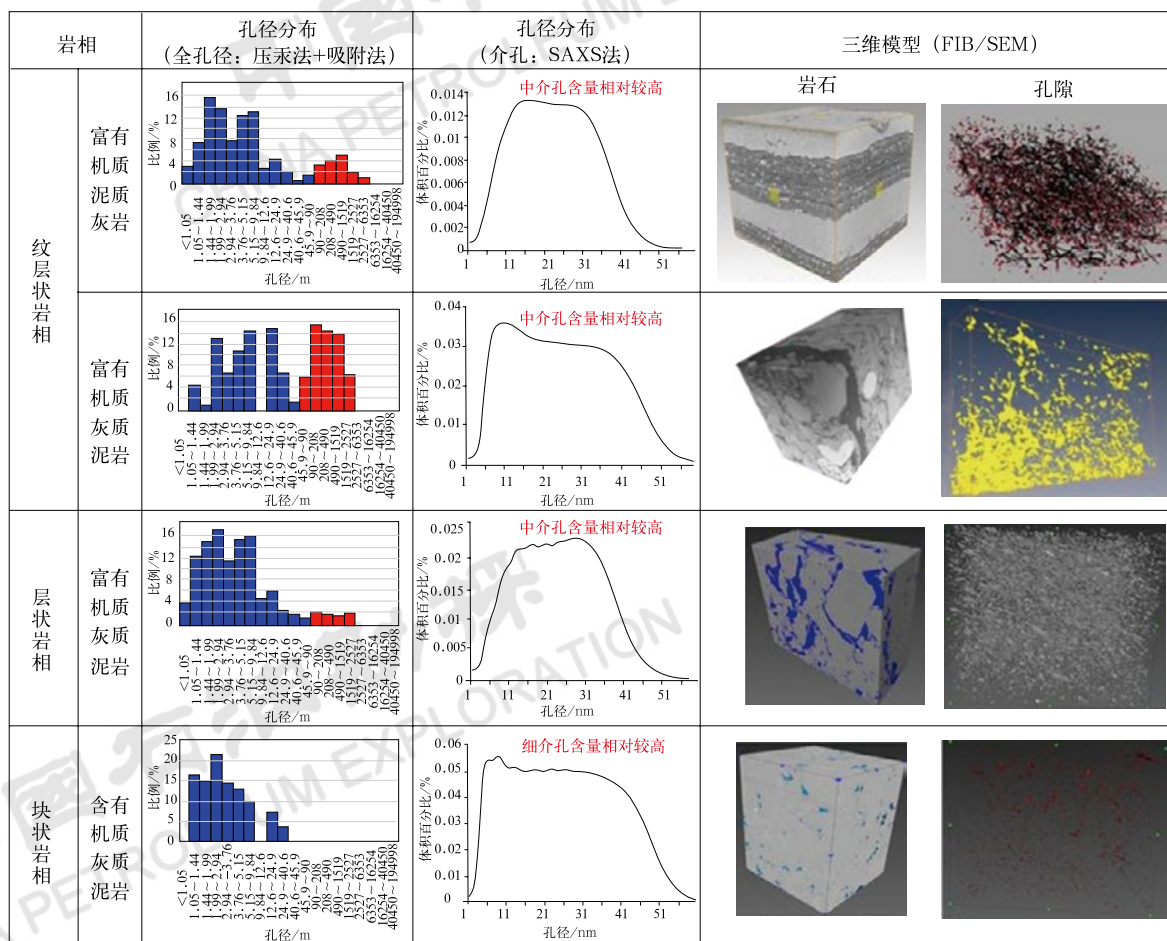


图5 济阳坳陷不同岩相孔隙结构表征模式图

表 1 济阳拗陷不同岩相泥页岩孔隙结构参数表

主要岩相	储集空间类型	孔径 /nm		孔喉二维配位数	孔喉分选系数	均质系数	孔隙度 /%
		分布范围	平均值				
纹层状岩相	石英等粒间孔	1310~6450	1680	1.3~1.6	39	0.21	5~16
	方解石晶间孔	240~825	560	1.7~2.8	19	0.54	
	黏土矿物微孔	11~489	270	1.5~1.8	22	0.26	
层状岩相	方解石晶间孔	126~525	500	1.5~2.3	76	0.31	4~13
	黏土矿物微孔	7~328	75	1.2~1.9	28	0.25	
块状岩相	方解石和石英晶间孔	68~210	158	0.5~0.9	115	0.29	3~8
	黏土矿物微孔	3~92	28	1.1~1.5	26	0.19	

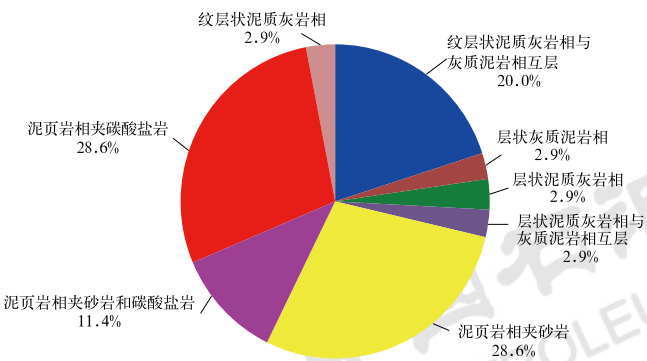


图 6 济阳拗陷试油获工业页岩油气流井泥页岩岩相分布饼状图

2.2.3 有利岩相泥页岩的分布预测

利用济阳拗陷 2435 块（次）泥页岩样品岩相划分结果，结合测井资料，建立测井识别模式，开展不同岩相泥页岩体的标定、追踪和预测，明确济阳拗陷不同岩相的分布，建立了济阳拗陷咸化沉积不同岩相的分布模式（图 7）。从模式图来看泥页岩岩相主要发育在洼陷中心，其沉积中心与凹陷的沉积中心一致；富有机质纹层状岩相主要分布在斜坡过渡带的半深湖区，陆源沉积影响小，水体稳定安静，季节性气候变化导致富有机质黏土纹层与碳酸盐岩纹层频繁重复发育；富有机质层状岩相主要分布在洼陷中心的深水湖区和过渡带的半深湖区和浅水湖区，机械搬运沉积与化学沉积同时进行，反映物源补给较充足。

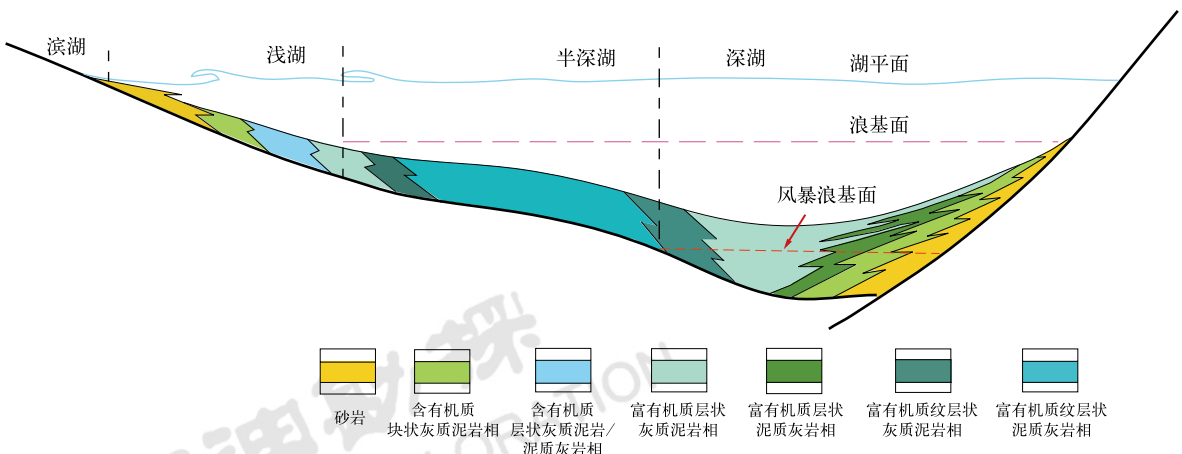


图 7 济阳拗陷咸化湖盆不同岩相泥页岩发育分布模式

2.3 建立了陆相泥页岩游离油差异富集模式

由于气与油在碳分子构成、吸附性上存在的差异，决定了页岩中气与油的赋存机制和流动性不同。目前

认为，页岩中赋存的游离气和吸附气均可产出；然而，由于油的分子较大，且吸附性强，吸附在有机质表面和内部的油不易产出，主要产出的是无机与有机物质孔隙中的游离油<sup>[25]</sup>，而且原油密度越低，流动性越好，

越易开采<sup>[26-27]</sup>。因此,页岩中游离油的获取是目前页岩油勘探所关注的问题。

### 2.3.1 不同环境泥页岩中游离油量的差异

基于泥页岩中油气生成后先满足泥页岩的自身吸附后,进入孔隙中成为游离油的认识,提出未排出泥页岩中的滞留油量减去吸附油量来获取游离油量的研究思路,利用冷冻样品和常温样品的热释烃与氯仿抽提方法,以及液氮和常温样品的热解轻烃恢复与热解 $S_2$ 重烃分析技术恢复页岩滞留油量<sup>[28]</sup>,吸附油量为利用溶胀实验获取泥页岩中干酪根和无机矿物吸附油量的总和<sup>[29]</sup>。

利用滞留油量减去吸附油量获取游离油量的方法,对济阳坳陷咸水—半咸水沉积的沙四上亚段和半

咸水—微咸水沉积的沙三下亚段 1278 块(次)泥页岩样品进行计算,建立了两套不同沉积环境泥页岩中游离油量随埋深纵向变化剖面(图 8)。其中沙四上亚段泥页岩在 2500m 以下开始出现游离油量,最高可达 25mg/g,最高值出现在 3500m 左右,咸化环境烃源岩早生烃演化特点提供了沙四上亚段浅部位泥页岩含游离油的物质基础。沙三下亚段泥页岩在 3000m 以下开始出现游离油量,在 3700m 左右最高,与大量生烃阶段的深度一致,游离油量最高可达 30mg/g 以上。沙四上亚段泥页岩生烃母质的生烃范围较宽,因此其页岩油的分布范围也较宽;沙三下亚段泥页岩生烃范围相对集中,页岩油的分布范围也较窄。

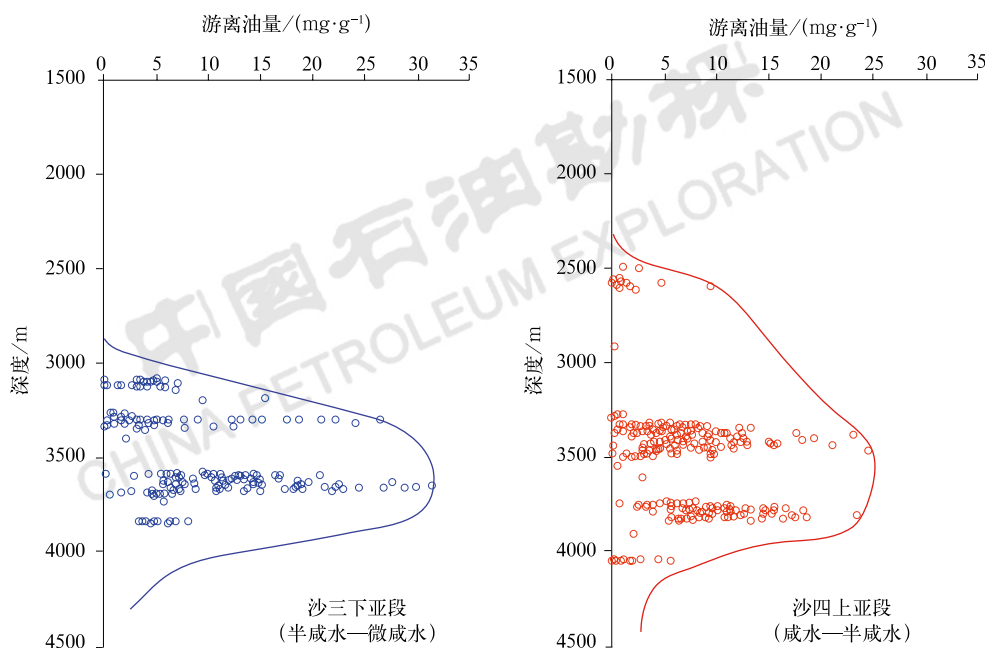


图 8 济阳坳陷东营凹陷不同沉积环境泥页岩游离油量随埋深变化图

### 2.3.2 不同岩相泥页岩游离油量的差异

从济阳坳陷沙四上亚段不同岩相泥页岩游离油量对比来看(图 9),纹层状岩相泥页岩游离油量最高,层状岩相泥页岩游离油量其次,二者游离油量随埋深增加,纹层状岩相泥页岩和层状岩相泥页岩游离油量最高分别可达 25mg/g 和 20mg/g;块状岩相泥页岩游离油量随埋深略有增加,但游离油量较低,不超过 5mg/g。岩性对游离油量影响较小,不同埋深纹层状、层状、块状的灰质泥岩和泥质灰岩游离油量相差不大,并无明显区别。因此,在有机质丰度一致的情况下,从岩相角度来看,影响泥页岩中页岩油含量的主要因素应该是岩石结构。

从富有机质纹层状岩相泥页岩和富有机质层状岩相泥页岩中游离油量对比来看,富有机质纹层状岩相泥页岩中游离油量值较高的分布范围较宽,浅于 3500m 时游离油量高于富有机质层状岩相泥页岩,在 3500m 以下二者相当,均含有较高的游离油量。

### 2.3.3 不同沉积环境泥页岩游离油富集模式的差异

富有机质纹层状岩相和富有机质层状岩相泥页岩中具有较高的游离油量,是目前页岩油勘探的主要岩相。基于泥页岩生烃性、含油性、储集性的研究,建立了济阳坳陷东营凹陷沙三下亚段和沙四上亚段富有机质纹层状岩相和富有机质层状岩相泥页岩游离油的富集模式图(图 10)。

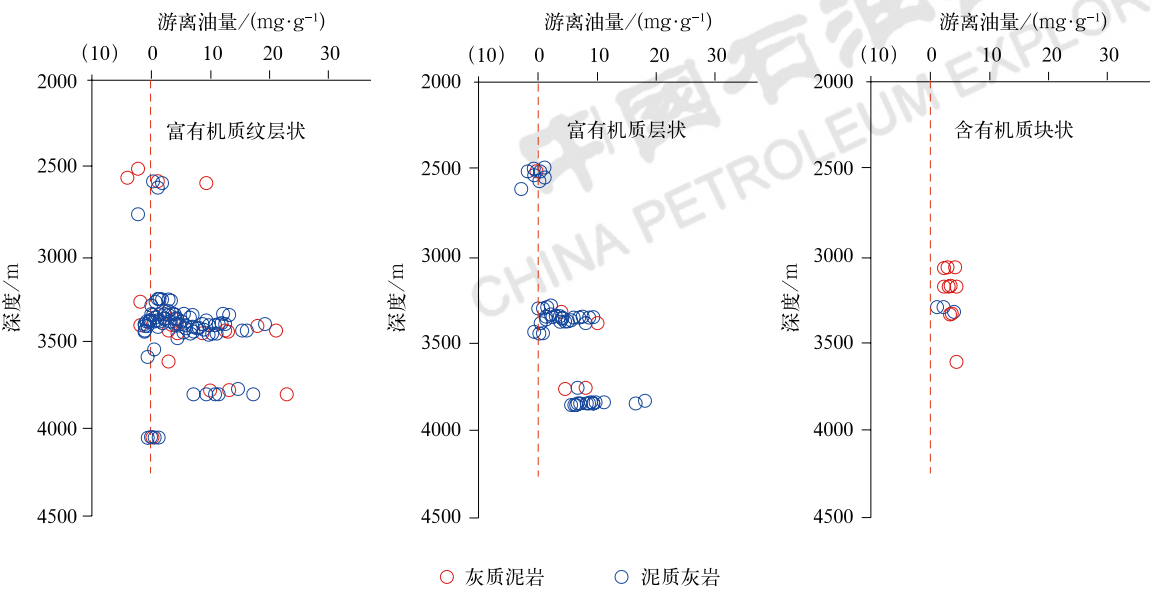


图 9 济阳坳陷东营凹陷沙四上亚段不同岩相泥页岩游离油量随埋深变化图

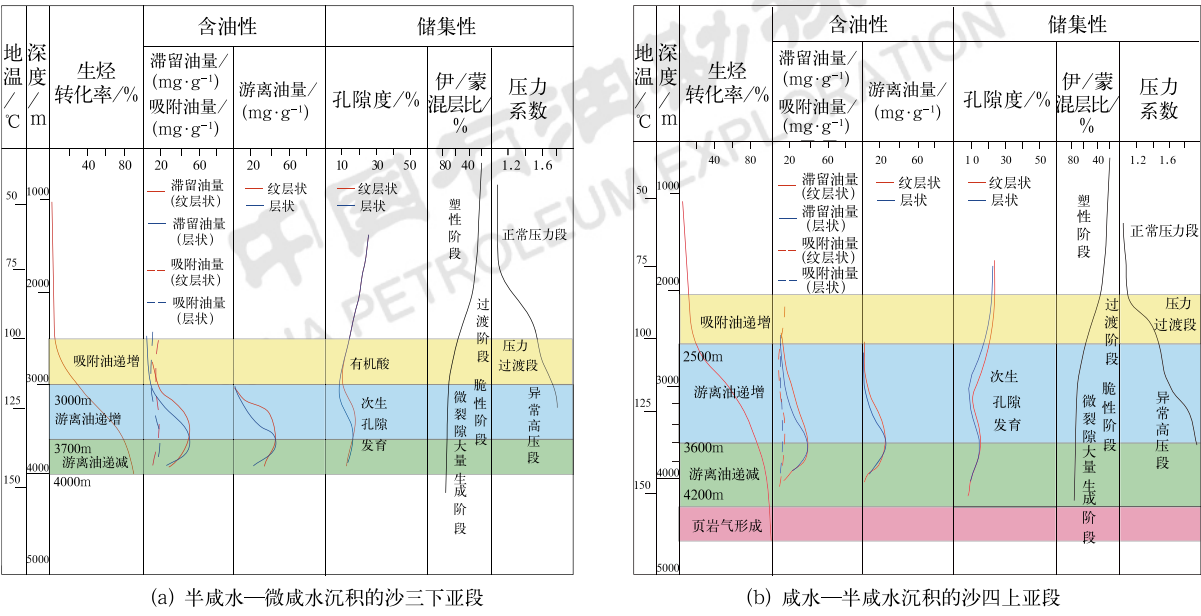


图 10 济阳坳陷东营凹陷不同沉积环境有利岩相泥页岩游离油富集模式图

从模式图上来看，与半咸水—微咸水沉积的沙三下亚段泥页岩相比，咸水—半咸水沉积的沙四上亚段泥页岩也存在吸附油递增、游离油递增、游离油递减过程，同时由于埋藏深度深于沙三下亚段，还存在页岩气形成阶段。咸水—半咸水沉积的沙四上亚段有利岩相泥页岩的游离油出现和达到最高值的埋深均浅于沙三下亚段：沙四上亚段在 2500m 出现游离油，沙三下亚段在 3000m 出现，沙四上亚段在 3600m 游离油量最高，而沙三下亚段在 3700m。根据生烃模式中以 20%~80% 为主生烃区，以不同深度段游离油量占最高游离油量的 20% 作为页岩油富集阶段，对

于沙三下亚段，纹层状泥页岩游离油主要富集深度在 3200~3800m 之间；而层状泥页岩游离油主要富集深度在 3400~3800m 之间。对于沙四上亚段，纹层状岩相泥页岩游离油主要富集深度为 3000~3800m，层状岩相泥页岩游离油主要富集深度为 3200~3800m。由此可见，咸水—半咸水沉积的沙四上亚段页岩进入游离油富集深度浅于半咸水—微咸水沉积的沙三下亚段，而且游离油富集范围宽。

不同沉积环境的有利岩相泥页岩中游离油量的分布规律与孔隙度密切相关，泥页岩孔隙类型可分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝 3 类。原生孔隙在埋藏较

浅时通常较发育,但随着埋深增大原生孔隙会因为压实和胶结作用而变少。次生孔隙是页岩中重要的孔隙类型,主要包括有机质—黏土—碳酸盐混合体内演化孔隙以及溶蚀孔隙,前者的形成是生烃转化与有机酸溶蚀共同作用的结果,而后的发育与有机酸的脱羧及硫酸盐的热还原双重作用有关<sup>[30]</sup>。裂缝包括3种类型,即层理缝、溶蚀缝和破裂缝。层理缝的发育与页岩纹层的沉积有关;溶蚀缝的形成与有机酸和硫化氢等酸性流体有关;破裂缝的形成受断裂发育、流体超压双重控制。与游离油量相对应,由于沙四上亚段具有早生烃的特点,因此埋深在浅于2500m就已存在次生孔隙,而沙三下亚段在埋深大于2500m后次生孔隙才逐渐发育。沙三下亚段和沙四上亚段泥页岩在埋深大于3000m后,普遍存在异常高压,生烃增压作用和生烃过程产生的有机酸作用于无机矿物,导致大量次生孔隙和微裂隙的形成,有利于游离油的储集。这个阶段,纹层状岩相与层状岩相孔隙演化具有一定差异,沙三下亚段在3000~3700m、沙四上亚段在3000~3600m,纹层状泥页岩次生孔隙发育程度明显好于层状泥页岩,进而导致纹层状泥页岩游离油量整体高于层状泥页岩,但随着埋深的增加,两者差异减小,并趋于一致。由此可见,泥页岩的生烃性、含油性和储集性的协同演化控制了页岩油的富集。

### 3 页岩油勘探认识

通过与已发现页岩油商业性开采的 Barnett 和 Eagle Ford 含油泥页岩对比,形成以下4点基本认识。

#### 3.1 有利岩相发育是页岩油富集的基础

济阳拗陷已发现页岩油气流的沙三下亚段和沙四上亚段泥页岩与目前美国已发现页岩油商业性开采的 Barnett 和 Eagle Ford 含油泥页岩参数相比,厚度、有机碳含量、孔隙度均具有较好的可比性,具备形成大量富集页岩油的条件(表2)。

Barnett、Eagle Ford 含油泥页岩与济阳拗陷咸化环境沉积的沙四上亚段对比分析,均具有纹层状岩石构造,纹层主要由富有机质黏土纹层和亮晶方解石纹层组成,层间微孔隙、方解石矿物晶间孔发育,它们是页岩油主要的储集空间。方解石纹层脆性矿物含量高,孔隙度和渗透率大,易发育裂缝,可有效沟通孔隙,易于形成有效的储集体,济阳拗陷目前所发现页岩油多数产自与纹层状相关的泥页岩岩相。由此可见,有利岩相控制了泥页岩的储集条件与可压性,富有机质纹层状岩相泥页岩及其所夹薄层砂岩和碳酸盐岩是目前所发现页岩油的主要岩性组合,是页岩油富集的基础。

表2 济阳拗陷不同沉积环境泥页岩与北美含油泥页岩参数对比表

页岩油区带	层位	厚度 /m	TOC/%	孔隙度 /%	沉积环境
美国	Eagle Ford	24~61	4~7	3.4~14.6	海相
	Barnett	15~61	5~8	4~10	海相
济阳拗陷	沙四上亚段	40~120	0.5~18.6	4~16	咸水
	沙三下亚段	50~200	0.5~11.2	4~13	半咸水

#### 3.2 适宜演化程度是页岩油富集的条件

根据济阳拗陷沙三下亚段、沙四上亚段泥页岩取心岩石分析测试结果, $R_o$ 一般分布在0.5%~1.4%,这与中国东部陆相断陷盆地见油气流的泌阳凹陷核桃园组和江汉盆地潜江凹陷潜江组大致相当,但低于 Barnett 和 Eagle Ford 含油泥页岩(图11);中国东部陆相断陷盆地页岩油原油密度一般为0.83~0.92g/cm<sup>3</sup>,大于北美 Barnett 和 Eagle Ford 含油泥页岩(图12)。

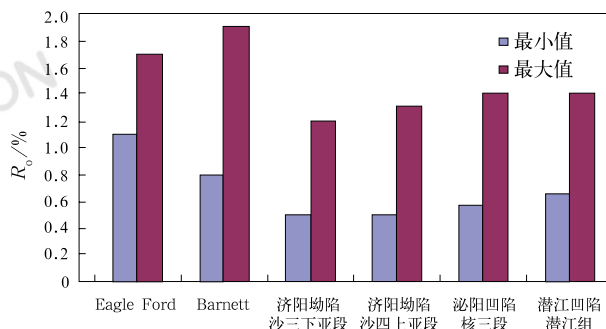


图11 中国东部部分含油泥页岩与北美含油泥页岩  $R_o$  对比图

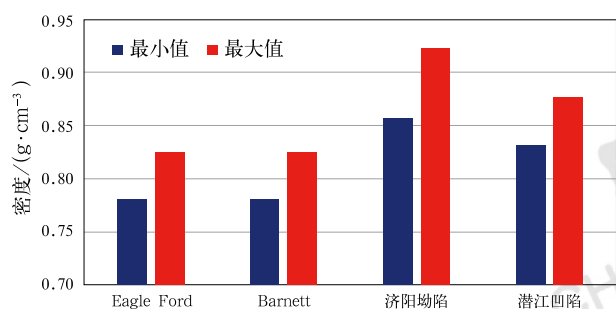


图 12 中国东部陆相页岩油与北美海相页岩油原油密度对比图

油气主要是在地下深处干酪根（生烃母质）热演化而成<sup>[31-32]</sup>，岩石中有机质进入生油阶段后，随着热演化程度的增加，干酪根有机大分子不断发生化学键断裂，从而导致分子量不断减小。故随着热演化程度提高，所形成原油的分子量逐渐减小，对应所生成原油的物理性质也相应发生变化，从高黏度、高密度的重质油逐渐转变为低黏度、低密度的轻质油。从济阳拗陷原油密度随埋深的关系来看（图 13），呈现出密度随埋深增加而降低的特征，即由埋藏较浅的重质油转化为埋藏较深的轻质油。东营凹陷新利深 1 井钻至盆地较深部位，发现凝析油气高产层，这种现象与济阳拗陷泥页岩有机质成熟度随埋深增加热演化程度逐渐升高一致<sup>[15]</sup>，表明济阳拗陷古近系泥页岩在生油阶段可形成工业性页岩油气富集，预示着深层较高演化程度页岩具有较大的页岩油勘探潜力。从北美与中国东部陆相泥页岩成熟度对比来看， $R_o$  高于 0.7% 是页岩油富集的基本条件。

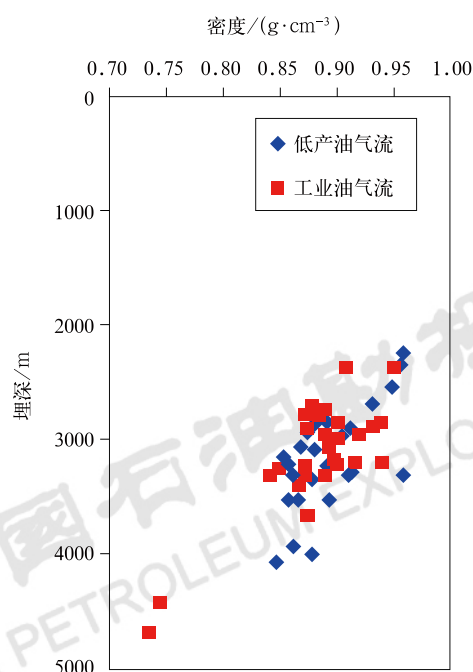
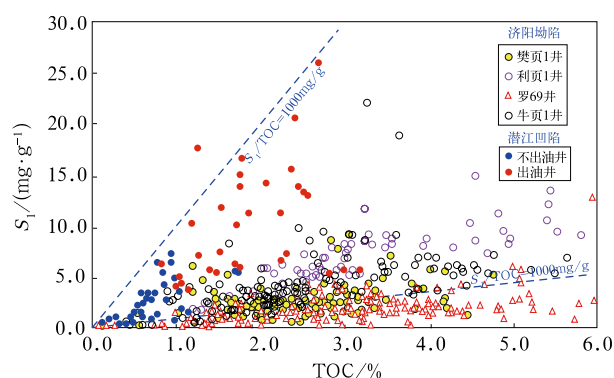


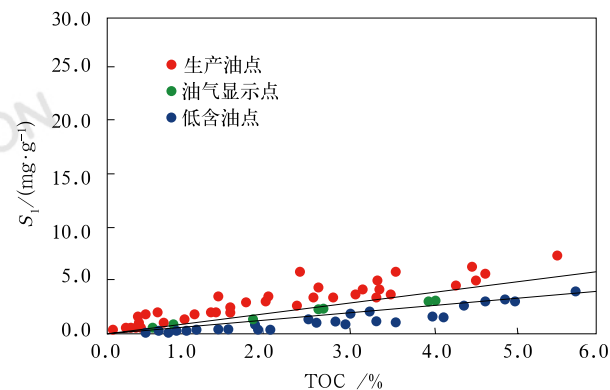
图 13 济阳拗陷页岩油原油密度随埋深变化图

### 3.3 充足游离组分是页岩油富集的关键

游离油量是产出页岩油的主要构成部分，北美结合生产实践利用  $S_1/TOC$  来表征泥页岩中游离油量的多少，如在 Eagle Ford 含油泥页岩的勘探开发中，发现生产出页岩油的含油泥页岩的  $S_1/TOC$  较高，一般在 100mg/g 以上，并以此作为页岩中大量游离油富集的标准，该认识被国内外许多学者所接受<sup>[33-34]</sup>。与 Eagle Ford 含油泥页岩对比来看（图 14），中国东部陆相断陷盆地的济阳拗陷沙四上亚段、沙三下亚段泥页岩和江汉盆地潜江凹陷潜江组泥页岩大量样品点落在  $S_1/TOC$  等于 100mg/g 以上，尤其是盐水沉积的潜江组泥页岩  $S_1/TOC$  最高可达 1000mg/g，表明中国东部陆相咸化沉积的泥页岩中均含有大量的游离油量，这也被济阳拗陷和潜江凹陷发现工业性页岩油气流所证实。泥页岩孔隙中较高的游离油量增加了泥页岩中的地层压力，从济阳拗陷页岩油流井产层压力系数与试油产量对比图来看（图 15），虽然在常压可见页岩油气流，但无夹层泥页岩中地层压力系数在 1.2 以上时，页岩油气流才会大量出现，表明当地层压力系数大于 1.2 时，泥页岩中蕴含着大量的游离油量，充足游离组分是页岩油富集的关键。



(a) 济阳拗陷和潜江凹陷古近系泥页岩



(b) Eagle Ford 含油泥页岩

图 14 中国东部部分泥页岩与北美含油泥页岩 TOC 与  $S_1$  关系图

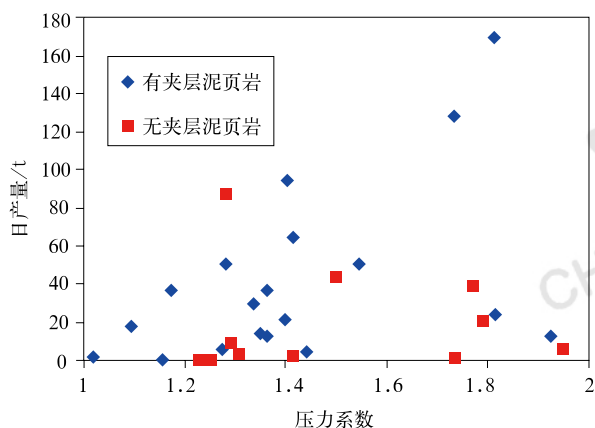


图 15 济阳拗陷见页岩油流井产层压力系数与试油产量对比图

### 3.4 良好可压性能是实现有效开发的保证

美国主要产油页岩的岩性和矿物组成有很大的差别,既有石英含量较高的硅质页岩,也有碳酸盐含量较高的灰质页岩,对于可进行商业性开采的页岩,其一般具有较高的脆性,从而有利于压裂措施的实施,增加含油气页岩极低的基质渗透率。

虽然济阳拗陷陆相泥页岩与已商业性开采的海相含油泥页岩矿物组成具有一定的可比性<sup>[17]</sup>,但脆性矿物成因差异影响了岩石的可压性。Barnett 页岩 SiO<sub>2</sub> 含量大,为海相生物成因,硅质以黏土级—粉砂级碎屑产状产出,呈纹层分布,由放射虫生物硅堆积而成的页岩具有很好的可压裂性。济阳拗陷陆相泥页岩中石英主要为陆源碎屑搬运沉积,与泥质不均匀相混,主要呈分散状分布,部分呈纹层状、条带状与泥质相混,这种弥散状分布特点对可压裂性作用不大,碳酸盐矿物为主要的脆性支撑架构矿物。以 Eagle Ford 为代表的高碳酸盐含量泥页岩,碳酸盐矿物主要源自颗石藻,是生物成因,呈层状分布,导致泥页岩易于压裂。济阳拗陷陆相泥页岩虽然碳酸盐矿物也有一部分为生物成因,但主要为化学成因,以泥晶为主,呈层状分布,在一定条件下具备塑性特征,泥页岩压裂效果相对较差。但从济阳拗陷罗 69 井沙三下亚段泥页岩计算水平应力各向异性分布来看,最大水平应力和最小水平应力具有一定的应力差,最大应力差可达 22MPa (图 16)。国际上压裂改造实践表明,水平地应力的各向异性和双轴地应力差影响了水平井压裂的造缝效果,水平井井眼轨迹在平面上垂直或与最大主应力方向呈一定夹角,压裂时易于产生网状缝。由此可见,济阳拗陷泥页岩同样具有一定的可压性,济阳拗陷陆相泥页岩可压性研究是目前需要攻关的

方向。而美国页岩油产量的迅速增长得益于水平井 + 多分段压裂技术的应用,可见良好的可压性能是实现有效开发的保证。

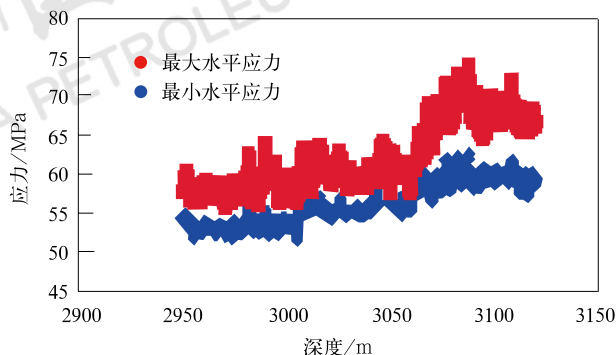


图 16 济阳拗陷罗 69 井沙三下亚段计算水平应力各向异性分布图

### 3.5 陆相页岩油选区评价指标体系的建立

目前对于页岩气有较为系统的评价体系和参数,而页岩油的研究起步较晚,至今尚未形成公认的页岩油的评价标准及体系。鉴于页岩油与页岩气形成条件具有一致性,根据前人所建立的页岩气的评价标准所应用的参数,结合济阳拗陷页岩油的勘探实践和认识,针对陆相泥页岩非均质性较强的特点,引入有利岩相的概念,建立了适用于中国东部陆相咸化湖泊沉积页岩油选区评价指标体系(表 3)。该评价体系分为有

表 3 中国东部陆相断陷湖盆咸化沉积页岩油选区评价标准

评价指标	评价参数	咸化湖泊
有利岩相	矿物成分	泥质灰岩、灰质泥岩
	有机碳含量 /%	>2.0
	储集性能	孔隙度大于 8%, 中值孔喉半径大于 30nm
	岩石构造	纹层、层状
	厚度 /m	>30
	夹层	碳酸盐岩、砂岩薄夹层
适宜演化程度	$R_o$ /%	0.7~1.3
	原油品质	密度小于 0.88 g/cm <sup>3</sup>
充足游离组分	压力系数	>1.2
	$S_1$ / (mg · g <sup>-1</sup> )	>2
	$S_1$ / TOC / (mg · g <sup>-1</sup> )	>100
良好可压性能	泊松比	<0.3
	杨氏模量 /GPa	>10
	地应力差异系数	<0.25
	天然裂缝	发育
	埋深 /m	<4500

利岩相、适宜演化程度、充足游离组分和良好可压性能4个指标共计16个评价参数,可为与济阳拗陷具有相似地质背景的中国东部断陷盆地陆相咸化湖泊沉积页岩油有利目标的优选提供借鉴。

## 4 结语

济阳拗陷页岩油勘探实践表明,咸化湖泊泥页岩有机质丰度高,成层富集分布,生烃早,生烃范围宽,具有优越的成烃机制;纹层状岩相泥页岩孔径大、孔隙度较高、连通性好,具有较好的储集性能;纹层状岩相泥页岩游离油含量高、富集深度范围宽,是目前页岩油首选的勘探目标。与北美海相泥页岩相比,中国陆相泥页岩非均质性强,页岩油勘探开发应注重“甜点”选区评价,应具备“有利岩相发育、适宜演化程度、充足游离组分、良好可压性能”4个基本富集条件。

中国东部陆相断陷盆地多个拗陷均存在咸化沉积的泥页岩,具有良好的页岩油富集条件,具有较广阔的勘探前景,应是下一步页岩油勘探开发的主要对象。中国陆相页岩油作为新兴的勘探资源,正处于发现的早期阶段,仍存在众多的勘探开发现实挑战,需要解放思想、坚定信心,强化基础攻关,加快部署进程,使之尽快成为中国油气资源战略的接替阵地。

## 参考文献

- [1] EIA. Annual energy outlook 2012, with projections to 2035 [M]. Washington: US Energy Information Administration, 2012.
- [2] EIA. World energy outlook 2012 [M]. London: International Energy Agency, 2012.
- [3] Sonnenberg S A, Pramudito A. Petroleum geology of the giant Elm Coulee field, Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 2009,93(9): 1127-1153.
- [4] Li J J, Wang W M, Cao Q. Impact of hydrocarbon expulsion efficiency of continental shale upon shale oil accumulations in eastern China [J]. Marine & Petroleum Geology, 2015,59:467-479.
- [5] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力 [J]. 石油学报, 2013,34(1): 1-11.  
Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(1):1-11.
- [6] 邹才能, 陶士振, 白斌, 杨智, 朱如凯, 侯连华, 等. 论非常规油气与常规油气的区别和联系 [J]. 中国石油勘探, 2015,20(1):1-16.  
Zou Caineng, Tao Shizhen, Bai Bin, Yang Zhi, Zhu Ruka, Hou Lianhua, et al. Differences and relations between unconventional and conventional oil and gas [J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(1): 1-16.
- [7] 张林晔, 李政, 李钜源. 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.
- [8] 陈祥, 王敏, 严永新, 章新文, 罗曦, 张永华. 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, Zhang Xinwen, Luo Xi, Zhang Yonghua. Accumulation conditions for continental shale oil and gas in the Biyang depression [J]. Oil and gas geology, 2011,32(4):568-576.
- [9] 王玉华, 蒙启安, 梁江平, 白雪峰, 彭建亮, 薛涛, 等. 松辽盆地北部致密油勘探 [J]. 中国石油勘探, 2015,20(4):44-53.  
Wang Yuhua, Meng Qi'an, Liang Jiangping, Bai Xuefeng, Peng Jianliang, Xue Tao, et al. Tight oil exploration in northern Songliao Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(4):44-53.
- [10] 赵靖舟. 非常规油气有关概念、分类及资源潜力 [J]. 天然气地球科学, 2012,23(3):393-406.  
Zhao Jingzhou. Conception, classification and resource potential of unconventional hydrocarbons [J]. Natural Gas Geoscience, 2012,23(3):393-406.
- [11] 付金华, 喻建, 徐黎明, 牛小兵, 冯胜斌, 王秀娟, 等. 鄂尔多斯盆地致密油勘探开发新进展及规模富集可开发主控因素 [J]. 中国石油勘探, 2015,20(5):9-19.  
Fu Jinhua, Yu Jian, Xu Liming, Niu Xiaobing, Feng Shengbin, Wang Xiujuan, et al. New progress in exploration and development of tight oil in Ordos Basin and main controlling factors of large scale enrichment and exploitable capacity [J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(5):9-19.
- [12] 梁世君, 黄志龙, 柳波, 燕列灿, 李华明, 马剑. 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, Yan Liecan, Li Huaming, Ma Jian. Formation mechanism and enrichment conditions of Lucaogou Formation shale oil from Malang sag, Santanghu Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(4):588-594.
- [13] 李政, 王秀红, 朱日房, 翟正. 济阳拗陷沙三下亚段和沙四上亚段页岩油地球化学评价 [J]. 新疆石油地质, 2015,36(5):510-514.  
Li Zheng, Wang Xiuhong, Zhu Rifang, Zhai Zheng. Geochemical evaluation of shale oil in Lower Es<sub>3</sub> and Upper Es<sub>4</sub> in Jiyang depression [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015,36(5):510-514.
- [14] 王娟. 轻质烃组分的低温密闭抽提技术及其在页岩油资源评价中的应用 [J]. 中国石油勘探, 2015,20(3):58-63.  
Wang Juan. Low-temperature closed extraction technology of light hydrocarbons and its application in evaluation of shale oil resource [J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(3):58-63.
- [15] 王永诗, 李政, 巩建强, 朱家俊, 郝运轻, 郝雪峰, 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, Zhu Jiajun, Hao Yunqing, Hao Xuefeng, 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.
- [16] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文. 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. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: discussion and application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(2):249-256.

- [17] 张善文, 张林晔, 李政. 济阳坳陷古近系页岩油气形成条件[J]. 油气地质与采收率, 2012,19(6):1-5.  
Zhang Shanwen, Zhang Linye, Li Zheng. Formation conditions of Palaeogene shale oil in Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012,19(6):1-5.
- [18] 吕明久, 付代国, 何文斌, 曾兴. 泌阳凹陷深凹区页岩油勘探实践[J]. 石油地质与工程, 2012,26(3):85-87.  
Lv Mingjiu, Fu Daiguo, He Wenbin, Zeng Xing. Exploration practice of shale oil in deep sag area of Biyang depression [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2012,26(3):85-87.
- [19] 王勇, 宋国奇, 刘惠民, 姜秀芳, 郝雪峰, 宁方兴, 等. 济阳坳陷页岩油富集主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2015,22(4):20-25.  
Wang Yong, Song Guoqi, Liu Huimin, Jiang Xiufang, Hao Xuefeng, Ning Fangxing, *et al.* Main control factors of enrichment characteristics of shale oil in Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015,22(4):20-25.
- [20] 宁方兴. 济阳坳陷不同类型页岩油差异性分析[J]. 油气地质与采收率, 2014,21(6):6-9,14.  
Ning Fangxing. Difference analysis on different types of shale oils in Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014,21(6):6-9,14.
- [21] 薛海涛, 田善思, 卢双舫, 张文华, 杜添添, 穆国栋. 页岩油资源定量评价中关键参数的选取与校正——以松辽盆地北部青山口组为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015,34(1):70-78.  
Xue Haitao, Tian Shansi, Lu Shuangfang, Zhang Wenhua, Du Tiantian, Mu Guodong. Selection and verification of key parameters in the quantitative evaluation of shale oil: a case study at the Qingshankou Formation, northern Songliao Basin[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2015,34(1):70-78.
- [22] 柳波, 何佳, 吕延防. 页岩油资源评价指标与方法——以松辽盆地北部青山口组页岩油为例[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014,45(11):3846-3852.  
Liu Bo, He Jia, Lv Yanfang. Parameters and method for shale oil assessment: taking Qingshankou Formation shale oil of northern Songliao Basin [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014,45(11):3846-3852.
- [23] 张林晔, 刘庆, 张春荣. 东营凹陷成烃与成藏关系研究[M]. 北京: 地质出版社, 2005.  
Zhang Linye, Liu Qing, Zhang Chunrong. Study on the genetic relationships between hydrocarbon occurrence and pools formation in Dongying depression [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [24] 郝运轻, 谢忠怀, 周自立, 田方, 滕建彬, 李博. 非常规油气勘探领域页岩综合分类命名方案探讨[J]. 油气地质与采收率, 2012,19(6):16-24.  
Hao Yunqing, Xie Zhonghuai, Zhou Zili, Tian Fang, Teng Jianbin, Li Bo. Discussion on multi-factors identification of mudstone and shale [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012,19(6):16-24.
- [25] 宁方兴, 王学军, 郝雪峰, 朱德燕, 朱德顺. 济阳坳陷页岩油赋存状态和可动性分析[J]. 新疆石油天然气, 2015,11(3):1-5.  
Ning Fangxing, Wang Xuejun, Hao Xuefeng, Zhu Deyan, Zhu Deshun. An analysis on occurrence state and mobility of shale oil in Jiyang depression [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2015,11(3):1-5.
- [26] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett shale: lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007,91(4):579-601.
- [27] Hicky J H, Henk B. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett shale, Mitchell 2 T. P. Sims well, Wise County, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007,91(4):437-443.
- [28] 朱日房, 张林晔, 李钜源, 刘庆, 李政, 王茹, 等. 页岩滞留液态烃的定量评价[J]. 石油学报, 2015,36(1):13-18.  
Zhu Rifang, Zhang Linye, Li Juyuan, Liu Qing, Li Zheng, Wang Ru, *et al.* Quantitative evaluation of residual liquid hydrocarbons in shale [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015,36(1):13-18.
- [29] Zheng Li, Yan Rongzou, Xing Youxu. Adsorption of mudstone source rock for shale oil-experiments, model and a case study [J]. Organic Geochemistry, 2016,92(1):55-62.
- [30] 张林晔, 李钜源, 李政, 朱日房, 张守春, 刘庆, 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, Zhu Rifang, Zhang Shouchun, Liu Qing, *et al.* Discussion on development characteristics and formation mechanism of intra-organic reservoir space in lacustrine shales [J]. Earth Science—Journal of China University of Geoscience, 2015,40(11):1824-1833.
- [31] Tissot B, Welte D H. Petroleum formation and occurrence [M]. Berlin Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1987.
- [32] 王启军, 陈建渝. 油气地球化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988.  
Wang Qijun, Chen Jianyu. Geochemistry [M]. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House, 1998.
- [33] Pepper A S, Corvi P J. Simple kinetic models of petroleum formation. Part III: modelling an open system [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995,12:417-452.
- [34] Jarvie, D M. Shale resource systems for oil and gas; Part 2—Shale-oil resource systems [J]. AAPG Memoir 2012,97:89-119.