



松辽盆地三肇凹陷青山口组一段泥页岩岩石学特征及岩相划分 ——以松页油 3 井为例

李士超¹, 杨建国¹, 柳 波², 姚玉来¹, 肖 飞¹, 白龙辉², 黄一鸣¹, 李 昂¹, 张丽艳¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 东北石油大学, 黑龙江 大庆 163318

摘 要: 以松辽盆地三肇凹陷松页油 3 井青山口组一段泥页岩为例, 对其沉积构造、有机质丰度及矿物组成等岩石学特征关系进行研究。结果表明, 三肇凹陷青一段泥页岩发育块状构造和纹层状构造两种沉积构造; TOC 含量介于 0.50%~6.82%, 平均值为 3.16%, S_1+S_2 介于 2.01×10^{-3} ~ 49.41×10^{-3} , 平均值为 23.02×10^{-3} , 总体为好—最好的烃源岩; 矿物组成以长英质矿物为主, 黏土矿物次之, 碳酸盐矿物、黄铁矿含量较低。基于岩石学特征研究, 按照“有机质丰度-岩石沉积构造-矿物组成”分类标准, 将青山口组一段划分为 9 类岩相, 其中高有机质纹层状长英质泥页岩岩相具有较好的生烃潜力, 是三肇凹陷页岩油勘探的最有利的岩相类型。

关键词: 三肇凹陷; 青山口组一段; 沉积构造; 有机碳含量; 矿物组成; 岩相

PETROLOGY AND LITHOFACIES OF SHALE FROM THE FIRST MEMBER OF QINGSHANKOU FORMATION IN SANZHAO SAG, SONGLIAO BASIN: A Case Study of SY-3 Well

LI Shi-chao¹, YANG Jian-guo¹, LIU Bo², YAO Yu-lai¹, XIAO Fei¹, BAI Long-hui²,

HUANG Yi-ming¹, LI Ang¹, ZHANG Li-yan¹

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang Province, China

Abstract: Taking the shale from the first member of Qingshankou Formation in SY-3 well of Sanzhao sag in Songliao Basin as an example, the paper studies the petrological characteristics, including sedimentary structure, organic matter abundance and mineral composition. The results show that the shale develops massive structure and laminated structure are, with TOC of 0.50%~6.82% (averagely 3.16%) and S_1+S_2 of 2.01×10^{-3} ~ 49.41×10^{-3} (averagely 23.02×10^{-3}), generally belonging to good-best source rock. The mineral composition is mainly felsic mineral, followed by clay, with low content of carbonate and pyrite. Based on the petrological characteristics, the first member of Qingshankou Formation can be divided into 9 types of lithofacies by the classification criteria of organic matter abundance-sedimentary structure-mineral composition, among which the laminated felsic shale with high TOC has good hydrocarbon generation potential, serving as the most favorable lithofacies for shale oil exploration in Sanzhao sag.

Key words: Sanzhao sag; first member of Qingshankou Formation; sedimentary structure; TOC; mineral composition; lithofacies

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-03-31. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“松辽盆地北部页岩油战略调查”(DD20190114); “大庆齐家-古龙地区页岩油气战略调查与评价”(DD20179613).

作者简介: 李士超(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事油气基础地质调查及页岩油研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,

E-mail/277983674@qq.com

0 引言

近年来,美国页岩油产量迅速增加,成功实现商业开发,页岩油资源受到油气行业广泛关注^[1-3]。据2017年底美国能源信息署(EIA)和美国先进资源国际公司(Advanced Resources International,ARI)数据分析,全球页岩油资源丰富,技术可采储量为 618.47×10^8 t。其中,中国页岩油技术可采储量为 44.8×10^8 t^[4-7],资源潜力巨大,是中国油气资源的重要接替领域。勘探实践证明中国页岩油资源主要分布在松辽盆地的白垩系、准噶尔盆地的二叠系、鄂尔多斯盆地的三叠系、渤海湾和江汉盆地的古近系、新近系^[8-14]。

随着中国页岩油研究程度不断加深,相继在松辽盆地齐家-古龙凹陷(白垩系青山口组)^[15-16]、鄂尔多斯盆地陇东地区(三叠系延长组)^[17-19]、渤海湾盆地沧东凹陷(古近系孔店组)^[20]、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷(二叠系芦草沟组)^[21]等湖相盆地中不同程度地获得了页岩油油流,其中部分地区已实现工业化开发。松辽盆地三肇凹陷中生界上白垩统青山口组一段(K_2qn^1 ,简称青一段)泥页岩层厚度大、分布广泛、有机质丰度高,同样具备优越的页岩油发育地质条件,但由于研究区页岩油勘探和研究较晚,主要目的层青一段泥页岩地球化学、矿物学等方面的研究还存在一定不足。本文基于三肇凹陷的松页油3井岩心测试分析数据,重点开展2方面研究工作:1)通过泥页岩有机质丰度、沉积构造、矿物组成研究,明确青一段泥页岩石学特征;2)在岩石学研究的基础上,进行岩相划分,明确各岩相分布特征及页岩油富集的有利岩相,以期为今后松辽盆地三肇凹陷页岩油勘探开发提供基础参考。

1 研究区概况

松辽盆地位于中国东北部,面积约 26×10^4 km²,是目前世界上已发现的最大的陆相含油气盆地,是中国主要的油气产区。三肇凹陷位于松辽盆地中央凹陷区内,西连大庆长垣,东邻朝阳沟阶地,北部与绥化凹陷、绥棱背斜带和安达向斜南部相邻,是一个长期继承性发育的拗陷^[22],面积约5 500 km²(图1)^[23-24]。青山口组以温暖潮湿条件下的湖泊沉积为主,青一段沉积时期发生大规模的水进,为半深湖—深湖缺氧还原环境^[25],形成了以灰黑色—黑色巨厚泥岩为主,间有灰黑色泥质粉砂岩、深灰色粉砂岩的细粒岩性组合。松

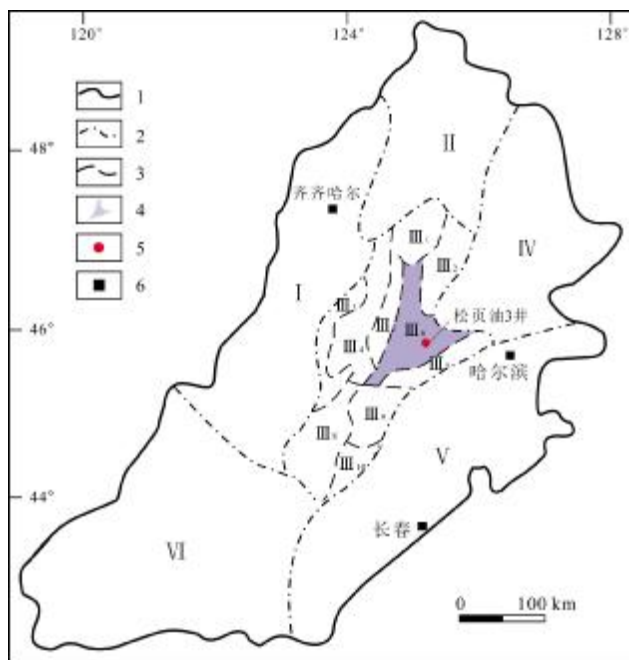


图1 松辽盆地构造分区及研究区范围

Fig. 1 Tectonic division of Songliao Basin with the study area

1—盆地边界 (basin boundary); 2—一级构造分区界线 (boundary of first-order tectonic division); 3—二级构造分区界线 (boundary of second-order tectonic division); 4—研究区范围 (study area); 5—井位 (well location); 6—城市 (city); I—西部斜坡区 (western slope); II—北部倾没区 (northern plunge); III—中央拗陷区 (central depression); III₁—黑鱼泡凹陷 (Heiyupao sag); III₂—明水阶地 (Mingshui terrace); III₃—龙虎泡—红岗阶地 (Longhupao-Honggang terrace); III₄—齐家—古龙凹陷 (Qijia-Gulong sag); III₅—大庆长垣 (Daqing placanticline); III₆—三肇凹陷 (Sanzhao sag); III₇—朝阳沟阶地 (Chaoyanggou terrace); III₈—长岭凹陷 (Changling sag); III₉—扶余隆起带 (Fuyu uplift); III₁₀—双坨子阶地 (Shuangtuozhi terrace); IV—东北隆起区 (northeast uplift); V—东南隆起区 (southeast uplift); VI—西南隆起区 (southwest uplift)

页油3井是部署在三肇凹陷中部针对青一段页岩油资源的一口参数井,完钻井深2 547 m,自上而下揭示的地层依次为第四系,新近系泰康组,白垩系上统明水组、四方台组、嫩江组、姚家组、青山口组,白垩系下统泉头组(未穿)。目的层青一段顶深1 968.5 m,底深2 061.5 m,厚93 m,该井针对青一段进行了全段取心。

2 泥页岩岩石学特征

沉积构造、有机质丰度及矿物成分是揭示富有机质泥页岩岩石学特征多样性的主要因素,也是从沉积成因角度划分岩相类型的重要依据^[26-27]。

2.1 沉积构造

松页油3井青一段岩性主要为灰黑色荧光泥岩和

灰黑色荧光泥页岩,含少量黑灰色荧光泥岩、灰黑色荧光含介形虫泥岩、灰黑色泥页岩,局部可见深灰色泥质粉砂岩、灰黑色含介形虫荧光泥岩、灰黑色荧光含介形虫泥页岩、绿灰色泥质粉砂岩,偶见灰白色沉凝灰岩、灰黑色介形虫层等。发育块状构造、水平层理,局部可见介形虫化石、黄铁矿团块、植物碎片和炭屑。

通过对岩心和薄片观察,识别出块状构造和纹层状构造两种沉积构造类型(图2),总体为纹层状沉积构造,局部见块状沉积构造,中-下部块状沉积构造较上部更为发育。块状构造主要特征是无颜色、粒度、矿物组成的明显变化,岩石整体表现为均质;纹层状构造在颜色、粒度、矿物组成方面发生突变,单层厚度小于1 mm,并间隔反复出现。

2.2 有机质丰度

(1) 实验条件

总有机碳含量(TOC)测试流程依据 GB/T 19145—2003《沉积岩中总有机碳的测定》进行。采用美国力可

公司 C-744 碳分析仪将样品在高温下燃烧氧化,将有机碳转化为 CO_2 ,利用热导检测器检测 CO_2 体积,再换算出碳的百分含量。岩石热解测试流程依据石油天然气行业标准 SY/T 5117—1996《岩石热解分析方法》进行,采用 Rock-Eval VI 岩石热解仪测定。测试由东北石油大学非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室完成,共测定样品 199 个,样品平均间隔 0.45 m。

(2) 测试结果及分析

根据中国陆相烃源岩有机质丰度评价指标标准, $\text{TOC} < 0.4\%$ 或 $S_1 + S_2 < 0.5 \times 10^{-3}$ 为非烃源岩, TOC 在 $0.4\% \sim 0.6\%$ 之间或 $S_1 + S_2$ 在 $0.5 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3}$ 之间为差烃源岩, TOC 在 $0.6\% \sim 1.0\%$ 之间或 $S_1 + S_2$ 在 $2.0 \times 10^{-3} \sim 6.0 \times 10^{-3}$ 之间为中等烃源岩, TOC 在 $1.0\% \sim 2.0\%$ 之间或 $S_1 + S_2$ 在 $6.0 \times 10^{-3} \sim 20.0 \times 10^{-3}$ 之间为好烃源岩, $\text{TOC} > 2.0\%$ 或 $S_1 + S_2 > 20.0 \times 10^{-3}$ 为最好烃源岩^[19-20]。

测试结果表明,松页油 3 井青一段泥页岩 TOC 含量为 $0.50\% \sim 6.82\%$,平均值为 3.16% ,其中多数样品 $\text{TOC} > 1.0\%$,占比 97.99% ,仅有 4 块样品 $\text{TOC} < 1.0\%$;主

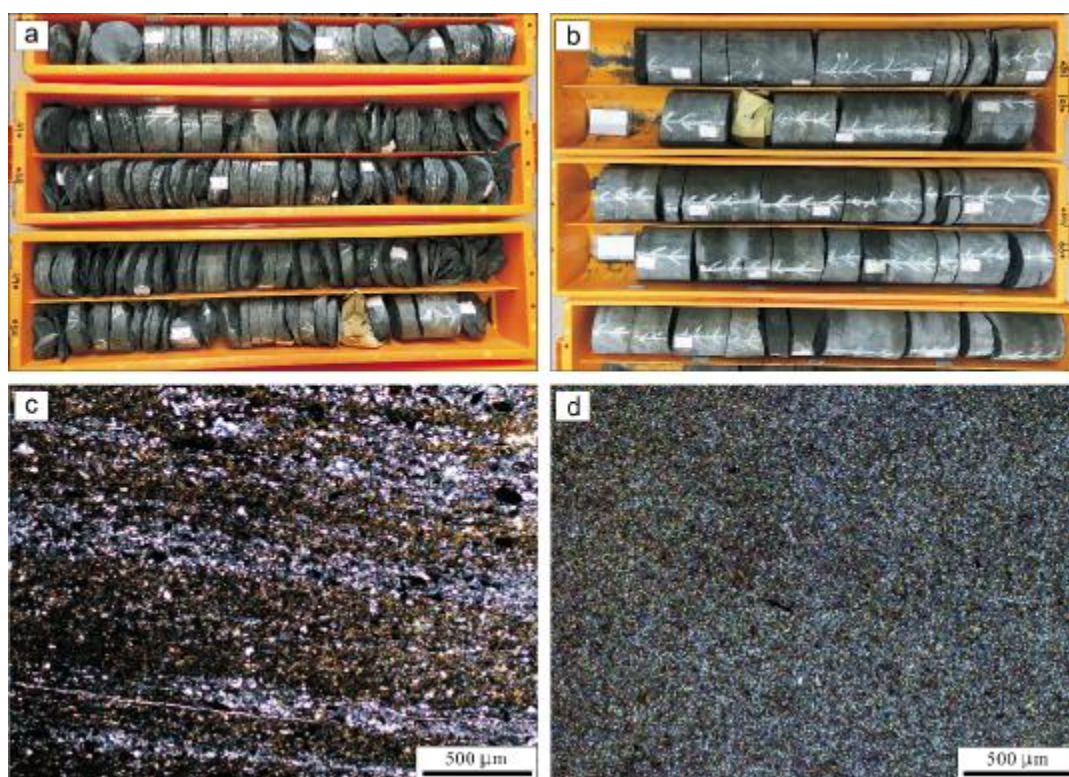


图2 松页油 3 井青一段泥页岩岩心与薄片照片

Fig. 2 Cores and thin sections of the shale from the 1st member of Qingshankou Formation in SY-3 well

a—灰黑色层状泥页岩(grayish-black laminated shale); b—灰黑色块状泥页岩(grayish-black massive shale); c—纹层状构造(laminated structure); d—块状构造(massive structure)

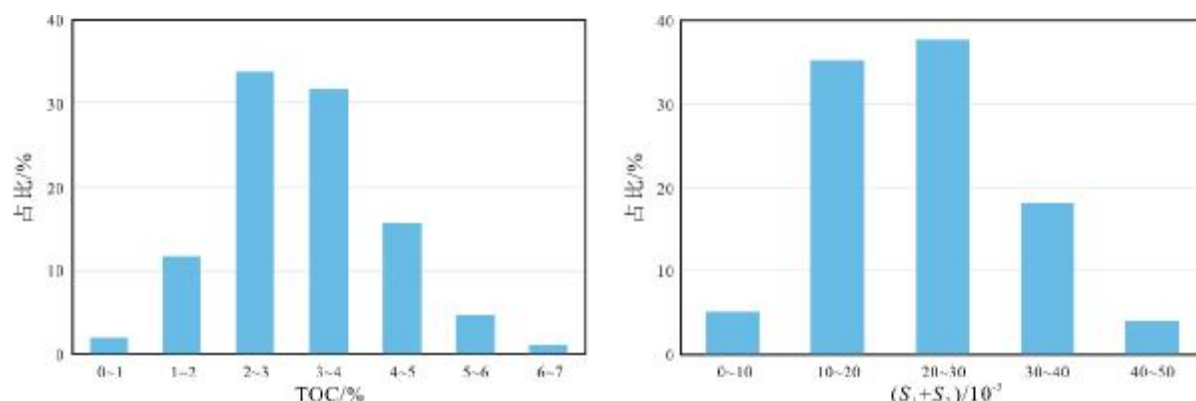


图3 松页油3井青一段泥页岩 TOC 与 S_1+S_2 频率分布图

Fig. 3 Frequency distribution histograms for TOC and S_1+S_2 of shale from the 1st member of Qingshankou Formation in SY-3 well

要分布范围在 2.0%~4.0%之间,占比 65.44%。 S_1+S_2 为 2.01×10^{-3} ~ 49.41×10^{-3} ,平均值为 23.02×10^{-3} ,其中多数样品 $S_1+S_2 > 10 \times 10^{-3}$,占比 94.97%,仅有 10 块样品 $S_1+S_2 < 10 \times 10^{-3}$;主要分布范围在 10×10^{-3} ~ 30×10^{-3} 之间,占比 90.95%(图 3)。总体上,青一段泥页岩为典型的富有机质泥页岩特征,不仅 TOC 含量高,而且生烃潜量高,TOC 含量与 S_1+S_2 具有很好的正相关性,总体表现出好—最好的烃源岩的特征(图 4)。

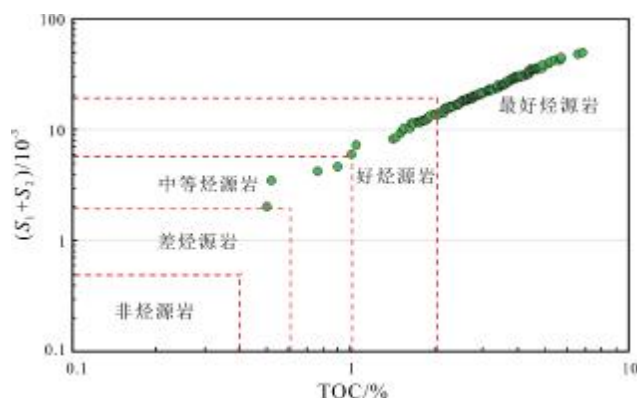


图4 松页油3井青一段泥页岩有机质丰度评价

Fig. 4 Evaluation of organic matter abundance of shale from the 1st member of Qingshankou Formation in SY-3 well

2.3 矿物组成

(1) 实验条件

矿物组成测试流程依据 SY/T 5163—2010《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》,采用德国布鲁克 D8AA25 X 射线衍射仪,实验在 25℃、30%~46% RH 的环境下进行。测试由东北石油大学非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室

完成,共测定样品 199 个,样品平均间隔 0.45 m。

(2) 测试结果及分析

测试结果表明松页油 3 井青一段泥页岩以长英质矿物为主(含量 3.7%~73.4%,平均值为 49.36%),其次为黏土矿物(含量 2.5%~49.60%,平均值为 33.62%),碳酸盐矿物含量较低(含量 0~93.53%,平均值为 13.13%),黄铁矿含量最低(含量 0~18.58%,平均值为 3.89%)。长英质矿物中石英含量最高,平均值为 30.43%;斜长石含量次之,平均值为 18.46%;钾长石含量最低,平均值为 0.47%。碳酸盐矿物中铁白云石含量最高,平均值为 8.34%;方解石含量次之,平均值为 3.85%;菱铁矿含量最低,平均值为 0.93%。黏土矿物组成依次为伊利石(含量 32%~87%,平均值为 66.99%)、伊蒙混层(含量 10%~55%,平均值为 21.56%)、绿泥石(含量 2%~30%,平均值为 11.44%)、绿蒙混层(含量 0.01%,1 块样品)。纵向上,松页油 3 井青一段泥页岩矿物组成变化相对较小,总体以长英质矿物为主,其次为黏土矿物,碳酸盐矿物含量较低。局部夹层碳酸盐矿物含量较高,甚至大于 50%,如 1990.54 m、1998.22 m、2012.43 m、2038.32 m、2055.71 m 等取样点。

3 泥页岩岩相划分

3.1 划分标准

深湖—半深湖相沉积的泥页岩看似单一,都为暗色颗粒,实际上不同岩性之间存在着较大的差异。国内外学者对泥页岩岩相的划分有着多种方法,对比综合国内外研究学者的划分方法,本文采用“有机碳丰度(TOC)—岩石沉积构造—矿物组成”三分法的岩相分类

方案.

(1)有机碳的划分界限

松辽盆地青一段泥页岩 TOC 与氢指数(HI)在不同区间的相关关系研究结果^[28]表明,TOC 值小于 1% 时,HI 极低;TOC 值为 1%~2%时,HI 与 TOC 值呈正相关关系;TOC 值大于 2%后,HI 趋于稳定,不再随着 TOC 值的增大而升高.因此,针对陆相富有机质泥页岩,将 TOC 值小于 1%界定为低有机质含量,TOC 值为 1%~2%界定为中等有机质含量,TOC 值大于 2%界定为高有机质含量,能够较好地划分泥页岩在有机质含量方面的优劣.

(2)岩石沉积构造划分

以往研究经验表明,松辽盆地青一段泥页岩黏土、碳酸盐矿物含量与其发育的构造类型呈现一定的相关性.黏土矿物或碳酸盐矿物含量过高时,泥页岩更易形成块状构造.随着黏土矿物含量降低,泥页岩依次呈现纹层构造和层状构造.这表明泥页岩的矿物组成和沉积构造之间存在内在成因联系,因此在泥页岩岩相划分方案中,泥页岩的沉积构造也是划分标准之一.

(3)岩石矿物组成划分

对于岩石成分的划分,国内外学者提出了多种方案.综合对比多位学者的分类方案,本研究决定采用 Allix 等^[29]提出的分类方法,依据有机泥页岩中黏土矿物-碳酸盐矿物-长英质矿物含量,将泥页岩划分为 5 类: I)钙质泥页岩, II)纯泥页岩, III)长英质泥灰岩, IV)黏土质泥页岩, V)长英质泥页岩.此种分类方法更能反映出有机泥页岩相之间的内在联系.

3.2 岩相划分

基于上述划分标准,对松页油 3 井青一段泥页岩进行岩相划分.根据 TOC 含量可分为 3 类:低有机质($\text{TOC}<1\%$)、中有机质($1\%<\text{TOC}<2\%$)、高有机质($\text{TOC}>2\%$).其中低有机质泥页岩所占比例为 2.01%,中有机质泥页岩所占比例为 11.56%,高有机质泥页岩所占比例为 86.43%.根据岩心观察及镜下薄片观测,将之划分为块状沉积构造和纹层状沉积构造 2 类.其中块状沉积构造所占比例为 18.09%,纹层状沉积构造所占比例为 81.91%.根据矿物组成,松页油 3 井青一段泥页岩主要归于泥页岩类型划分中的 4 类(图 5): I)钙质泥页岩、III)长英质泥灰岩、IV)黏土质泥页岩、V)长英质泥页岩.其中长英质泥页岩所占的比例最高,

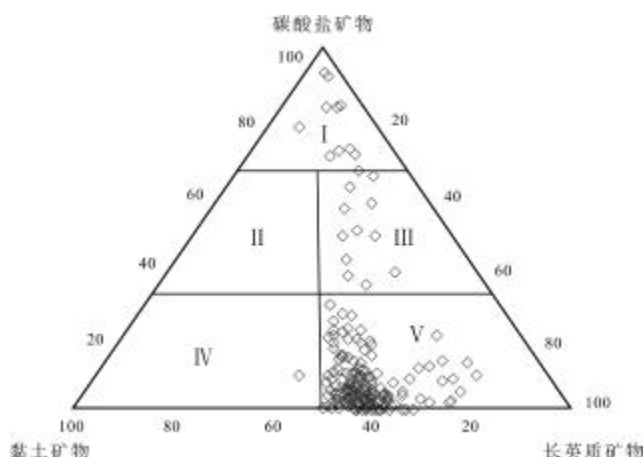


图 5 松页油 3 井青一段泥页岩矿物组成分类图

Fig. 5 Classification of rock types by mineral compositions for the shale of the 1st member of Qingshankou Formation in SY-3 well
I—钙质泥页岩(calcareous shale); II—纯泥页岩(pure shale); III—长英质泥灰岩(felsic marl); IV—黏土质泥页岩(clayey shale); V—长英质泥页岩(felsic shale)

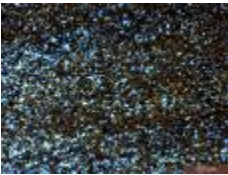
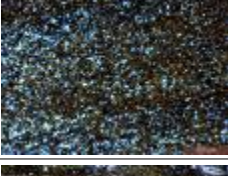
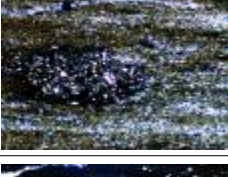
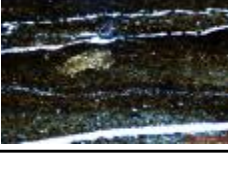
为 88.44%,其他 3 类泥页岩所占比例很低,尤其是黏土质泥页岩几乎可以忽略不计(不参与进一步岩相划分).

综合 TOC 含量、沉积构造及矿物组成特征,将松页油 3 井青一段泥页岩岩相划分为 9 类: 1)低有机质块状钙质泥页岩岩相, 2)中有机质块状钙质泥页岩岩相, 3)中有机质块状长英质泥灰岩岩相, 4)中有机质块状长英质泥页岩岩相, 5)中有机质纹层状长英质泥页岩岩相, 6)高有机质块状钙质泥页岩岩相, 7)高有机质块状长英质泥页岩岩相, 8)高有机质纹层状长英质泥灰岩岩相, 9)高有机质纹层状长英质泥页岩岩相.各泥页岩岩相具体特征见表 1.

在上述 9 类泥页岩岩相中,低有机质块状钙质泥页岩岩相、中有机质块状钙质泥页岩岩相、中有机质块状长英质泥灰岩岩相、中有机质块状长英质泥页岩岩相、高有机质块状钙质泥页岩岩相及高有机质纹层状长英质泥灰岩岩相发育比例很小;中有机质纹层状长英质泥页岩岩相与高有机质块状长英质泥页岩岩相发育比例相当,占比 10%左右;高有机质纹层状长英质泥页岩岩相是发育比例最高的岩相类型,占比 68.18%(图 7).纹层状泥页岩较块状泥页岩 TOC 含量高,长英质泥页岩较钙质泥页岩 TOC 含量高,纹层状长英质泥页岩岩相是页岩油富集的有利岩相.

表 1 松页油 3 井青一段典型泥页岩岩相特征表

Table 1 Lithofacies characteristics of typical shale from the 1st member of Qingshankou Formation in SY-3 well

序号	岩相类型	岩心特征	微观特征	特征描述	TOC/%	矿物组成/%
1	低有机质块状钙质泥页岩			块状, 碳酸盐矿物为主, TOC 含量低	<1	黏土矿物<15 长英质<25 碳酸盐类>60
2	中有机质块状钙质泥页岩			块状, 碳酸盐矿物为主, TOC 含量中等	1~2	黏土矿物<15 长英质<25 碳酸盐类>60
3	中有机质块状长英质泥灰岩			块状, 长英质和碳酸盐矿物为主, TOC 含量中等	1~2	黏土矿物<26 长英质<45 碳酸盐类 30~60
4	中有机质块状长英质泥页岩			块状, 长英质矿物为主, TOC 含量中等	1~2	黏土矿物<50 长英质>35 碳酸盐类<30
5	中有机质纹层状长英质泥页岩			纹层状, 长英质矿物为主, TOC 含量中等	1~2	黏土矿物<50 长英质>35 碳酸盐类<30
6	高有机质块状钙质泥页岩			块状, 碳酸盐矿物为主, TOC 含量高	>2	黏土矿物<15 长英质<25 碳酸盐类>60
7	高有机质块状长英质泥页岩			块状, 长英质矿物为主, TOC 含量高	>2	黏土矿物<50 长英质>35 碳酸盐类<15
8	高有机质纹层状长英质泥灰岩			纹层状, 长英质和碳酸盐矿物为主, TOC 含量高	>2	黏土矿物<26 长英质<45 碳酸盐类 30~60
9	高有机质纹层状长英质泥页岩			纹层状, 长英质矿物为主, TOC 含量高	>2	黏土矿物<50 长英质>35 碳酸盐类<30

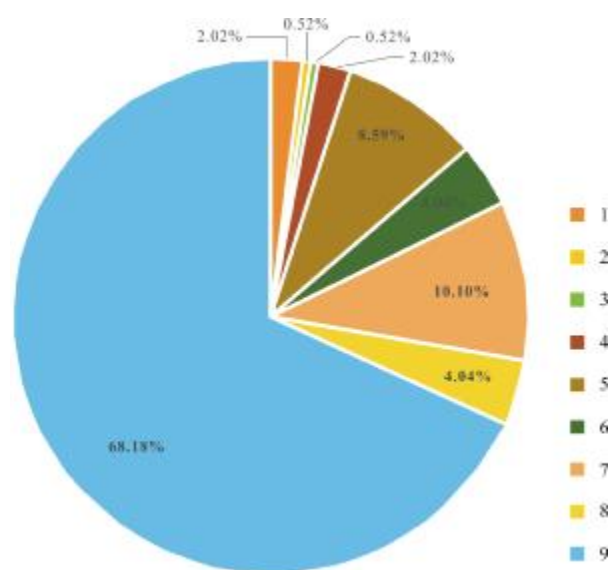


图6 松页油3井青一段各类泥页岩岩相发育比例图

Fig. 6 Proportion chart of various shale lithofacies developed in the 1st member of Qingshankou Formation in SY-3 well

1—低有机质块状钙质泥页岩岩相 (massive calcareous shale with low TOC); 2—中有机质块状钙质泥页岩岩相 (massive calcareous shale with moderate TOC); 3—中有机质块状长英质泥页岩岩相 (massive felsic shale with moderate TOC); 4—中有机质块状长英质泥页岩岩相 (massive felsic shale with moderate TOC); 5—中有机质纹层状长英质泥页岩岩相 (laminated felsic shale with moderate TOC); 6—高有机质块状钙质泥页岩岩相 (massive calcareous shale with high TOC); 7—高有机质块状长英质泥页岩岩相 (massive felsic shale with high TOC); 8—高有机质纹层状长英质泥页岩岩相 (laminated felsic shale with high TOC); 9—高有机质纹层状长英质泥页岩岩相 (laminated felsic shale with high TOC)

4 结论

三肇凹陷青山口组一段泥页岩发育块状构造和纹层状构造两种沉积构造类型。TOC 含量高, 平均值为 3.16%, 生烃潜力高。S₁+S₂ 平均值为 23.02×10³, 总体为好—最好的烃源岩。矿物组成以长英质矿物为主, 黏土矿物次之, 碳酸盐矿物、黄铁矿含量较低。黏土矿物组成主要为伊利石, 其次为伊蒙混层、绿泥石等。

将青一段泥页岩划分出 9 类岩相: 1) 低有机质块状钙质泥页岩岩相, 2) 中有机质块状钙质泥页岩岩相, 3) 中有机质块状长英质泥页岩岩相, 4) 中有机质块状长英质泥页岩岩相, 5) 中有机质纹层状长英质泥页岩岩相, 6) 高有机质块状钙质泥页岩岩相, 7) 高有机质块状长英质泥页岩岩相, 8) 高有机质纹层状长英质泥页岩岩相, 9) 高有机质纹层状长英质泥页岩岩相。

相。其中高有机质纹层状长英质泥页岩岩相最为发育, 且有机质含量高, 生烃潜力高, 是三肇凹陷页岩油勘探的最有利的岩相类型。

参考文献 (References):

- [1] 张林峰, 李钜源, 李政, 等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 700-711.
Zhang L Y, Li J Y, Li Z, et al. Advances in shale oil/gas research in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 700-711.
- [2] 刘文卿, 汤达祯, 潘伟义, 等. 北美典型页岩油地质特征对比及分类[J]. 科技通报, 2016, 32(11): 13-18.
Liu W Q, Tang D Z, Pan W Y, et al. Comparison of geological characteristics and types of typical shale oil in North America [J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(11): 13-18.
- [3] 边瑞康, 武晓玲, 包书景, 等. 美国页岩油分布规律及成藏特点[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(1): 1-9, 14.
Bian R K, Wu X L, Bao S J, et al. Distribution law and reservoir forming characteristics of shale oil in America [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(1): 1-9, 14.
- [4] 蒲秀刚, 金凤鸣, 韩文中, 等. 陆相页岩油甜点地质特征与勘探关键技术——以沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油学报, 2019, 40(8): 997-1012.
Pu X G, Jin F M, Han W Z, et al. Sweet spots geological characteristics and key exploration technologies of continental shale oil: A case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(8): 997-1012.
- [5] 宋岩, 李卓, 姜振学, 等. 非常规油气地质研究进展与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 638-648.
Song Y, Li Z, Jiang Z X, et al. Progress and development trend of unconventional oil and gas geological research [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 638-648.
- [6] 王红军, 马锋, 童晓光, 等. 全球非常规油气资源评价[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 850-862.
Wang H J, Ma F, Tong X G, et al. Assessment of global unconventional oil and gas resources [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 850-862.
- [7] 张廷山, 彭志, 杨巍, 等. 美国页岩油研究对我国的启示[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(3): 1-10.
Zhang T S, Peng Z, Yang W, et al. Enlightenments of American shale oil research towards China [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(3): 1-10.
- [8] 刘招君, 孙平昌, 柳蓉, 等. 页岩能源共生矿产成矿(藏)地质条件研究: 以松辽盆地上白垩统青山口组为例[J]. 沉积学报, 2014, 32(3): 593-600.
Liu Z J, Sun P C, Liu R, et al. Research on Geological conditions of

- shale coexistent energy mineralization (accumulation): Take the Qingshankou Formation in Upper Cretaceous, Songliao Basin for example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014,32(3):593-600.
- [9]李士超,张金友,公繁浩,等.松辽盆地北部上白垩统青山口组泥岩特征及页岩油有利区优选[J].*地质通报*,2017,36(4):654-663.
- Li S C, Zhang J Y, Gong F H, et al. The characteristics of mudstones of Upper Cretaceous Qingshankou Formation and favorable area optimization of shale oil in the north of Songliao Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017,36(4):654-663.
- [10]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 C N, Yang Z, Cui J W, 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.
- [11]赵文智,胡素云,侯连华,等.中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J].*石油勘探与开发*,2020,47(1):1-10.
- Zhao W Z, Hu S Y, Hou L H, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020,47(1):1-10.
- [12]支东明,唐勇,杨智峰,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J].*石油与天然气地质*,2019,40(3):524-534.
- Zhi D M, Tang Y, Yang Z F, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusaer sag, Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019,40(3):524-534.
- [13]赵文智,胡素云,侯连华.页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J].*石油勘探与开发*,2018,45(4):537-545.
- Zhao W Z, Hu S Y, Hou L H, et al. Connotation and strategic role of in-situ conversion processing of shale oil underground in the onshore China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018,45(4):537-545.
- [14]付金华,牛小兵,谈卫东,等.鄂尔多斯盆地中生界延长组7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J].*中国石油勘探*,2019,24(5):601-614.
- Fu J H, Niu X B, Tan W D, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(5):601-614.
- [15]王玉华,梁江平,张金友,等.松辽盆地古龙页岩油资源潜力及勘探方向[J].*大庆石油地质与开发*,2020,39(3):20-34.
- Wang Y H, Liang J P, Zhang J Y, et al. Resource potential and exploration direction of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020,39(3):20-34.
- [16]杨建国,李士超,姚玉来,等.松辽盆地北部陆相页岩油调查取得重大突破[J].*地质与资源*,2020,29(3):300-300.
- Yang J G, Li S C, Yao Y L, et al. Significant breakthrough in the continental shale oil survey in northern Songliao Basin[J]. *Geology and Resources*, 2020,29(3):300-300.
- [17]杨华,牛小兵,徐黎明,等.鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油勘探潜力[J].*石油勘探与开发*,2016,43(4):511-520.
- Yang H, Niu X B, Xu L M, et al. Exploration potential of shale oil in Chang7 Member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016,43(4):511-520.
- [18]高岗,刘显阳,王银会,等.鄂尔多斯盆地陇东地区长7段页岩油特征与资源潜力[J].*地学前缘*,2013,20(2):140-146.
- Gao G, Liu X Y, Wang Y H, et al. Characteristics and resource potential of the oil shale of Chang7 Layer in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013,20(2):140-146.
- [19]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 H, Li S X, Liu X Y, et al. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2013,34(1):1-11.
- [20]赵贤正,周立宏,赵敏,等.陆相页岩油工业化开发突破与实践——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J].*中国石油勘探*,2019,24(5):589-600.
- Zhao X Z, Zhou L H, Zhao M, et al. Breakthrough and practice of industrial development on continental shale oil: A case study on Kong-2 Member in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(5):589-600.
- [21]邱振,卢斌,施振生,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油滞留聚集机理及资源潜力探讨[J].*天然气地球科学*,2016,27(10):1817-1827,1847.
- Qiu Z, Lu B, Shi Z S, et al. Residual accumulation and resource assessment of shale oil from the Permian Lucaogou Formation in Jimusaer Sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016,27(10):1817-1827,1847.
- [22]付广,王有功.三肇凹陷青山口组源岩生成油向下“倒灌”运移层位及其研究意义[J].*沉积学报*,2008,26(2):355-360.
- Fu G, Wang Y G. Migration horizons downward of oil from K₁qn source rock of F₁ Y Oil Layer in Sanzhao depression and its significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008,26(2):355-360.
- [23]舒树良,慕玉福,王伯长.松辽盆地含油气地层及其构造特征[J].*地层学杂志*,2003,27(4):340-347.
- Shu Y L, Mu Y F, Wang B C. The oil-gas-bearing strata and structural features in the Songliao Basin, NE China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2003,27(4):340-347.
- [24]张静平,唐书恒,吕建伟,等.松辽盆地青山口组一段油页岩成矿条件及有利目标区分析[J].*地学前缘*,2012,19(1):156-162.

(下转第295页/Continued on Page 295)

- Lower Cretaceous source rocks and shale gas exploration potential of eastern basin group, NE China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37 (6): 893–902.
- [23] 韩春花. 勃利盆地中生界地质特征及油气资源潜力分析[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- Han C H. Analysis of Mesozoic geological characteristics and hydrocarbon resource potential of Boli Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [24] 吴河勇, 李子顺, 王世辉, 等. 大庆外围盆地优选区油气资源战略评价及突破研究[R]. 中国石油大庆油田有限责任公司, 2008.
- Wu H Y, Li Z S, Wang S H, et al. Strategic evaluation and breakthrough of oil and gas resources in Daqing peripheral basins [R]. Daqing Oilfield Co., Ltd., PetroChina, 2008. (in Chinese)
- [25] 刘维亮, 夏斌, 蔡周荣, 等. 鸡西盆地下白垩统天然气地质条件[J]. *天然气工业*, 2010, 30(2): 40–44.
- Liu W L, Xia B, Cai Z R, et al. Natural gas geologic conditions in the Early Cretaceous Jixi Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30 (2): 40–44.
- [26] 张渝金. 虎林盆地七虎林河坳陷油气地质条件分析[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- Zhang Y J. Analysis of petroleum geological conditions in the Qihulin River Depression of Hulin Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [27] 韩欣澎, 郝国丽, 刘超, 等. 通化盆地石油地质特征及油气资源潜力[J]. *世界地质*, 2013, 32(2): 337–343.
- Han X P, Hao G L, Liu C, et al. Petroleum geologic features and petroleum resources potential in Tonghua Basin [J]. *Global Geology*, 2013, 32(2): 337–343.
- [28] 林长城, 郝国丽, 陈桂标, 等. 敦-密断裂带吉林段断陷盆地石油地质条件及勘探方向[J]. *世界地质*, 2013, 32(2): 317–324.
- Lin C C, Hao G L, Chen J B, et al. Petroleum geology and exploration orientation in faulted basins along the Duahua-Mishan fault in Jilin Province[J]. *Global Geology*, 2013, 32(2): 317–324.
- [29] 张吉光, 金成志, 金银姬. 延吉残留断陷盆地油气地质特点及勘探潜力[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Zhang J G, Jin C Z, Jin Y J, et al. Petroleum geological characteristics and exploration potential of Yanji residual faulted basin[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [30] 黄飞, 辛茂安. 中华人民共和国石油天然气行业标准并陆相烃源岩地球化学评价方法(SY/T5735—1995)[S]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- Huang F, Xin M A. Geochemical method for continental source rock evaluation(SY/T5735—1995)[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [31] 程克明, 王铁冠, 钟宇宁, 等. 烃源岩地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- Cheng K M, Wang T G, Zhong N N, et al. Geochemistry of Hydrocarbon Source Rocks. Beijing: Science Press, 1995.
- [32] 王钧, 黄尚瑶, 黄歌山, 等. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- Wang J, Huang S Y, Huang G S, et al. Basic characteristics of the earth's temperature distribution in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1990.

(上接第 324 页/Continued from Page 324)

- Zhang J P, Tang S H, Lü J W, et al. Analyses of forming condition and favorable area of oil shale in the 1st member of Qingshankou Formation, Songliao Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 156–162.
- [25] 辛仁臣, 蔡希源, 王英民. 松辽坳陷深水湖盆层序界面特征及低位域沉积模式[J]. *沉积学报*, 2004, 22(3): 387–392.
- Xin R C, Cai X Y, Wang Y M. Depositional model of low stand and characteristics of sequence boundary in deep-water lake, Songliao depression basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(3): 387–392.
- [26] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质页岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 828–838.
- Liu B, Shi J X, Fu X F, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in First Member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 828–838.
- [27] 柳波, 孙嘉慧, 张永清, 等. 松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段页岩油储集空间类型与富集模式[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48 (3): 521–535.
- Liu B, Sun J H, Zhang Y Q, et al. Reservoir space and enrichment model of shale oil in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling sag, southern Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 521–535.
- [28] 王飞宇, 冯伟平, 关晶, 等. 湖相致密油资源地球化学评价技术和应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(2): 388–397.
- Wang F Y, Feng W P, Guan J, et al. Geochemical assessment of lacustrine tight oil and application [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(2): 388–397.
- [29] Allix P, Burnham A, Fowler T, et al. Coaxing oil from shale [J]. *Oilfield Review*, 2010, 22(4): 4–15.