

松辽盆地白垩系青山口组页岩层系非均质地质特征与页岩油甜点评价

白斌^{1,2},戴朝成³,侯秀林¹,杨亮⁴,王瑞^{2,5},王岚¹,孟思炜^{1,2},董若婧¹,刘羽汐¹

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083;2. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室,黑龙江大庆 163453;
3. 东华理工大学地球科学学院,江西南昌 330000;4. 中国石油吉林油田公司勘探开发研究院,吉林松原 138099;
5. 中国石油大庆油田公司,黑龙江大庆 163453)

摘要:松辽盆地白垩系青山口组湖相沉积发育规模富有机质页岩,古页岩油1井实现了深湖区古龙页岩油勘探突破。为进一步精细评价湖盆不同相带页岩层系地质特征,明确陆相湖盆页岩油甜点特征,按青山口组页岩形成环境差异,开展湖盆不同相带页岩层系地质特征非均质性研究。淡水湖盆不同相带页岩层系存在富有机质(总有机碳含量 $TOC>3\%$)纹层状黏土(质)页岩、纹层状黏土(质)页岩、长英(质)页岩、纹层状介壳页岩、块状泥岩、灰岩和白云岩7种类型,分别评价生烃与滞留烃总量差异及烃类流动性、储集性、可压性和产油能力差异,据此提出页岩油资源甜点与工程甜点。根据 TOC 和 S_1 (热解烃含量)将青山口组页岩资源甜点划分为Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ类,其中Ⅰ类资源甜点 TOC 大于 3.0% , S_1 大于 4.0 mg/g ;Ⅱ类资源甜点 TOC 在 $1.5\%\sim 3.0\%$, S_1 在 $1.0\sim 4.0\text{ mg/g}$;Ⅲ类资源甜点 TOC 小于 1.5% , S_1 小于 1.0 mg/g 。半深湖-深湖相页岩多为Ⅰ类和Ⅱ类资源甜点,滨浅湖相页岩则以Ⅱ类和Ⅲ类资源甜点为主。通过不同相带岩相含油性、渗流性、可压性、源岩特性和物性等因素分析,优选松辽盆地青山口组页岩油主力靶体。

关键词:资源甜点;工程甜点;富有机质页岩;古龙页岩油;青山口组;陆相湖盆;松辽盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Geological heterogeneity of shale sequence and evaluation of shale oil sweet spots in the Qingshankou Formation, Songliao Basin

BAI Bin^{1,2}, DAI Chaocheng³, HOU Xiulin¹, YANG Liang⁴, WANG Rui^{2,5}, WANG Lan¹, Meng Siwei^{1,2},
DONG Ruojing¹, LIU Yuxi¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. National Key Laboratory of Continental Shale Oil, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163453, China; 3. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330000, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, Jilin Oilfield Company, CNPC, Songyuan, Jilin 138099, China; 5. Daqing Oilfield Co. Ltd., PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163453, China)

Abstract: The lacustrine sediment of the Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao Basin is rich in organic shale, and the well Guye 1 has achieved a breakthrough in oil exploration of Gulong shale of deep lake facies. To further evaluate the geological characteristics of the shale sequence in different facies zones of the lacustrine basin and evaluate the characteristics of shale oil sweet spots in the continental lacustrine basin, we study the geological heterogeneity of shale sequences in different facies zones of the lacustrine basin regarding the environmental difference for lacustrine shale formation in the Qingshankou Formation. It is suggested that the shale sequences deposited in the freshwater lacustrine basin can be divided into seven types according to lithofacies, namely the organic-rich lamellar clayey shale ($TOC>3\%$), lamellar clayey shale, felsic shale, lamellar shell shale, massive mudstone, limestone and dolomite respectively, which are evaluated in terms of total hydrocarbon generated and retained, hydrocarbon mobility, reservoir property, compressibility and oil production capacity. The geological and engineering sweet spots of shale oil are thereby proposed. Based on the contents of TOC and S_1 (pyrolysis hydrocarbon content), we group the geological sweet spots of

收稿日期:2023-03-16;修回日期:2023-06-28。

第一作者简介:白斌(1981—),男,博士、高级工程师,致密油/页岩油形成条件与甜点评价。E-mail: baibin81@petrochina.com.cn。

基金项目:黑龙江省揭榜挂帅项目(RIPED-2022-JS-1740);中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术项目(2021-DJ2203)。

the Qingshankou Formation shale into Type I, II, and III. The Type I sweet spot is generally characterized by *TOC* content greater than 3 % and S_1 greater than 4 mg/g; the Type II by *TOC* content ranging between 1.5 % and 3 %, and S_1 between 1.0 and 4 mg/g; the Type III by *TOC* content less than 1.5 % and S_1 less than 1.0 mg/g. The semi-deep lacustrine and deep lacustrine facies are dominated by sweet spots of Type I and II, while the shales of shallow lacustrine facies by sweet spots of Type II and III. The Qingshankou Formation shale in Songliao Basin is selected as the major oil pay zone after a comprehensive analysis of the oil-bearing property, percolation coefficient, compressibility, characteristics of source rocks and physical properties of different facies zones.

Key words: geological sweet spot, engineering sweet spot, organic-rich shale, Gulong shale oil, Qingshankou Formation, continental lacustrine basin, Songliao Basin

引用格式:白斌,戴朝成,侯秀林,等. 松辽盆地白垩系青山口组页岩层系非均质地质特征与页岩油甜点评价[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 846–856. DOI: 10. 11743/ogg20230404.

BAI Bin, DAI Chaoheng, HOU Xiulin, et al. Geological heterogeneity of shale sequence and evaluation of shale oil sweet spots in the Qingshankou Formation, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 846–856. DOI: 10. 11743/ogg20230404.

页岩油作为重要的油气接替资源,已在北美 Williston 盆地 Bakken 组、Western Gulf 盆地 Eagle Ford 组等页岩中实现规模效益开发,助推美国能源独立^[1–3]。截至2022年底,中国鄂尔多斯、准噶尔与渤海湾等盆地积极开展页岩油勘探开发,主要围绕页岩层系内粉砂岩、碳酸盐岩、混积岩等非主力生烃源岩,探明地质储量 14.07×10^8 t,年产量超 300×10^4 t,展现出良好的勘探开发潜力^[4–8]。特别是在松辽盆地白垩系青山口组古龙深湖相纯页岩钻探 GYYP1 井初试日产油最高 30.5 t、日产气 $13\,032\text{ m}^3$,取得历史性战略突破,目前见油后已生产 855 d,累产油气当量 $1.37 \times 10^4\text{ t}^{[9]}$,不仅预示陆相湖盆生烃页岩具备形成工业油气的基础,也表明陆相湖盆页岩将成为未来页岩油勘探开发重要类型。

然而,陆相湖盆页岩受水动力、成岩作用和成藏过程中流体性质等因素影响,湖盆不同相带页岩矿物成分、岩相、生烃能力及储集性能等富集地质条件差异明显^[10–11],直接决定页岩油富烃甜点段/区与最佳改造效果的工程甜点段/区存在差异^[12–17]。因此,亟需开展基于陆相湖盆不同相带页岩地质特征非均质性研究,分类评价页岩滞留烃、赋存状态和改造潜力,查明湖盆不同相带页岩油甜点特征,为实现页岩油地质–工程一体化效益开发奠定基础^[18–20]。

1 松辽盆地青山口组沉积环境

松辽盆地位于中国东北地区,是白垩纪亚洲古陆上最大的湖盆,面积约 $26 \times 10^4\text{ km}^2$,为典型的陆相断陷–拗陷叠合盆地(图1)^[21],具有先断后拗的双层结构。其中,松辽盆地中央拗陷区是盆地发展过程中沉

降占优势的大型负向构造单元,包括齐家–古龙凹陷、大庆长垣和三肇凹陷等二级构造单元^[22–24],长期为盆地沉降和沉积中心,是黑色页岩乃至页岩油的主要分布范围,富有机质页岩层系厚度为 90 ~ 270 m,面积在 $3 \times 10^4\text{ km}^2$ 以上,有机质丰度高,成熟度适中,且地层超压,利于页岩油的形成与富集。

松辽盆地白垩系青山口组和嫩江组沉积期发育两期最大的湖泛,广泛发育厚层富有机质暗色泥页岩。其中,青山口组泥页岩有机质丰度更高,在中央拗陷区基本进入成熟–高成熟演化阶段,是中、浅部含油气组合的主力供烃岩系及页岩油赋存层系^[22],岩性以厚层页岩夹薄层粉砂岩、白云岩及介壳灰岩为特征,反映了半深湖–深湖的沉积环境。

2 湖盆不同相带页岩地质非均质性

陆相湖盆不同相带页岩矿物成分、沉积构造、有机质丰度、岩相组合等均具极强非均质性^[25]。页岩纹层厚度存在极薄纹层(<3 mm)、薄纹层(3 mm ~ 1 cm)、中纹层(1 ~ 3 cm)到厚纹层(3 ~ 10 cm)^[26–27],成分呈现长英质纹层、黏土纹层和碳酸盐矿物纹层多种类型^[28]。因此,本文立足盆地不同部位钻井岩心资料,识别青山口组滨浅湖、半深湖与深湖相页岩特征,依据矿物组成、纹层厚度和沉积构造,将湖相页岩层系划分为纹层状黏土(质)页岩(LS)、长英(质)页岩(SLS)、纹层状介壳页岩(CLS)、块状泥岩(LM)、灰岩(LS)和白云岩(DS)6种岩相。纹层状黏土(质)页岩有机碳丰度变化大,以总有机碳含量(*TOC*)3 %为界,再分出富有机质纹层状黏土(质)页岩(HLS)和纹层状黏土(质)页岩(MLS)(表1;图2)。

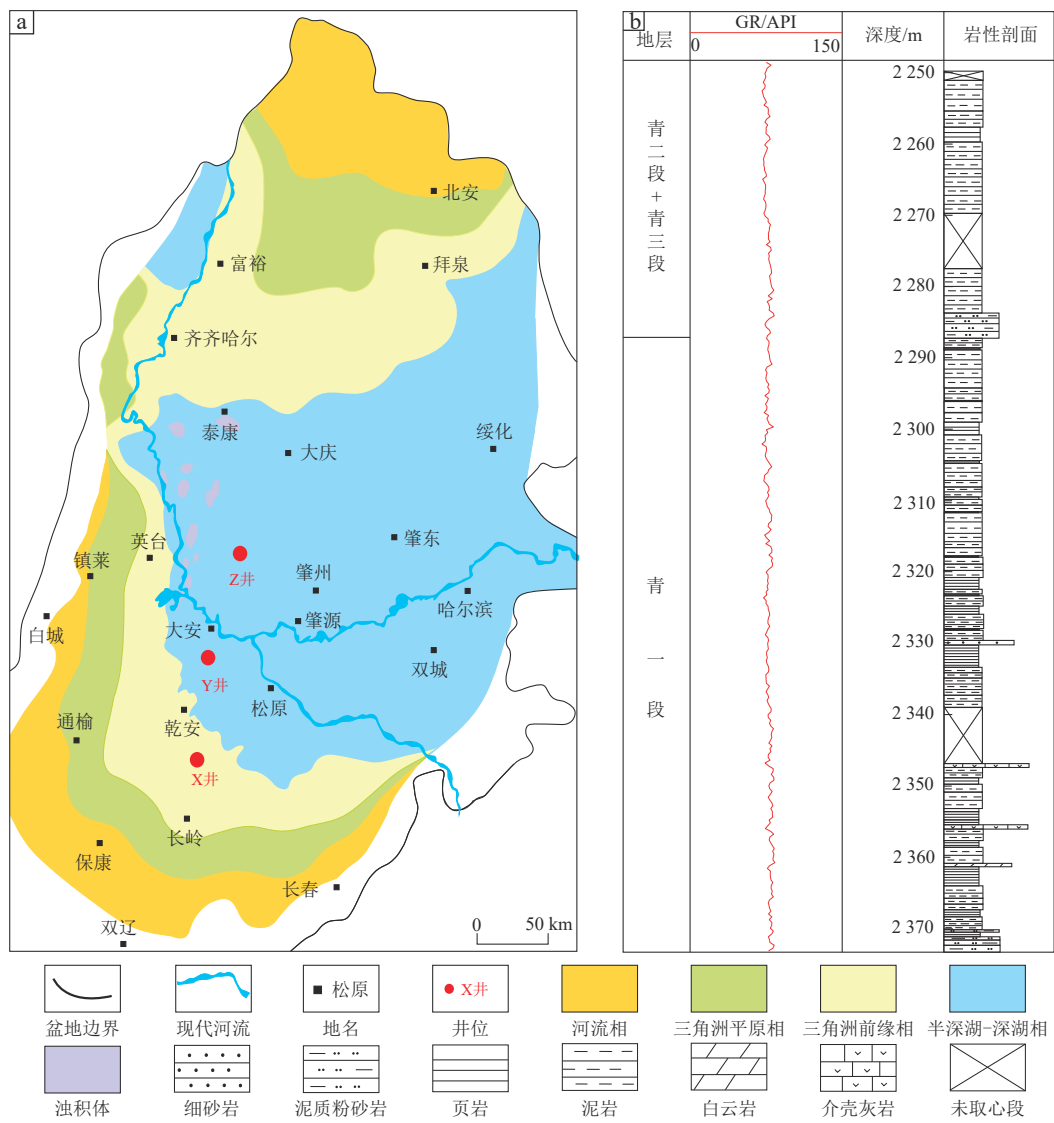


图1 松辽盆地青山口组沉积相(a)及典型地层柱状图(b)^[21]

Fig. 1 Sedimentary facies (a) and typical stratigraphic column (b) of the Qingshankou Formation, Songliao Basin^[21]

表1 松辽盆地青山口组湖相页岩层系岩相类型分类

Table 1 Lithofacies type classification of lacustrine shale in Qingshankou Formation, Songliao Basin

岩相类型	富有机质纹层状黏土(质)页岩(HLS)	纹层状黏土(质)页岩(MLS)	长英质页岩(SLS)	纹层状介壳页岩(CLS)	块状泥岩(LM)	介壳灰岩(LS)	白云岩(DS)
沉积环境	深湖	半深湖-深湖	滨浅湖-半深湖	滨浅湖-半深湖	深湖	滨浅湖-深湖	半深湖-深湖
沉积过程	悬浮沉积	悬浮沉积	悬浮+碎屑流	悬浮+碎屑流	悬浮沉积	生物堆积	微生物
沉积构造	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级	—	—	—
黏土矿物含量/%	25.10 ~ 79.05	21.42 ~ 87.35	4.96 ~ 48.32	30.16 ~ 61.23	31.54 ~ 81.16	2.17 ~ 26.30	0 ~ 18.00
长英质含量/%	16.34 ~ 59.28	9.92 ~ 54.87	39.00 ~ 77.18	11.35 ~ 48.84	4.00 ~ 40.61	0 ~ 10.42	0 ~ 11.38
生物化石含量/%	10.00 ~ 3.12	0 ~ 5.27	0 ~ 2.10	1.24 ~ 13.35	0 ~ 2.37	80.92 ~ 95.50	0.18 ~ 2.99
TOC/%	3.02 ~ 7.17	0.23 ~ 2.80	0.17 ~ 4.60	0.26 ~ 2.21	0.46 ~ 2.98	0.53 ~ 1.02	0.18 ~ 0.73

注：“—”为无数据。

2.1 岩性和岩相非均质性特征

松辽盆地青山口组沉积期的滨浅湖相沉积水动力相对较强,沉积构造发育水平层理、砂纹交错层理和液

化砂岩脉等,总体反映出水体较为动荡特征,页岩具高长英质、低黏土矿物含量特点,石英含量为15.40%~50.00%,平均为29.60%,长石含量为7.50%~28.80%,平均为13.70%,黏土矿物含量为8.80%~

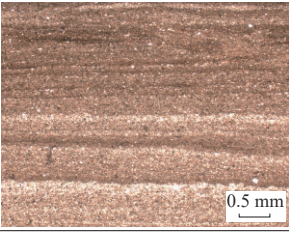
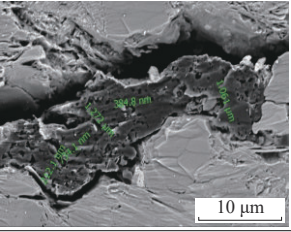
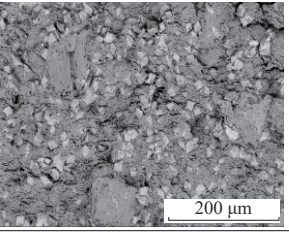
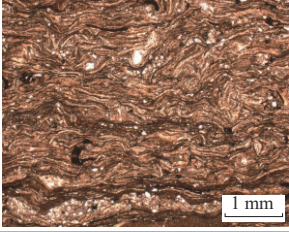
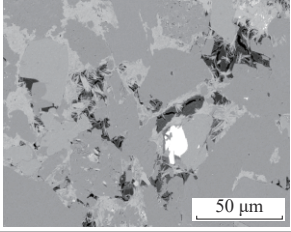
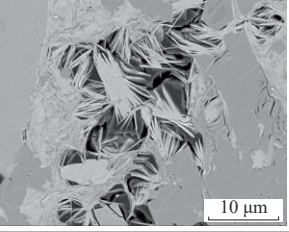
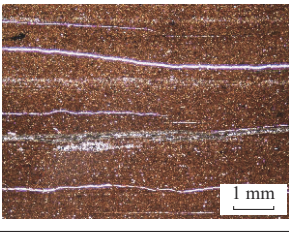
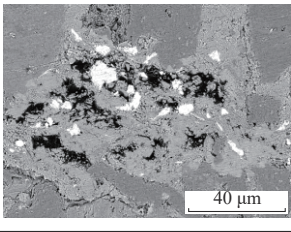
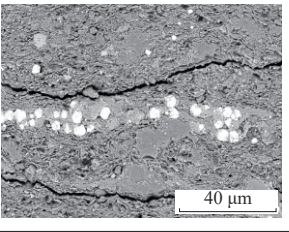
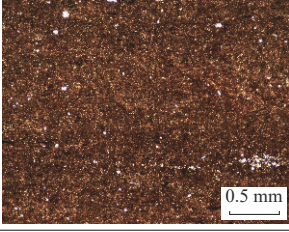
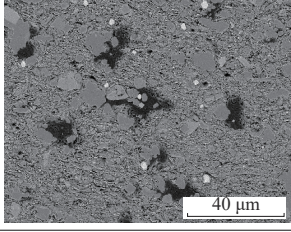
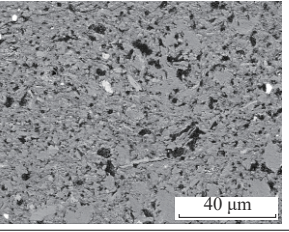
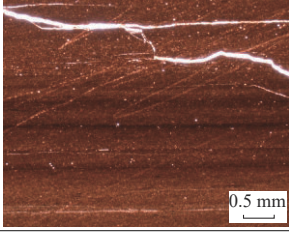
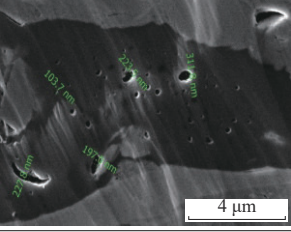
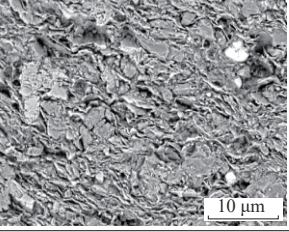
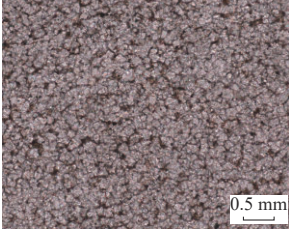
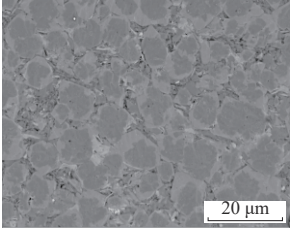
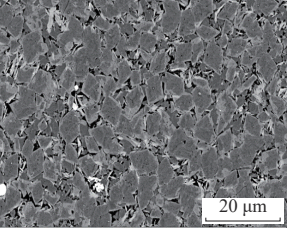
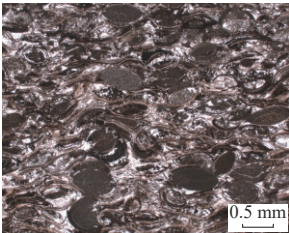
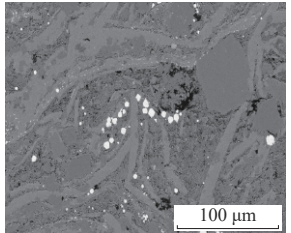
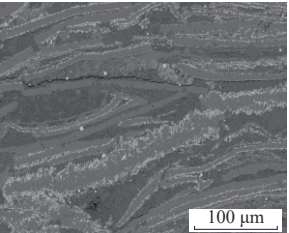
岩相	构造特征(单偏光)	有机质特征(扫描电镜照片)	孔隙特征(扫描电镜照片)	特征描述
长英质页岩				长英质页岩主要发育粒间孔、粒内孔和晶间孔及有机质孔, 孔隙度为2%~10%
纹层状介壳页岩				纹层状介壳页岩有机质含量中等, 孔隙小、数量少, 微裂缝不发育
纹层状黏土页岩				矿物成分以黏土矿物为主, 孔隙以粒间孔、溶蚀孔、粒内孔和晶间孔为主, 微裂缝发育
块状泥岩				页岩不发育, 均质性较好, 粉砂及介壳的纹层少, 有机质均匀分布, 孔隙以黏土矿物晶间孔和有机质孔为主
富有机质纹层状黏土页岩				以有机质孔、黏土矿物晶间孔、长石粒内溶孔为主, 孔径偏小
白云岩				矿物成分主要为白云石, 含量在90%以上, 孔隙主要为白云石晶间孔
介壳灰岩				介壳结构完整, 自生硅质发育, 孔隙以溶蚀孔和生物体腔孔为主

图2 松辽盆地青山口组页岩层系岩相地质特征

Fig. 2 Lithofacies geological features of the Qingshankou Formation shale sequence, Songliao Basin

69.10%,平均为51.10%。岩性发育有泥页岩、粉砂岩与钙质泥岩等。岩相以长英质页岩、纹层状介壳页岩、纹层状黏土页岩和介壳灰岩为主,长英质页岩有机质含量大多小于3.0%,以粉砂质页岩为主,夹浅灰色或灰白色的粉砂岩,脉状和软沉积变形构造发育,在薄片下该纹层在单偏光下颜色较浅,呈粉砂级-泥质粉砂碎屑结构,可见少量分散状分布的有机质,颗粒整体上分选中等-好,磨圆度呈次棱角状,单个纹层厚度在0.4~1.5 mm。黏土矿物含量平均为33.67%,石英和长石含量平均为51.55%,以石英颗粒为主,TOC介于1.00%~3.00%,平均为1.45%,该岩相一般分布层位为青(青山口组)一段上部、青二段和青三段;纹层状介壳页岩具混合沉积特征,表现为纹层状页岩夹薄层介壳生物层和粉砂质,纹层状页岩和介壳生物层界限明显,该岩相中介壳生物和介壳灰岩层生物相比,生物呈碎片状定向排列,基本没有完整生物个体,粉砂级石英颗粒与生物碎片混杂在一起,而介壳灰岩层生物个体完整,石英则以成岩自生硅质为主,纹层状介壳页岩以介形虫化石富集成层,TOC平均为1.60%。该岩相

分布层位主要为青二段和青三段。

半深湖相沉积水动力相对较弱,沉积构造以水平层理和块状层理为主,软沉积变形与滨浅湖相相比基本不发育,页岩中石英含量为2.30%~21.80%,平均为7.60%,长石含量为1.60%~13.20%,平均为3.80%,黏土矿物含量为55.30%~79.40%,平均为69.50%。岩性为泥页岩和粉砂质泥岩及含介壳泥页岩等。岩相以纹层状黏土(质)页岩和块状泥岩为主(图3),局部层位发育块状泥岩和富有机质纹层状黏土(质)页岩。纹层状黏土(质)页岩有机质含量略低,普遍低于3.0%,呈灰色或深灰色,有机质纹层厚度小于1 mm,层中生物扰动和生物钻孔发育,该岩相主要形成于季节性悬浮和底流作用交替沉积的静水环境,纵向上分布于页岩层系中部。块状泥岩为纯黑色,质地细腻,油脂感较明显,坚韧不易破碎,较致密,页理不发育,均质性较好,粉砂及介壳的纹层少。镜下观察岩石粒级非常小,矿物成分以黏土矿物为主,有机质含量变化大,主要形成于半深湖的静水环境。该岩相在纵向上主要分布于青一段和青二段。

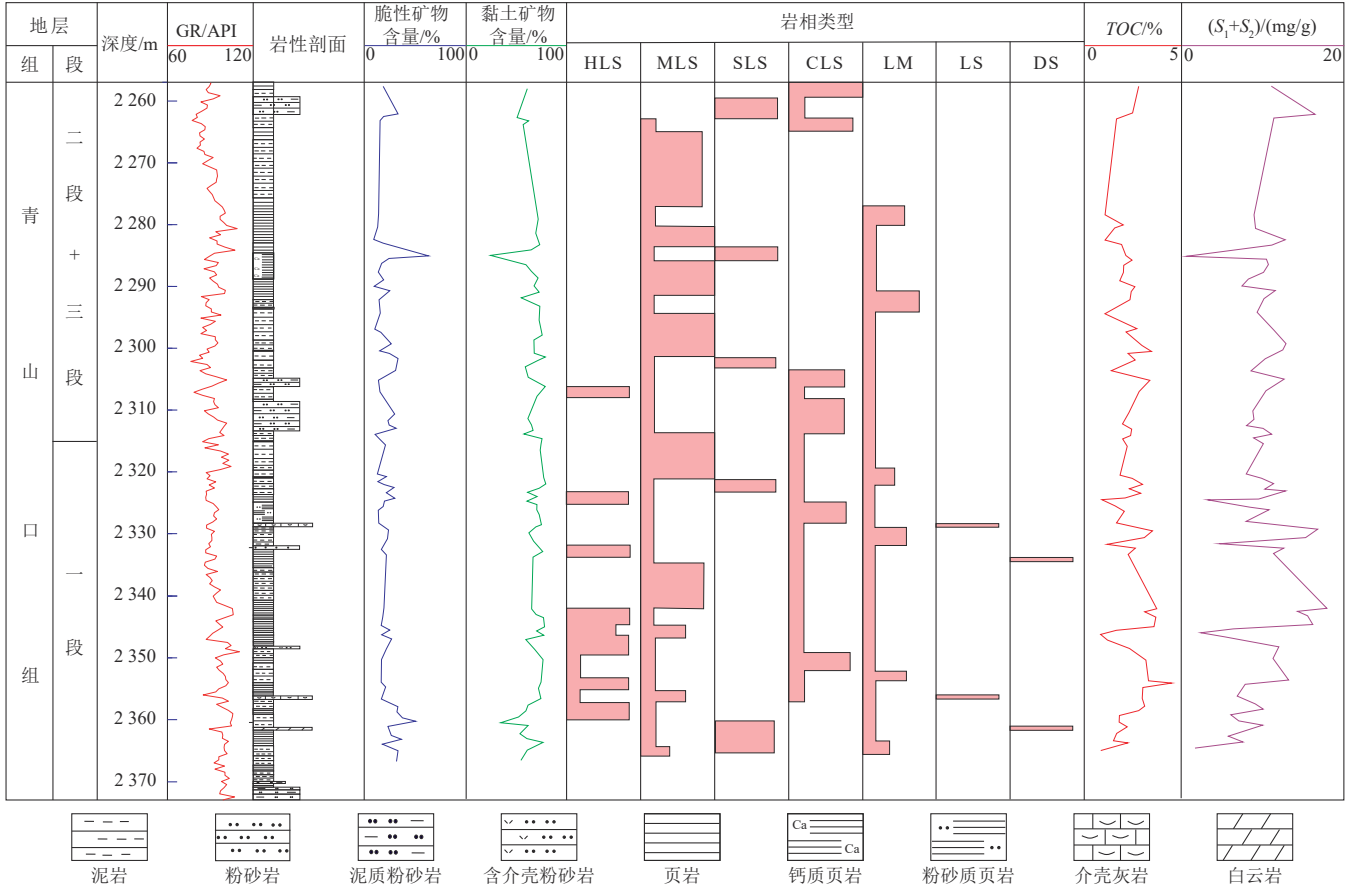


图3 松辽盆地青山口组沉积期半深湖相岩性及岩相综合柱状图

Fig. 3 Composite column of lithology and lithofacies of semi-deep lacustrine facies during the deposition of the Qingshankou Formation, Songliao Basin

深湖相沉积期水体安静,沉积速率低,沉积构造以水平层理和块状层理为主,岩性与滨浅湖和半深湖相岩性存在差别。深湖相除富有机质纹层状黏土(质)页岩和块状泥岩外,还发育大量薄层状粉晶白云岩和介壳灰岩(图4)。同时,在页岩成熟度偏高(镜质体反射率 $R_o=1.67\%$)的古龙凹陷,发育规模富有机质长英(质)页岩, TOC 可达 4.6% 。其中,富有机质纹层状黏土(质)页岩颜色为灰黑-黑色,岩心页理发育,纹层厚度小于 1 mm ,胶磷矿和草莓状黄铁矿常见,黏土矿物含量介于 $25.10\%\sim 79.05\%$,石英和长石总含量为 $16.34\%\sim 59.28\%$, TOC 多大于 3.0% ,该岩相在纵向上主要分布于青一段。白云岩相颜色为灰黑色,质地坚硬细腻,有半透明感,外形为透镜状和夹层状,白云岩由浅色纹层和暗色纹层(富含有机质)构成,浅色和暗色纹层均呈穹形。矿物成分主要为铁白云石,含量在 90% 以上,白云石为半自形-自形粉晶结构,晶粒大小在 $0.01\sim 0.03\text{ mm}$,晶体间呈直线状紧密接触,部分白云石具环带。该类岩相主要分布在青一段中、上部和青二段下

部。介壳灰岩则颜色变化较大,有黑色、灰黑色、灰-深灰色以及灰白色,隐晶质结构,介壳结构明显,介形虫软体和介壳经过长期的碳酸盐胶结形成生物介壳灰岩。

2.2 有机地球化学非均质性特征

松辽盆地青山口组沉积期滨浅湖相页岩 TOC 为 $0.12\sim 3.14\%$,平均为 1.17% ,生烃潜量(S_1+S_2)介于 $0.14\sim 15.99\text{ mg/g}$,平均为 4.52 mg/g ,氯仿沥青“A”含量介于 $0.014\%\sim 0.303\%$,平均为 0.116% ,整体为中等-好烃源岩。氢指数(HI)与最高热解峰温(T_{max})关系显示,滨浅湖相页岩有机质类型以 II_A 型和 II_B 型为主, T_{max} 主要介于 $412\sim 446\text{ }^{\circ}\text{C}$,油源岩处于低成熟-成熟阶段。

半深湖相页岩 TOC 为 $0.26\sim 5.00\%$,平均为 1.92% , S_1+S_2 介于 $0.34\sim 18.34\text{ mg/g}$,平均为 9.06 mg/g ,整体为中等-好烃源岩。页岩地球化学品质介于滨浅湖相和深湖相页岩之间。 $HI-T_{max}$ 关系显示,半深湖相页岩有机质类型以 II_A 型和 II_B 型为主,少数样品为 I 型干酪根, T_{max} 主要介于 $400\sim 470\text{ }^{\circ}\text{C}$,油源岩处于中

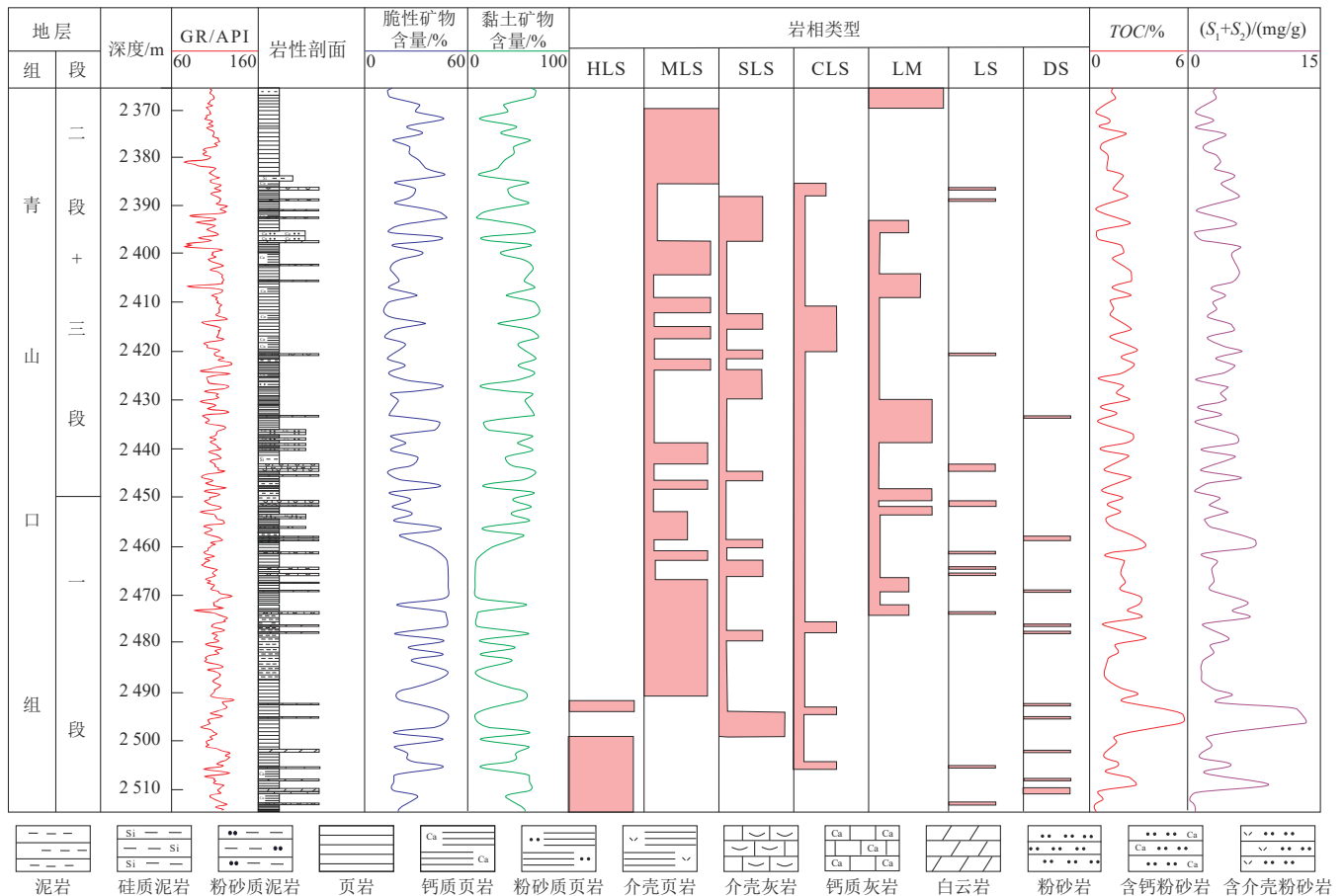


图4 松辽盆地青山口组沉积期深湖相岩性及岩相综合柱状图(据文献[21]修改)

Fig. 4 Composite column of lithology and lithofacies of deep lacustrine facies during the deposition of the Qingshankou Formation, Songliao Basin (modified after reference [21])

低成熟-成熟阶段。

深湖相页岩 TOC 为 $0.17\% \sim 5.21\%$, 平均为 2.95% , S_1+S_2 介于 $0.09 \sim 32.81 \text{ mg/g}$, 平均为 12.17 mg/g , 与滨浅湖相和半深湖相相比, 深湖相 TOC 和 S_1+S_2 为湖相页岩中数值最高的。 $HI-T_{\max}$ 关系显示, 青山口组深湖相页岩有机质类型以 II_A 型和 II_B 型为主, 部分为 I 型干酪根, $T_{\max}$ 主要介于 $394 \sim 482^\circ\text{C}$, 油源岩处于成熟阶段。

2.3 储集性能非均质性特征

松辽盆地青山口组沉积期滨浅湖相页岩储集空间为基质孔和裂缝两大类, 基质孔可细分为粒间孔、粒内孔、晶间孔和有机质孔。滨浅湖相纹层状黏土(质)页岩和长英质黏土(质)页岩微裂缝相对发育, 微裂缝直径一般大于 $3.0 \mu\text{m}$, 其次为黏土矿物层间孔, 孔径多小于 100 nm , 溶蚀孔孔径在 $300 \text{ nm} \sim 3.0 \mu\text{m}$, 有机孔和晶间孔孔径在 $80 \text{ nm} \sim 2.0 \mu\text{m}$, 基质孔约占总储集空间的 10.7% 。纹层状黏土(质)页岩和长英质黏土(质)页岩孔隙度为 $3.0\% \sim 8.1\%$, 最大可到 12.0% 。长英质页岩相对致密, 孔径大但数量少, 孔隙体积小, 孔隙度为 $2.5\% \sim 6.8\%$ 。纹层状介壳页岩孔隙小、数量少, 孔隙体积小, 微裂缝不发育, 储集性能较差。

半深湖相页岩孔隙类型多样, 纹层状黏土(质)页岩以粒间孔、溶蚀孔、粒内孔和微裂缝为主, 粒间溶蚀孔孔径为 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$, 孔隙度介于 $5.2\% \sim 10.5\%$ 。而富有机质纹层状黏土(质)页岩则以有机质孔、黏土矿物晶间孔、长石粒内溶孔为主, 孔隙度为 $6.0\% \sim 10.6\%$, 孔径偏小, 有机质内部呈海绵状孔隙, 有机质团块内分布零星气泡状孔隙。长英(质)页岩有机质丰度不高, TOC 多小于 2.5% , 孔隙度为 $2.3\% \sim 8.5\%$, 主要以粒间孔、粒内孔和晶间孔为主, 占总储集空间的 80% 。

深湖相页岩孔隙类型以黏土矿物层间孔、有机质孔、晶间孔、长石溶孔和介壳体腔孔为主, 存在页理缝、微裂缝, 滞留烃呈分散状赋存于黏土矿物-有机质复合孔、页理-层间缝、黄铁矿晶间孔等。深湖区页岩储层孔隙类型、孔缝直径等受热演化程度影响明显。 R_o 为 $1.0 \sim 1.4\%$ 的深湖相 139 个页岩核磁共振测试表明, 孔隙度介于 $1.1\% \sim 8.8\%$ 。同时, 随着页岩有机质成熟度增高, 页岩总孔隙度也可超 10.0% , 有效孔隙度可达 8.3% , 黏土矿物晶间孔、有机质孔以及页理缝构成储集空间主体。

3 页岩油甜点基本特征

页岩油“甜点”评价的基本原则是以寻找源岩品质

佳、储层品质好、裂缝相对发育、储层脆性好、水平应力差小及盖层条件好的区域, 特别是陆相页岩油甜点更是重点优选含油性、渗流性、可压性、源岩特性和物性等因素的最优匹配^[29]。近年来立足鄂尔多斯盆地、四川盆地、准噶尔盆地和松辽盆地、济阳坳陷、苏北盆地、南襄盆地、江汉盆地等不同类型页岩油, 提出中国陆相页岩油地质甜点评价基本标准^[29-31]。但陆相不同湖盆不同相带富有机质页岩受沉积、沉积后作用和成藏过程中流体性质的影响, 页岩油甜点评价标准、方法以及关键评价参数均存在差异。

松辽盆地青山口组淡水湖盆不同相带页岩生烃能力、滞留烃量、储集空间以及压裂改造效果等因素均存在非均质性, 导致页岩在含油性、渗流性、可压性和产油能力等方面存在差异。因此, 根据勘探开发过程中页岩油甜点评价侧重点不同, 甜点段/区可划分为资源甜点, 即从页岩层系滞留烃的富集程度评价, 优选生烃能力强、滞留烃含量高的岩相组合, 作为页岩油资源富集最为有利的地质甜点; 工程甜点, 即从页岩层系储层改造效果决定资源甜点能否实现效益开发的角度开展评价, 优选地层条件下压裂改造最为充分的岩相组合。最终结合资源甜点与工程甜点, 筛选确定开发效果最佳的主力靶层。

3.1 资源甜点

资源甜点评价的内容是滞留在页岩油内部总烃量, 一般以 TOC , S_1 (页岩内滞留烃) 和氯仿“A”含量等参数表征, 代表页岩油地质资源总量。在成熟度变化不大的页岩层系内 S_1 随 TOC 的增大往往表现为三段性特征^[30-32], 即: ①低 TOC 、低 S_1 段; ② TOC 和 S_1 线性性增大段; ③ TOC 增大但 S_1 最大值基本保持稳定段。前两者反映了随着生烃母质增加而生烃量增加的基本规律, 此时生成烃量还难以满足页岩自身吸附的需要, 故随着 TOC 增大, S_1 一般也增大, 当生烃量满足页岩自身吸附时而多余的烃排出, S_1 最大值基本反映了页岩的吸附能力, 其一般保持在稳定值范围内。

因此, 对松辽盆地青山口组不同相带典型钻井页岩系统测试表明, 整体呈现滨浅湖相页岩 TOC 和 S_1 相对最低, 深湖相页岩有机质丰度最高, 半深湖相页岩数值中等。以页岩内滞留烃 S_1 作为划分依据, 资源甜点可分为 3 类: I 类甜点 TOC 大于 3.0% , S_1 大于 4.0 mg/g ; II 类甜点 TOC 介于 $1.5\% \sim 3.0\%$, S_1 介于 $1.0 \sim 4.0 \text{ mg/g}$; III 类甜点 TOC 小于 1.5% , S_1 小于 1.0 mg/g 。其中, 半深湖-深湖相页岩多为 I 类和 II 类资源甜点, 滨浅湖相页岩则集中在 II 类和 III 类资源甜点。同一沉积环境中不同岩

相也存在较大差别,富有机质纹层状黏土(质)页岩与富有机质长英(质)页岩均为Ⅰ类资源甜点,纹层状黏土(质)页岩、纹层状介壳页岩、长英质页岩和块状泥岩多为Ⅱ类资源甜点,白云岩则为Ⅲ类资源甜点。

3.2 工程甜点

工程甜点评价是从工程角度评价页岩改造难易程度、改造后缝网复杂程度、改造后缝网支撑性、扩展性以及有效性,从岩石物理角度评价地下页岩改造有效性。脆性矿物含量越高,脆性指数越高,越容易形成裂缝,具有高杨氏模量和低泊松比,利于压裂改造^[33-34]。

松辽盆地青山口组滨浅湖相页岩在研究区湖相页岩中陆源碎屑含量最高,脆性指数平均为45.8%,半深湖相页岩脆性指数平均值为38.6%,深湖相黏土(质)页岩平均值脆性指数为31.1%。通常来说,石英是碎屑岩中重要的脆性矿物,石英含量越高,脆性指数越高,越容易形成裂缝^[24]。青山口组湖相页岩中除陆源碎屑石英外,半深湖和深湖相还发育有部分自生硅质^[21],半深湖页岩自生硅质含量范围0.2%~6.8%,深湖相页岩自生硅质含量1.2%~11%,页岩中自生石英颗粒偏小且多呈漂浮状分散于黏土矿物内部,滨浅湖相中-低TOC页岩陆源长英质呈层状。三轴试验结果表明,在围压为10.0 MPa的实验条件下,富含黏土矿物K-1样品抗压强度为104.7 MPa,富含长英质矿物K-2样品抗压强度为74.3 MPa,K-1样品虽然有机质含量高,但抗压强度大,从工程角度来看改造难度大。

孟思炜等利用矿物组成与分布表征、数字岩心建模、微观力学测试、有限元模拟等技术手段^[35],对松辽盆地青山口组不同页岩在应力作用下变形、裂纹扩展过程进行数值仿真研究表明,单轴压缩荷载条件下,岩石破坏行为以拉破裂为主,形成平行于加载方向拉伸裂纹,但受理理缝影响,也形成垂直于加载方向的压剪裂纹;矿物的组成、分布与胶结方式对裂纹的起裂点、扩展路径和断裂失效模式具有重要影响。不同岩相类型页岩中脆性矿物含量、形态与分布特征存在差异,导致力学性能与破坏机制存在显著不同,长英质页岩及纹层状介壳页岩均可在低断裂能下产生较高裂缝复杂度(图5),纹层状黏土(质)页岩起裂强度低、但裂缝延展需很高的能量,而白云岩起裂压力和裂缝扩展能耗均很高,不利于诱导裂缝扩展。

4 页岩油主力靶体优选

页岩油富集主要受控于 R_o 、TOC以及储集性等因

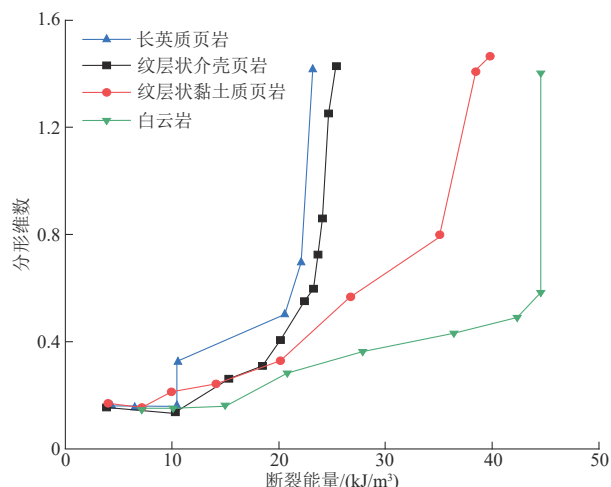


图5 不同岩相页岩破坏过程裂缝分形维数与断裂能相关关系^[35]

Fig. 5 Correlation between fracture fractal dimension and fracture energy during fracturing of shale with different lithofacies

素,在地质甜点预测的基础上,结合工程甜点评价结果,关注页岩油流动性和可压性^[30],筛选主力靶体。松辽盆地青山口组页岩主力靶体优选主要考虑含油性、渗流性、可压性、源岩品质和物性等参数,为减少人为因素影响,采用赋权重方法开展定量评价。①不同参数赋不同权重值(a_i),由于页岩中游离油含量越高,流动性及可压裂性越好,越有利于页岩油的开采,因此在参考不同盆地页岩油甜点评价指标基础上^[29-34,36-37],将 S_1 、可动油和脆性矿物作为优先考虑的参数,其次是对页岩油开采具有重要影响的源岩品质、岩相厚度和物性,其权重分别设为25%,25%,20%,10%,10%,10%;②同一参数的不同分类(v_j)赋不同分值(无量纲),按照10分制,Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ类资源甜点分值分别为10分、6分和3分。 S_1 和TOC按照资源甜点划分标准,可动油含量由核磁共振二维谱测定,按10%和20%进行分类,脆性矿物按20%和40%进行分类,岩相厚度以5 m和20 m进行分类,孔隙度以4%和6%进行分类,综合评价指数EI如公式(1)所示,EI表示页岩岩相不同权重的6个地质因素的总得分值。

$$EI = \sum a_i v_j \quad (1)$$

根据评价标准进行单项打分,然后应用公式(1)将单项得分乘以相应指标的权重以计算综合评价指数的分值(表2)。整体表明,松辽盆地青山口组不同相带长英质页岩得分最高,呈现从滨浅湖到深湖相,EI得分逐渐降低趋势,特别是深湖相富有机质长英质页岩,既为资源甜点,也是工程甜点,为最佳靶体。富有机质纹层状黏土(质)页岩EI得分中等,多为资源甜点,工

表2 松辽盆地青山口组湖相不同相带页岩岩相单项指标得分与EI总得分

Table 2 Statistics of the single index scores and total EI scores of the lithofacies in different facies zones of lacustrine facies in the Qingshankou Formation, Songliao Basin

相带	岩相	单项指标得分值						EI总得分
		$S_1/(mg/g)$	可动油含量/%	脆性矿物含量/%	TOC/%	岩相厚度/m	孔隙度/%	
滨浅湖	富有机质纹层状黏土(质)页岩	6	3	3	10	6	6	5.05
	纹层状黏土(质)页岩	6	3	6	6	6	6	5.25
	长英质页岩	3	6	10	3	10	10	6.55
	纹层状介壳页岩	3	3	10	3	3	6	4.70
	块状泥岩	6	3	3	6	10	3	4.75
半深湖	富有机质纹层状黏土(质)页岩	6	6	6	6	6	3	5.70
	纹层状黏土(质)页岩	6	6	6	6	10	3	6.10
	长英质页岩	6	6	10	6	6	3	6.50
	纹层状介壳页岩	3	3	10	6	6	3	5.00
	块状泥岩	6	3	3	6	6	3	4.35
	石灰岩	3	3	6	3	3	3	3.60
	白云岩	6	3	6	6	3	3	4.65
深湖	富有机质纹层状黏土(质)页岩	6	6	3	6	10	3	5.50
	纹层状黏土(质)页岩	6	6	3	6	10	3	5.50
	长英质页岩	6	6	6	6	10	6	6.40
	纹层状介壳页岩	6	3	3	6	3	3	4.05
	块状泥岩	6	3	3	6	6	3	4.35
	介壳灰岩	3	3	6	3	3	3	3.60
	白云岩	3	3	10	3	3	3	4.40

程改造难度大,未来如能提升压裂改造效果,则有可能成为首选靶体。介壳灰岩和白云岩EI得分最低,虽为工程甜点,非资源甜点。

5 结论

1) 松辽盆地青山口组页岩层系分为富有机质($TOC>3.0\%$)纹层状黏土(质)页岩、纹层状黏土(质)页岩、长英质页岩、纹层状介壳页岩、块状泥岩、灰岩和白云岩7种岩相。滨浅湖相以长英质页岩、纹层状介壳页岩、纹层状黏土(质)页岩和介壳灰岩为主;半深湖相以纹层状黏土(质)页岩为主,局部层位发育块状泥岩、富有机质纹层状黏土(质)页岩及白云岩;深湖相除纹层状黏土(质)页岩和块状泥岩外,还发育富有机质长英质页岩、大量薄层状粉晶白云岩和介壳灰岩。

2) 松辽盆地青山口组滨浅湖相页岩TOC和 S_1 最低,发育溶蚀孔、晶间孔和微裂缝,半深湖相页岩有机质丰度中等,以溶蚀孔、有机质孔和黏土矿物晶间孔为主,深湖相页岩有机质丰度最高,滞留烃含量最高,储集空间类型则为黏土矿物晶间孔、有机质孔、长石粒内溶孔和介壳体腔孔、页理缝等。

3) 根据TOC和 S_1 将青山口组页岩资源甜点划分为I、II和III类,半深湖-深湖相页岩多为I类和II类资源甜点,滨浅湖相页岩为II类和III类资源甜点。结合工程改造效果,不同相带长英质页岩最有利,为近期页岩型页岩油主力开发靶体。富有机质纹层状黏土(质)页岩为最佳资源甜点,但工程改造难度大,将是未来最佳靶体。

致谢:感谢黑龙江省揭榜挂帅项目“古龙页岩油相态、渗流机理及地质工程一体化增产改造研究”、“古龙页岩储层成岩动态演化过程与孔缝耦合关系研究”的资助及大庆油田院士工作站的帮助。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,陶士振,杨智,等. 中国非常规油气勘探与研究新进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(4): 312-322.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, YANG Zhi, et al. New advance in unconventional petroleum exploration and research in China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(4): 312-322.
- [2] 魏漪,冉启全,童敏,等. 致密油压裂水平井全周期产能预测模型[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 99-106.
WEI Yi, RAN Qiquan, TONG Min, et al. A full cycle productivity prediction model of fractured horizontal well in tight oil reservoirs

- [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(1): 99-106.
- [3] 李阳. 中国石化致密油藏开发面临的机遇与挑战[J]. 石油勘探技术, 2015, 43(5): 1-6.
- LI Yang. Opportunities and challenges for Sinopec to develop tight oil reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(5): 1-6.
- [4] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 116-127.
- ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, LIU Wei, et al. Lacustrine medium-high maturity shale oil in onshore China: Enrichment conditions and occurrence features[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 116-127.
- [5] 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 Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua, 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.
- [6] 付金华, 刘显阳, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段页岩油勘探发现与资源潜力[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(5): 1-11.
- FU Jinhua, LIU Xianyang, LI Shixiang, et al. Discovery and resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(5): 1-11.
- [7] 赵文智, 卞从胜, 李永新, 等. 陆相页岩油可动烃富集因素与古龙页岩油勘探潜力评价[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 455-467.
- ZHAO Wenzhi, BIAN Congsheng, LI Yongxin, et al. Enrichment factors of movable hydrocarbons in lacustrine shale oil and exploration potential of shale oil in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 455-467.
- [8] 周立宏, 何海清, 郭绪杰, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷古近系沙一下亚段中等成熟页岩油富集主控因素与勘探突破[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1073-1086.
- ZHOU Lihong, HE Haiqing, GUO Xujie, et al. Main factors controlling the medium-mature shale oil enrichment and exploration breakthrough in the Paleogene Lower E₃S¹¹ in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1073-1086.
- [9] 孙龙德, 崔宝文, 朱如凯, 等. 古龙页岩油富集因素评价与生产规律研究[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 441-454.
- SUN Longde, CUI Baowen, ZHU Rukai, et al. Shale oil enrichment evaluation and production law in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 441-454.
- [10] 赵文智, 胡素云, 朱如凯, 等. 陆相页岩油形成与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 2022: 106-177.
- ZHAO Wenzhi, HU Suyun, ZHU Rukai, et al. Formation and distribution of nonmarine shale oil in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022: 106-177.
- [11] 胡素云, 白斌, 陶士振, 等. 中国陆相中高成熟度页岩油非均质地质条件与差异富集特征[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 224-237.
- HU Suyun, BAI Bin, TAO Shizhen, et al. Heterogeneous geological conditions and differential enrichment of medium and high maturity continental shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 224-237.
- [12] 闫林, 冉启全, 高阳, 等. 陆相致密油藏差异化含油特征与控制因素[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 45-54.
- YAN Lin, RAN Qiquan, GAO Yang, et al. The differentiation oil-bearing characteristic and control factors of continental tight oil [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(6): 45-54.
- [13] 闫林, 陈福利, 王志平, 等. 我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究[J]. 石油勘探技术, 2020, 48(3): 63-69.
- YAN Lin, CHEN Fuli, WANG Zhiping, et al. Challenges and technical countermeasures for effective development of shale oil in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 63-69.
- [14] ATCHLEY S C, CRASS B T, PRINCE K C. The prediction of organic-rich reservoir facies within the Late Pennsylvanian Cline shale (also known as Wolfcamp D), Midland Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2021, 105(1): 29-52.
- [15] 刘卫彬, 徐兴友, 陈珊, 等. 松辽盆地陆相页岩油地质工程一体化高效勘查关键技术与工程示范[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 173-190.
- LIU Weibin, XU Xingyou, CHEN Shan, et al. Key technology and engineering demonstration of geology-engineering integration efficient exploration of continental shale oil in Songliao Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 173-190.
- [16] 付金华, 牛小兵, 李明瑞, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段3亚段页岩油风险勘探突破与意义[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 760-769, 787.
- FU Jinhua, NIU Xiaobing, LI Mingrui, et al. Breakthrough and significance of risk exploration in the 3rd sub-member, 7th Member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 760-769, 787.
- [17] 印森林, 谢建勇, 程乐利, 等. 陆相页岩油研究进展及开发地质面临的问题[J]. 沉积学报, 2022, 40(4): 979-995.
- YIN Senlin, XIE Jianyong, CHENG Leli, et al. Advances in continental shale oil research and problems of reservoir geology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(4): 979-995.
- [18] 刘合, 李国欣, 姚子修, 等. 页岩油勘探开发“点—线—面”方法论[J]. 石油科技论坛, 2020, 39(2): 1-5.
- LIU He, LI Guoxin, YAO Zixiu, et al. “Point-Line-Area” methodology of shale oil exploration and development [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(2): 1-5.
- [19] 刘成林, 刘新菊, 张洪军, 等. 鄂尔多斯盆地安塞地区页岩油地质—工程一体化技术实践[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1238-1248.
- LIU Chenglin, LIU Xinju, ZHANG Hongjun, et al. Application of an integrated geology-reservoir engineering approach to shale oil

- development in Ansai area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1238-1248.
- [20] 吴奇, 胡文瑞, 李岫. 地质工程一体化在复杂油气藏效益勘探开发中存在的“异化”现象及思考建议[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(2): 1-5.
- WU Qi, HU Wenrui, LI Xun. The phenomenon of “alienation” of geology-engineering integration in exploration and development of complicated oil and gas reservoirs, and related thoughts and suggestions[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(2): 1-5.
- [21] 白斌, 戴朝成, 侯秀林, 等. 陆相湖盆页岩自生硅质特征及其油气意义[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(5): 896-907.
- BAI Bin, DAI Chaocheng, HOU Xiulin, et al. Authigenic silica in continental lacustrine shale and its hydrocarbon significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(5): 896-907.
- [22] 崔宝文, 陈春瑞, 林旭东, 等. 松辽盆地古龙页岩油甜点特征及分布[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 45-55.
- CUI Baowen, CHEN Chunrui, LIN Xudong, et al. Characteristics and distribution of sweet spots in Gulong shale oil reservoirs of Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 45-55.
- [23] 何文渊, 蒙启安, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践[J]. *石油学报*, 2022, 43(1): 1-14.
- HE Wenyuan, MENG Qi'an, FENG Zihui, et al. In-situ accumulation theory and exploration & development practice of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 1-14.
- [24] 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 Yuhua, LIANG Jiangping, ZHANG Jinyou, 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.
- [25] 沈云琦, 金之钧, 苏建政, 等. 中国陆相页岩油储层水平渗透率与垂直渗透率特征——以渤海湾盆地济阳坳陷和江汉盆地潜江凹陷为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 378-389.
- SHEN Yunqi, JIN Zhijun, SU Jianzheng, et al. Characteristics of horizontal and vertical permeability of continental shale oil reservoirs in China: A case from Jiyang Depression in Bohai Bay Basin and Qianjiang Sag in Jiangnan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 378-389.
- [26] INGRAM R L. Terminology for the thickness of stratification and parting units in sedimentary rocks[J]. *GSA Bulletin*, 1954, 65(9): 937-938.
- [27] CAMPBELL C V. Lamina, laminaset, bed and bedset[J]. *Sedimentology*, 1967, 8(1): 7-26.
- [28] 金成志, 董万百, 白云凤, 等. 松辽盆地古龙页岩岩相特征与成因[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 35-44.
- JIN Chengzhi, DONG Wanbai, BAI Yunfeng, et al. Lithofacies characteristics and genesis analysis of Gulong shale in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 35-44.
- [29] 韩文中, 赵贤正, 金凤鸣, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段湖相页岩油甜点评价与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(4): 777-786.
- HAN Wenzhong, ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, et al. Sweet spots evaluation and exploration of lacustrine shale oil of the second member of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 777-786.
- [30] 刘喜武, 刘宇巍, 郭智奇. 陆相页岩油关键甜点要素地球物理表征技术[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(4): 1576-1584.
- LIU Xiwu, LIU Yuwei, GUO Zhiqi. Key sweet spot factors seismic characterization of continental shale oil[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(4): 1576-1584.
- [31] 周庆凡. 页岩油气资源评价基本问题的讨论[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 26-33.
- ZHOU Qingfan. Discussion on key issues of shale oil/gas resource assessment[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 26-33.
- [32] 余涛, 卢双舫, 李俊乾, 等. 东营凹陷页岩油游离资源有利区预测[J]. *断块油气田*, 2018, 25(1): 16-21.
- YU Tao, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Prediction for favorable area of shale oil free resources in Dongying Sag[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2018, 25(1): 16-21.
- [33] 黄振凯, 刘全有, 黎茂稳, 等. 鄂尔多斯盆地长7段泥页岩层系排烃效率及其含油性[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(3): 513-521, 600.
- HUANG Zhenkai, LIU Quanyou, LI Maowen, et al. Hydrocarbon expulsion efficiency and oil-bearing property of the shale system in Chang 7 Member, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3): 513-521, 600.
- [34] 马艳丽, 辛红刚, 马文忠, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区长7段页岩油富集主控因素及甜点区预测[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(12): 1822-1829.
- MA Yanli, XIN Honggang, MA Wenzhong, et al. The main controlling factors on the enrichment and sweet-spot area prediction of Chang 7 Member shale oil in northern Shaanxi area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(12): 1822-1829.
- [35] MENG Siwei, LI Dongxu, LIU Xin, et al. Study on dynamic fracture growth mechanism of continental shale under compression failure[J]. *Gas Science and Engineering*, 2023, 114: 204983.
- [36] 王凤兰, 付志国, 王建凯, 等. 松辽盆地古龙页岩油储层特征及分类评价[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(5): 144-156.
- WANG Fenglan, FU Zhiguo, WANG Jiankai, et al. Characteristics and classification evaluation of Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(5): 144-156.
- [37] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2—shale-oil resource systems[M]//BREYER J A. *Shale Reservoirs—Giant Resources for the 21st Century*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 89-119.

(编辑 张玉银)