

文章编号: 0253-2697(2024)06-0900-14 DOI:10.7623/syxb202406002

# 松辽盆地北部嫩江组中—低成熟页岩油 地质特征及勘探突破

何文渊<sup>1,2</sup> 崔宝文<sup>2</sup> 张金友<sup>2,3</sup> 赵莹<sup>4</sup> 程心阳<sup>2,3</sup>  
刘召<sup>2,3</sup> 刘鑫<sup>2,3</sup> 曾花森<sup>2,3</sup>

(1. 中国石油国际勘探开发有限公司 北京 100034; 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 163712;  
3. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712; 4. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院 北京 102249)

**摘要:**松辽盆地嫩江组发育陆相湖盆页岩,其分布面积广,烃源岩品质好,页岩油潜在资源规模大。以往的研究主要关注青山口组中—高成熟页岩储层,对于嫩江组的中—低成熟度典型湖相页岩鲜有涉及。基于全岩矿物分析、有机地球化学分析、场发射扫描电镜分析和氮气吸附实验等测试资料,结合区域构造背景和沉积特征,对嫩江组页岩的分布和烃源岩特征、含油性、储集性进行综合分析,揭示了嫩江组页岩油的地质特征及资源潜力。研究表明:嫩江组一段和嫩江组二段广泛发育页岩,其厚度大且分布稳定;嫩江组在纵向上发育3套有机质含量高的页岩层段,其有机质类型以I型和II<sub>1</sub>型为主,有机质演化程度主体处于中等成熟—低成熟阶段;页岩以发育粒间孔、粒内孔和黄铁矿晶间孔等多类型纳米级储集空间为主,孔径主要分布在64~128 nm;嫩江组温暖湿润的古环境奠定了页岩有机质发育的物质基础,同时优质的烃源岩与多类型纳米级储集空间的耦合共同制约了页岩油的富集。综合评价表明:纵向上,嫩江组二段为最优质的“甜点层”,嫩江组一段的中部次之;初步估算嫩江组的石油资源量超过100×10<sup>8</sup> t。2021年,大庆油田有限责任公司在嫩江组部署了NY1H井,累积产油量为2160 t,实现了嫩江组中—低成熟页岩油在初期相对高产阶段的稳产,证实了嫩江组具备良好的页岩油资源基础和动用潜力。

**关键词:**松辽盆地;嫩江组;页岩油;有机质类型;资源量;勘探突破

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## Geological characteristics and exploration breakthroughs of the middle to low mature shale oil of Nenjiang Formation in northern Songliao Basin

He Wenyuan<sup>1,2</sup> Cui Baowen<sup>2</sup> Zhang Jinyou<sup>2,3</sup> Zhao Ying<sup>4</sup>  
Cheng Xinyang<sup>2,3</sup> Liu Zhao<sup>2,3</sup> Liu Xin<sup>2,3</sup> Zeng Huasen<sup>2,3</sup>

(1. China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing 100034, China; 2. National Key Laboratory for Green Mining of Multi-resource Collaborative Continental Shale Oil, Heilongjiang Daqing 163712, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Daqing Oilfield Limited Company, Heilongjiang Daqing 163712, China; 4. Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

**Abstract:** The continental lacustrine shale is developed in Nenjiang Formation of Songliao Basin, and characterized with wide distribution area, good quality of source rocks and large-scale potential shale oil resources. Previous studies mainly focused on the medium-high mature shale reservoirs of Qingshankou Formation, and rare attention is paid on the medium-low mature lacustrine shale in Nenjiang Formation. Based on whole-rock mineral analysis, organic geochemical analysis, as well as test data of field emission scanning electron microscopy and nitrogen adsorption, in combination with the regional tectonic background and sedimentary characteristics, the paper comprehensively analyzes the distribution of shale and the characteristics of source rocks, shale oil content and reservoir property of Nenjiang Formation, and discovers the geological characteristics and resource potential of shale oil in Nenjiang Formation. The results show that the shale is widely developed in Member 1 and 2 of Nenjiang Formation, with large thickness and stable distribution. Vertically, there are three sets of shale reservoirs with high organic matter in Nenjiang Formation, dominated by the organic matter of Type I and II<sub>1</sub> in the medium-low mature stage. The nano-scale reservoir space of shale is dominated by intergranu-

**基金项目:**中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“大庆古龙页岩油勘探开发理论与关键技术研究”(2021ZZ10)和黑龙江省“百千万”工程科技重大专项(2020ZX05A01)资助。

**第一作者:**何文渊,男,1974年10月生,2001年获北京大学博士学位,现为中国石油国际勘探开发有限公司总经理、教授级高级工程师,主要从事石油天然气地质综合研究及油气勘探管理工作。Email:hewy@cnpc.com.cn

**通信作者:**赵莹,女,1983年4月生,2009年获东北石油大学硕士学位,现为大庆油田有限责任公司页岩油勘探开发指挥部高级工程师,主要从事非常规油气勘探研究和管理。Email:zhaoying5@petrochina.com.cn

lar pores, intragranular pores and pyrite intercrystalline pores, and the pore size is mainly distributed in the range of 64 nm to 128 nm. The paleoenvironment provides a material basis for the development of organic matter, and the enrichment of shale oil is jointly controlled by the coupling of high quality source rocks and multi-type nano-level reservoir space. The comprehensive evaluation shows that the best sweet spots are developed in Member 2 of Nenjiang Formation, followed by the middle section of Member 1 of Nenjiang Formation. The oil resources are preliminarily estimated to be more than  $100 \times 10^8$  t. Well NY1H in Nenjiang Formation was deployed and drilled in 2021 by Daqing Oilfield Company Limited, with a cumulative oil production of 2 160 t, achieving stable production of medium-low mature shale oil in Nenjiang Formation, which confirmed that Nenjiang Formation has a good resource base of shale oil and utilization potential.

**Key words:** Songliao Basin; Nenjiang Formation; shale oil; organic matter type; resource amount; exploration breakthrough

**引用:**何文渊,崔宝文,张金友,赵莹,程心阳,刘召,刘鑫,曾花森.松辽盆地北部嫩江组中—低成熟页岩油地质特征及勘探突破[J].石油学报,2024,45(6):900-913.

**Cite:** HE Wenyuan, CUI Baowen, ZHANG Jinyou, ZHAO Ying, CHENG Xinyang, LIU Zhao, LIU Xin, ZENG Huasen. Geological characteristics and exploration breakthroughs of the middle to low mature shale oil of Nenjiang Formation in northern Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(6): 900-913.

中国陆相页岩油资源潜力巨大,据不完全统计,其地质资源量为  $397.46 \times 10^8$  t,可采资源量为  $34.98 \times 10^8$  t,是非常规油气勘探的重要资源<sup>[1-3]</sup>。按照烃源岩的热演化程度可将页岩油划分为中—高成熟页岩油和低成熟页岩油,其中,中—高成熟页岩油的镜质体反射率( $R_o$ )在 1.0%~1.5%。目前,中国通过大规模的水平井体积压裂技术已实现中—高成熟页岩油的资源动用,各大盆地已完成页岩油的地质资源评价和勘探工作,其中,松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地等实现了勘探重大突破<sup>[4-6]</sup>。随着地质认识的深化、工程改造技术的迭代进步和管理模式的创新,2022年,松辽盆地青山口组投产上油组的水平井已实现对中—高成熟页岩油的效益开发,而低成熟页岩油由于以产重质油、沥青及尚未转化的有机质为主,通常以原位加热的方式开采,进而获得产量<sup>[7-8]</sup>。松辽盆地嫩江组广泛分布着低成熟页岩。为了进一步探索低成熟页岩油的勘探潜力,大庆油田有限责任公司探索将水平井大规模体积压裂储层改造技术应用到低成熟页岩油勘探领域,以期规模为开发中—低成熟页岩油提供思路。

2021年,大庆油田有限责任公司对嫩江组的基础地质特征开展了系统研究,在古龙凹陷优选部署了风险探井——NY1H井,探索在厚层泥页岩中勘探新类型页岩油的潜力。通过压裂技术的改进及排采制度的优化,NY1H井实现了重大勘探突破,试油阶段获得产油量为 12.3 t/d、产气量为  $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 。目前试采 424 d,累积产油量为 2 160 t,具有长期稳产的特征,实现了松辽盆地嫩江组湖相中—低成熟页岩油勘探的历史性突破,开辟了页岩油新类型勘探的新局面。基于 NY1H 井的页岩油气勘探实践,结合全岩矿物分析、有机地球化学分析、场发射扫描电镜分析和氮气吸附实验等测试资料,笔者系统剖析了松辽盆地嫩江组页

岩油的成藏地质特征,明确了中—低成熟页岩油的勘探开发潜力,以期为开拓中—低成熟页岩油的勘探新战场提供理论支撑和技术参考。

## 1 地质背景

松辽盆地位于中国东北部,面积约为  $26 \times 10^4\text{ km}^2$ ,是以中生界为主的大型陆相沉积盆地,具有下断上拗的地质结构特征。由北向南,按构造特征可划分为西部斜坡、北部倾没区、中央拗陷区、东北隆起区、东南隆起区和西南隆起区 6 个构造区,其中,中央拗陷区是油气的主要勘探区。盆地的拗陷层发育 2 套泥页岩沉积,分别为白垩系青山口组和嫩江组,分布范围广、地层厚度大,其中,嫩江组泥页岩处于中—低成熟阶段, $R_o$  整体为 0.35%~0.78%,为研究的目的层位(图 1)。在嫩江组沉积晚期,由于构造抬升作用,嫩江组的沉积中心向盆地西部迁移,嫩江组页岩油在平面上分布于中央拗陷区的齐家凹陷—古龙凹陷、大庆长垣凹陷和三肇凹陷等二级构造单元。嫩江组一段(嫩一段)和嫩江组二段(嫩二段)暗色页岩的分布面积超过  $9.0 \times 10^4\text{ km}^2$ 。嫩二段暗色页岩在中央拗陷区的厚度超过 160 m,嫩一段暗色页岩在古龙凹陷、朝阳沟阶地的厚度超过 100 m。

## 2 地质特征

### 2.1 页岩沉积特征

嫩江组与下伏姚家组为连续沉积,呈整合接触。嫩江组为松辽盆地在最大规模湖侵期的沉积,嫩一段—嫩二段自下而上表现为水进沉积过程,发育一套连续厚度大、平面分布范围广的暗色优质泥页岩,是全盆地最重要的对比标志层,也是良好的生油层(图 2)。嫩一段暗色泥岩的厚度超过 70 m,嫩二段暗色泥岩的厚度超过 160 m。

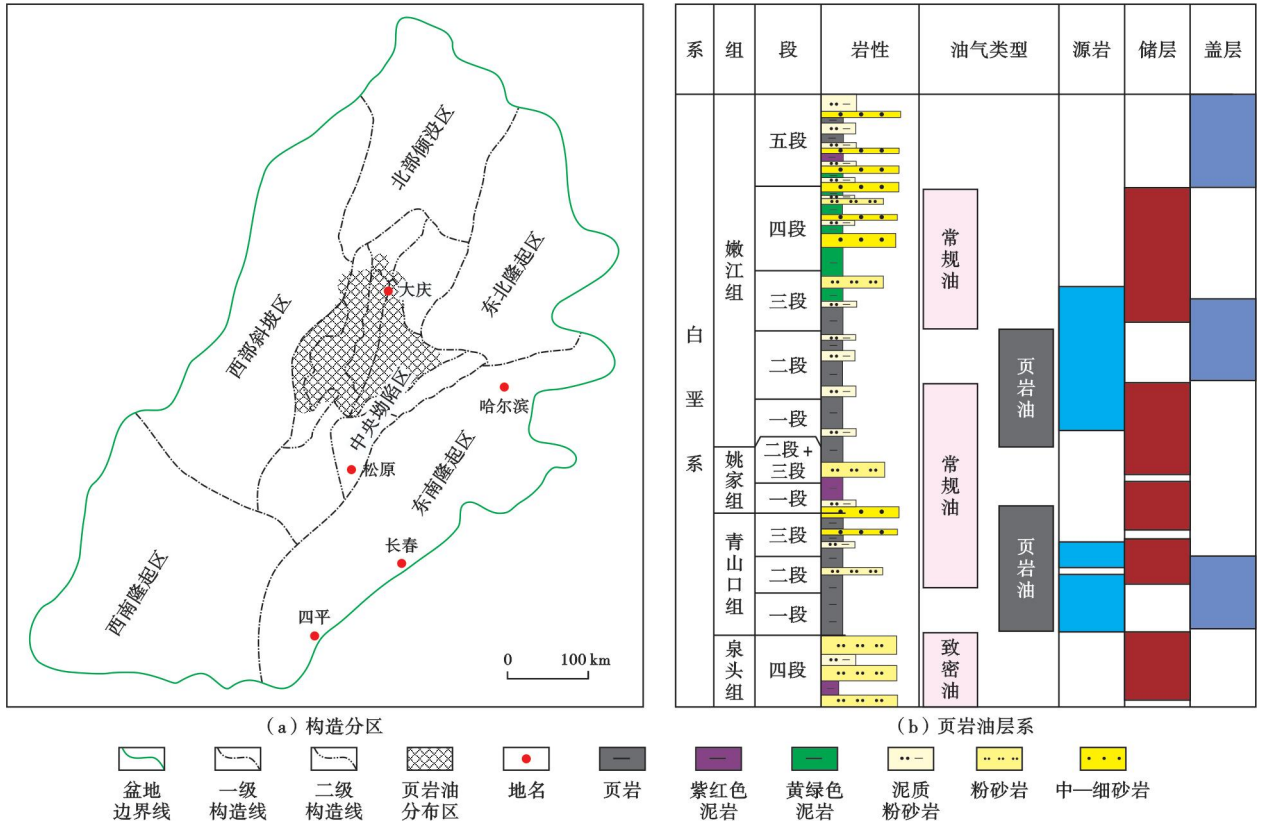


图1 松辽盆地北部构造分区及页岩油层系

Fig. 1 Tectonic divisions and shale oil strata in northern Songliao Basin

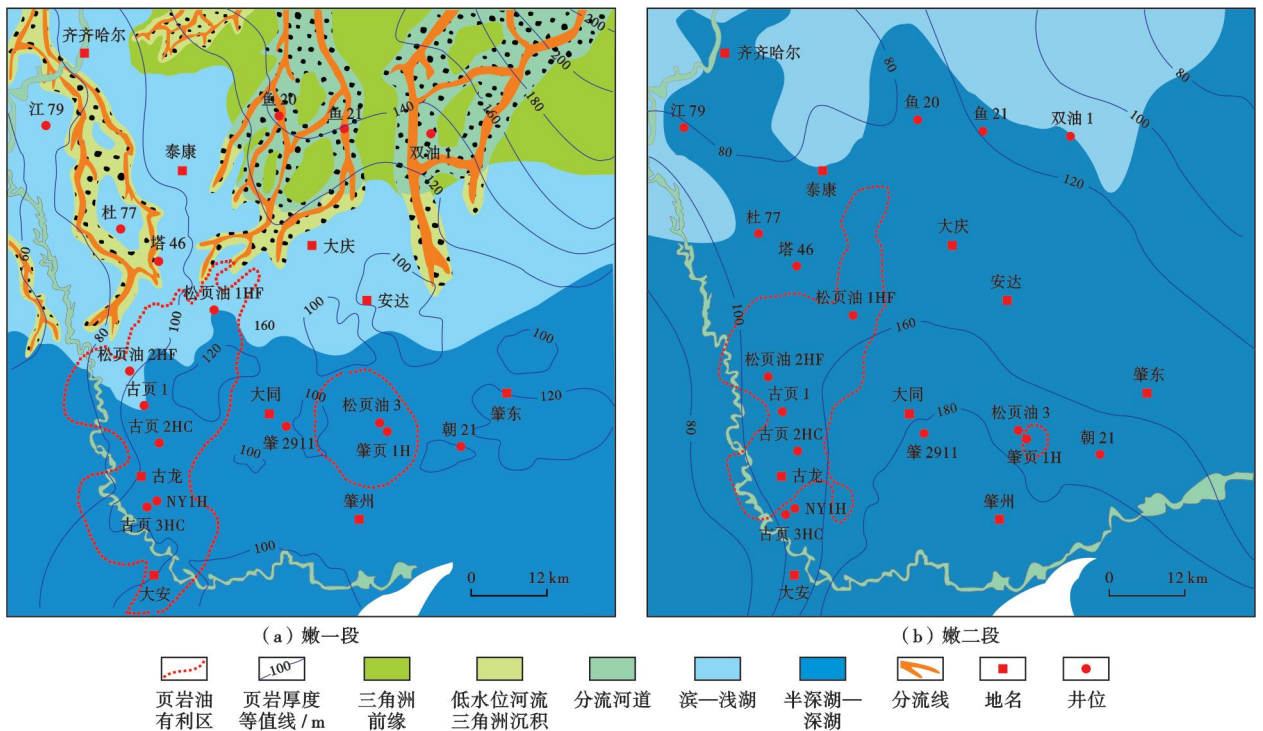


图2 松辽盆地北部嫩江组沉积相

Fig. 2 Sedimentary facies of Nenjiang Formation in northern Songliao Basin

嫩一段、嫩二段的沉积沉降是继青山口组沉积期拗陷作用后盆地发生的再次沉降,这导致盆地的容纳速率大于堆积速率,水面不断扩大,水体不断变深。在大庆长垣地区,嫩江组在广大范围内主要发育半深湖—深湖和浅湖沉积,形成了颜色较暗、厚度可观、生烃强度高的暗色泥岩。水进过程中沿盆地周缘广泛发育厚度较薄的浅湖砂坝砂体,为松辽盆地的湖进极盛期沉积。

嫩一段沉积期,湖盆的基准面持续上升,沉积的沉降速度加快,湖水迅速扩张,砂体厚度普遍较小。砂体厚度一般不到10 m,仅在盆地北部可达12 m。盆地北部砂体的含砂率低于40%,盆地中央大部分地区砂体的含砂率低于10%。湖盆内主要发育三角洲沉积体系,发育三角洲平原、三角洲前缘、前三角洲、滨—浅湖、半深湖—深湖等沉积亚相,其中,半深湖—深湖亚相的分布面积较大[图2(a)]。受北部物源控制,三角洲沉积体系的延伸范围较远,一直延伸到齐家凹陷—古龙凹陷,分布范围较大,呈朵叶状。盆地东北部的三角洲呈朵叶状向SW向延伸,延伸范围相对较小,主要分布在明水阶地。其余的朵叶状沉积物的分布范围很小,呈小朵叶状。整体上,该时期水体较深,湖盆范围较大。

嫩二段在全盆地广泛分布,其底部有一层厚度为5~15 m的油页岩层。嫩二段沉积期是整个松辽盆地沉积范围最大的时期,湖盆分布很广,甚至超出了现今盆地边界。现今盆地范围在嫩二段沉积期几乎为半深湖—深湖区[图2(b)],覆盖面积高达 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

## 2.2 有机质的发育特征及含油性

### 2.2.1 有机质丰度和含油性

地球化学资料分析表明,嫩江组在纵向上主要发

育3套烃源岩,分别位于嫩一段底部、嫩一段中部和嫩二段底部。嫩二段底部页岩油富集层的分布受深湖亚相控制,分布范围广,地层均质性好,有机质丰度高,总有机碳(TOC)含量最高达14%、一般在4%~6%,热解生烃潜量为0.03~70.88 mg/g、平均为7.94 mg/g,氯仿沥青“A”含量为0.003 0%~1.140 3%、平均为0.098 5%;嫩二段底部页岩油富集层的厚度一般为8~15 m,综合评价该层段烃源岩为中—好烃源岩。

嫩一段深湖亚相的分布范围较嫩二段明显缩小,纵向上可划分为2套页岩油富集层。嫩一段中部的地层非均质性强,有机质丰度高,TOC平均含量分布在2%~4%,热解生烃潜量为0.03~68.13 mg/g、平均为12.59 mg/g;氯仿沥青“A”含量为0.001 6%~1.350 7%、平均为0.192 4%。嫩一段深湖亚相的累计厚度一般为10~30 m,综合评价该层段烃源岩为好烃源岩。嫩一段底部的页岩油富集层厚度较薄,有机质丰度低,资源潜力较小。

宏观上,岩心观察可见,在页岩裂缝面和页理面上有大量油膜且油气味浓。微观上,激光共聚焦显微分析显示,嫩二段底部页岩油富集层的含油性好,样品中含有较丰富的轻烃、重烃组分并均匀地分布在泥质颗粒之间,部分组分呈团簇状和条带状富集,轻烃、重烃组分无明显的分异现象[图3(a)]。偶见原油的轻烃、重烃组分略呈分离的现象,其中,原油中的轻烃组分主要呈团块状富集于干酪根表面,重烃组分主要分布于泥质中[图3(b)]。

嫩江组页岩的含油性与有机碳含量关系密切,同时受成熟度控制。在相同成熟度条件下,含油量随着有机碳含量的增加而增大,呈现正相关性;在不同成熟度条件下,随着成熟度增加,含油量明显升高[图4(a)]。

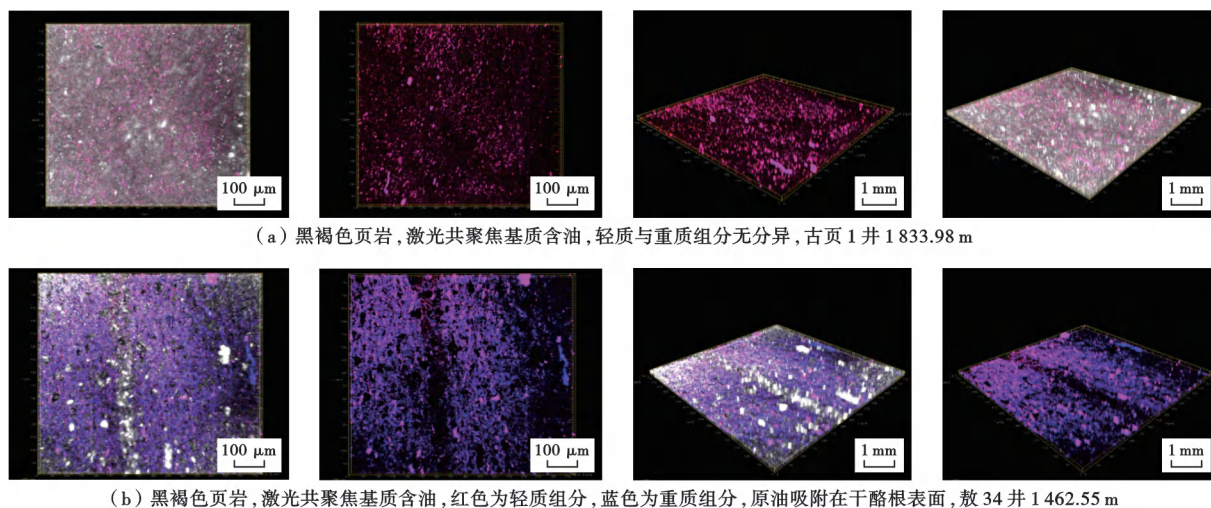


图3 古龙凹陷页岩油激光共聚焦照片

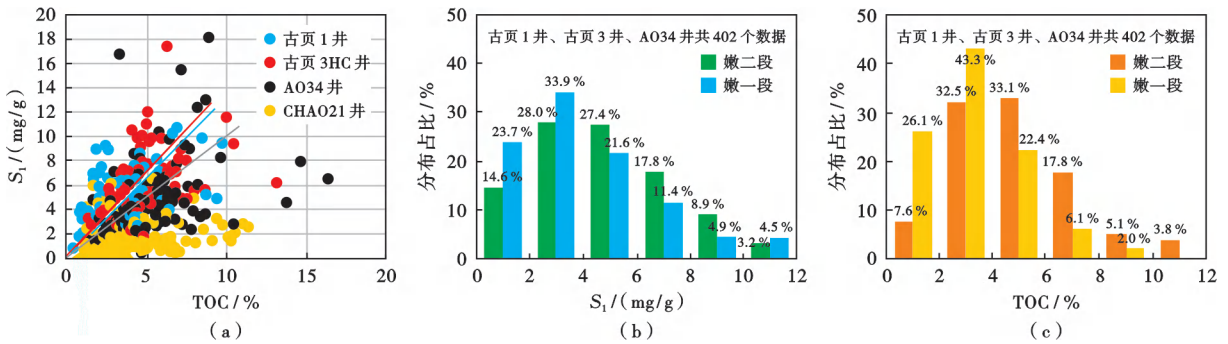
Fig. 3 Laser confocal images of shale oil in Gulong sag

松辽盆地北部嫩江组泥页岩的  $R_o$  一般在 0.5% ~ 0.8%, 当  $R_o > 0.7%$  时, 游离烃含量 ( $S_1$ ) 陡然增加, 页岩油富集层中的  $S_1$  一般大于 5 mg/g。从嫩江组的含油性来看, 纵向上, 嫩二段底部和嫩一段中部是含油性最好的 2 个层段, 嫩二段页岩  $S_1$  一般在 0.4~17.0 mg/g、平均为 4.7 mg/g, 嫩二段底部页岩  $S_1$  平均大于 6.0 mg/g。在嫩江组页岩  $S_1$  分布的直方图[图 4(b)]中,  $S_1$  主体分布在 2~8 mg/g; 嫩二段的含油性好于嫩一段, 其高游离烃含量的占比大于嫩一段。嫩江组页岩 TOC 含量的分布特征[图 4(c)]与  $S_1$  分布特征一致, 嫩二段

高有机质丰度的占比整体大于嫩一段。

### 2.2.2 有机质类型

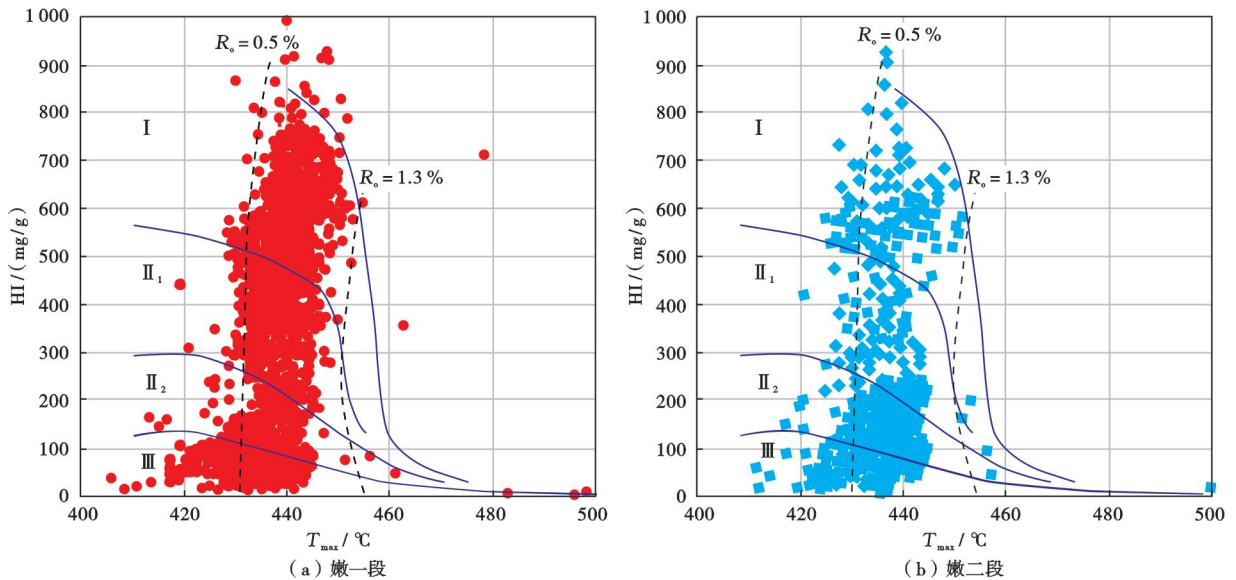
松辽盆地北部嫩一段、嫩二段烃源岩的氢指数(HI)与最高热解峰温( $T_{max}$ )关系(图 5)反映嫩一段烃源岩的有机质类型主要为 I 型, 部分为 II<sub>1</sub> 型, 这一特征决定了嫩一段烃源岩在成熟演化阶段可以大量生成石油。嫩二段烃源岩的有机质类型主要为 I 型、II<sub>1</sub> 型和 II<sub>2</sub> 型, II 型和 III 型有机质所占的比例相对较大, 反映嫩二段烃源岩的有机质类型要略差于嫩一段。



注:  $S_1$ —游离烃含量; TOC—总有机碳。

图 4 嫩江组页岩的游离烃含量与总有机碳含量分布

Fig. 4 Distribution of free hydrocarbon and total organic carbon contents in Nenjiang Formation shale



注: HI—氢指数;  $T_{max}$ —最高热解峰温。

图 5 松辽盆地北部嫩一段、嫩二段烃源岩的有机质类型划分

Fig. 5 Organic matter type division of source rocks in the Member 1 and 2 of Nenjiang Formation, northern Songliao Basin

松辽盆地嫩一段烃源岩的全岩显微组分显示, 烃源岩组分以层状藻为主(图 6), 藻类细小, 单个藻的形态不规则, 纵向上多呈层状分布。与松辽盆地青山口组一段优质烃源岩相似, 嫩一段烃源岩是中—浅层石油的主要贡献者。

嫩江组页岩的 HI 为 600~800 mg/g, 与国内外其

他地区的页岩对比, 其单位生油潜力更大。不同地区的烃源岩存在明显差异。在中央坳陷区嫩一段烃源岩的 HI 较高, 一般大于 350 mg/g, 在三肇地区和长垣西部部分地区 HI 大于 700 mg/g, 这与嫩一段烃源岩的有机质类型以 I 型和 II<sub>1</sub> 型为主相对应, 且烃源岩分布范围广。中央坳陷区嫩二段烃源岩的 HI 主要分布

在 150~350 mg/g,三肇南地区和齐家凹陷以西地区嫩二段烃源岩的 HI 超过 350 mg/g,这与嫩二段烃源岩的有机质类型以 II<sub>2</sub> 型为主相对应,且烃源岩的有机质类型较嫩一段差。

2.2.3 有机质的演化程度

松辽盆地嫩一段、嫩二段烃源岩的 R<sub>o</sub> 与深度有关。嫩一段烃源岩的 R<sub>o</sub> 分布在 0.3%~1.0%,处于

未成熟—成熟演化阶段,总体上随深度的增加 R<sub>o</sub> 逐渐增大,R<sub>o</sub> = 0.7% 时对应的深度约为 1400 m;嫩二段烃源岩在 R<sub>o</sub> = 0.7% 时对应的深度约为 1400 m。

嫩一段、嫩二段烃源岩能够大量生油的地区主要分布在齐家凹陷—古龙凹陷,且以古龙凹陷为主。松辽盆地嫩一段 R<sub>o</sub> > 0.7% 的烃源岩主要分布在齐家凹陷—古龙凹陷和三肇凹陷的中部,面积为 7435 km<sup>2</sup> [图 7(a)]。

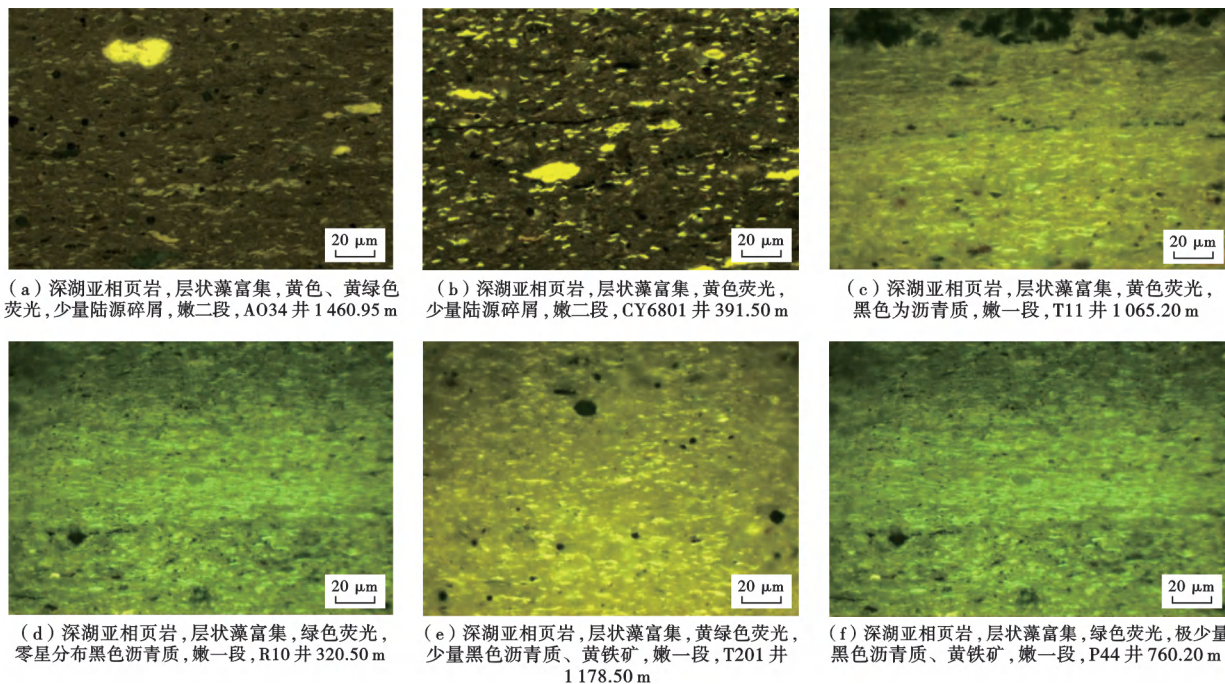


图 6 松辽盆地嫩一段优质烃源岩全岩显微组分

Fig. 6 Whole rock maceral components of high-quality source rocks in the Member 1 of Nenjiang Formation, Songliao Basin

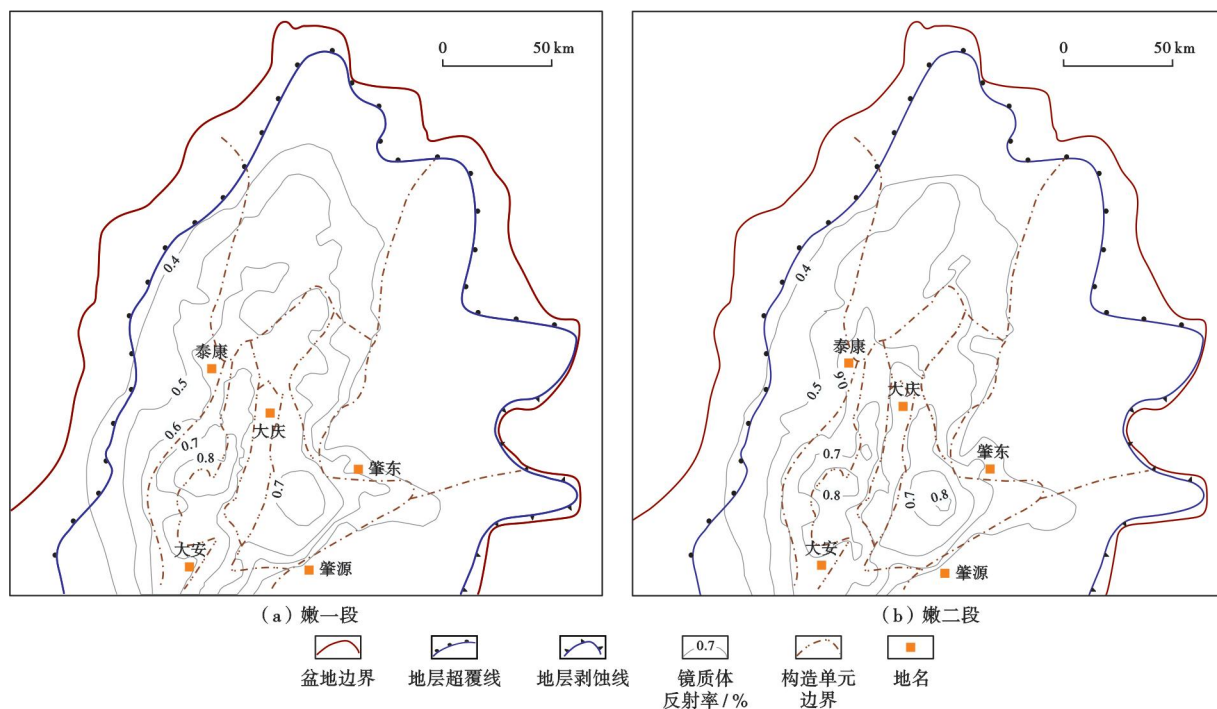


图 7 嫩江组烃源岩成熟度平面分布

Fig. 7 Maturity distribution of source rocks in Nenjiang Formation

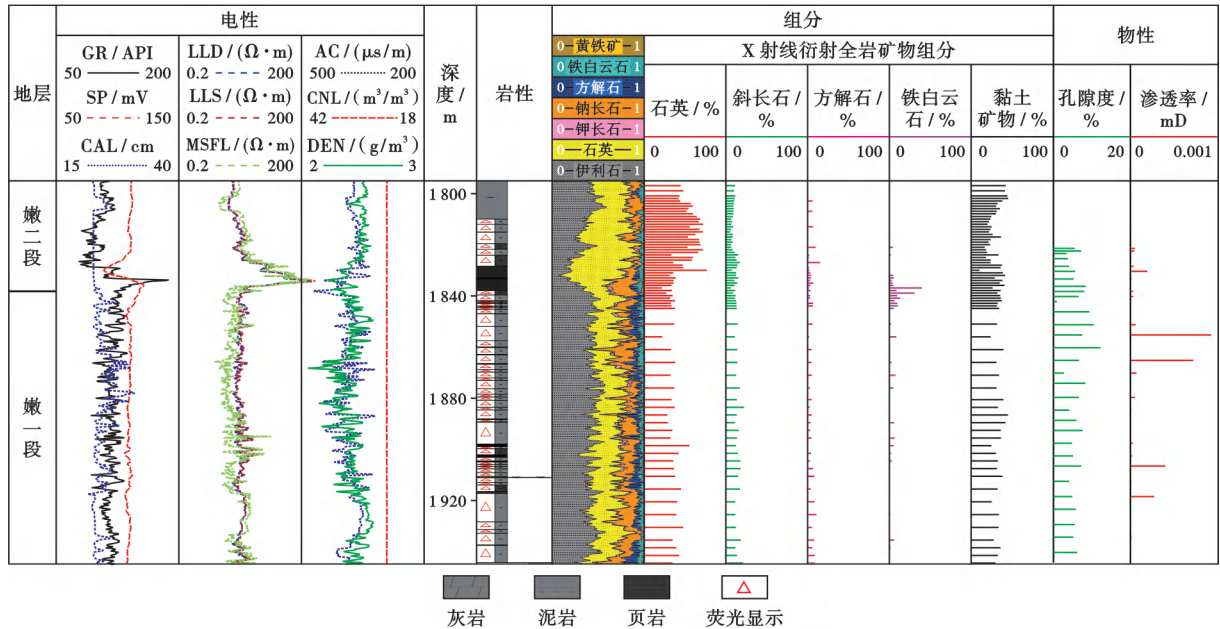
嫩二段  $R_o > 0.7\%$  的烃源岩主要分布在古龙凹陷,整体上,嫩二段烃源岩成熟区的范围略小于嫩一段,面积为  $3776 \text{ km}^2$  [图 7(b)]。

## 2.3 页岩的储集条件

### 2.3.1 岩性特征

嫩江组为典型长英质泥页岩。纵向上连续的全岩

矿物分析(图 8)显示:整体上,石英含量在嫩二段底部明显增加,长石和黏土矿物含量相对减少。石英含量为  $21.9\% \sim 76.8\%$ ,长石含量为  $5.5\% \sim 22.2\%$ ,黏土矿物含量为  $10.3\% \sim 45.1\%$ ,此外含有少量方解石、铁白云石、黄铁矿等。基质矿物以石英为主,大量有机质呈顺层发育,少量有机质呈零散发育。



注:GR—自然伽马;SP—自然电位;CAL—井径;LLD—深侧向电阻率;LLS—浅侧向电阻率;MSFL—微球电阻;AC—声波时差;CNL—补偿中子;DEN—密度测井。

图 8 古页 1 井全岩矿物及岩性纵向分布综合特征

Fig. 8 Vertical distribution characteristics of mineral and lithology in the whole rock of Well Guye1

嫩一段底部发育一套 TOC 含量高的页岩,平均厚度为  $11.4 \text{ m}$ ,镜下显示泥质致密,可见少量介形虫、叶肢介等生物碎屑。嫩一段中部发育 TOC 含量高的页岩,与 TOC 含量低的泥岩呈互层,岩性以页岩为主,中间含砂质、灰质薄层,TOC 含量整体较高,全段厚度为  $36.8 \text{ m}$ 。嫩一段中部页岩的页理发育,页理密度为  $200 \sim 300$  条/ $\text{m}$ 。白云岩薄层较发育,常见高角度裂缝,裂缝面可见油运移痕迹。局部页岩发育密集的碳酸盐质纹层,形成大量层理面,页理密度可达  $900$  条/ $\text{m}$ (图 9)。嫩一段底部页岩的 TOC 含量高,镜下显示其泥质致密,可见少量介形虫、叶肢介等生物碎屑(图 9)。

嫩二段底部连续发育的页岩 TOC 含量高,页理发育,页理密度一般为  $200 \sim 500$  条/ $\text{m}$ ;页岩具油味,厚度为  $16 \text{ m}$ 。嫩二段上部主要为 TOC 含量低的泥岩,页岩局部发育页理,页理密度约为  $1000$  条/ $\text{m}$ 。页岩中偶见顺层发育的方解石脉和方解石纹层(图 10)。微观显微特征显示,嫩二段底部页岩中有机质和泥质呈均匀分布,矿物具有明显的定向排列特征。

### 2.3.2 物性特征

基于嫩江组岩心实测数据和高压压汞实验数据等资料,对页岩物性的系统分析结果表明:嫩二段储层物性整体较好,总孔隙度主要分布在  $4.0\% \sim 10.0\%$ ,平均为  $6.4\%$ [图 11(a)];有效孔隙度一般分布在  $3.0\% \sim 7.0\%$ ,平均为  $3.2\%$ [图 11(b)]。核磁共振及高压压汞实验分析显示,泥岩的孔隙直径总体小于  $100 \text{ nm}$ ,平均孔隙半径为  $18.7 \text{ nm}$ [图 12(a)]。氮气吸附实验分析显示:嫩二段底部页岩油富集层中泥岩的平均孔径为  $14.13 \text{ nm}$ ,孔径总体分布在  $2 \sim 128 \text{ nm}$ ,其中  $64 \sim 128 \text{ nm}$  的孔径占比较高[图 12(b)]。嫩二段底部页岩的大孔占比较高,但总孔容较小。

场发射扫描电镜分析显示,嫩江组储层发育多种微米—纳米级孔隙储集空间<sup>[9-11]</sup>,嫩江组页岩主要发育粒间孔、粒内孔和黄铁矿晶间孔,由于热演化程度较低,发育极少量有机质孔和溶蚀孔。粒间孔以基质矿物粒间孔、黏土矿物粒间孔和有机质-矿物粒间孔为主。基质矿物粒间孔多呈狭长状或针状,也有少量呈圆状或次圆状;有机质-矿物粒间孔是发育在矿物与有机质之间的孔隙,由黏

土矿物收缩形成,孔隙形态多呈狭长状和针状。黏土矿物粒间孔的孔径尺度较前两者小,镜下显示孔径小于  $0.1\ \mu\text{m}$  且分布不均匀。嫩江组页岩发育少量的黄铁矿晶间孔,呈微球团状,孔径小于  $0.1\ \mu\text{m}$ ,由于黄铁矿分散

不均,晶体与晶体间的距离较远。嫩江组页岩中有机质孔不发育或者少量发育,镜下显示有机质孔隙多呈圆状或次圆状,孔隙直径差异较大,孔径多为  $0.05\sim 0.50\ \mu\text{m}$ ,部分孔隙间距为  $0.5\sim 1.0\ \mu\text{m}$ (图 13)。

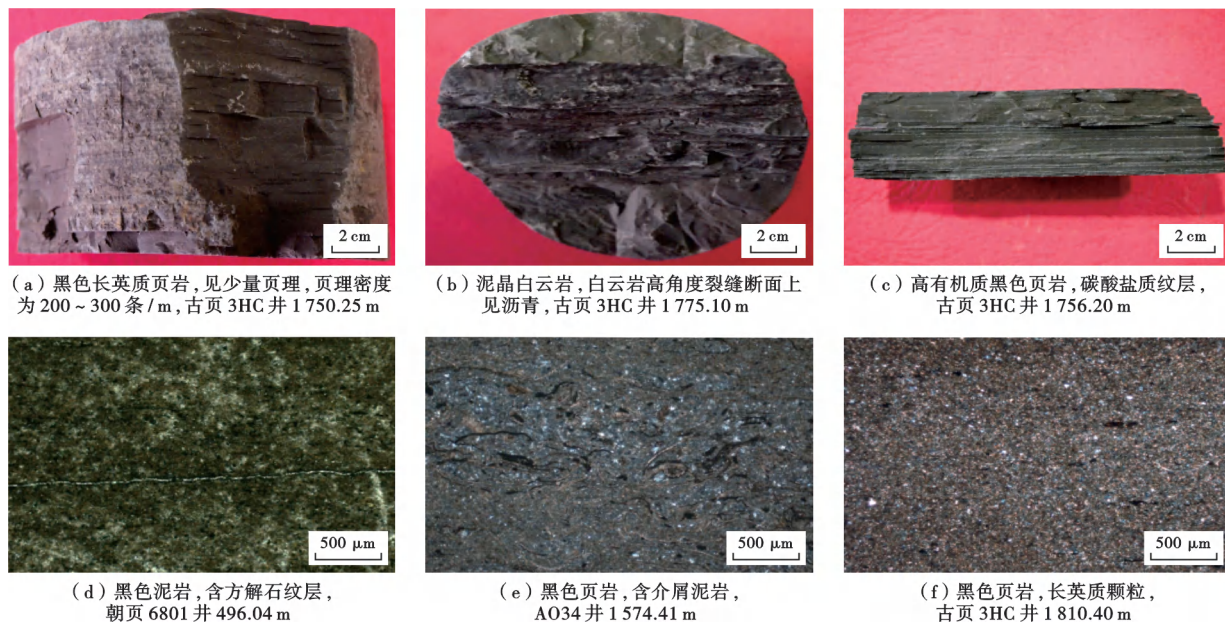


图 9 嫩一段中部岩性及微观特征

Fig. 9 Lithology and microscopic characteristics of the middle part of Member 1 of Nenjiang Formation

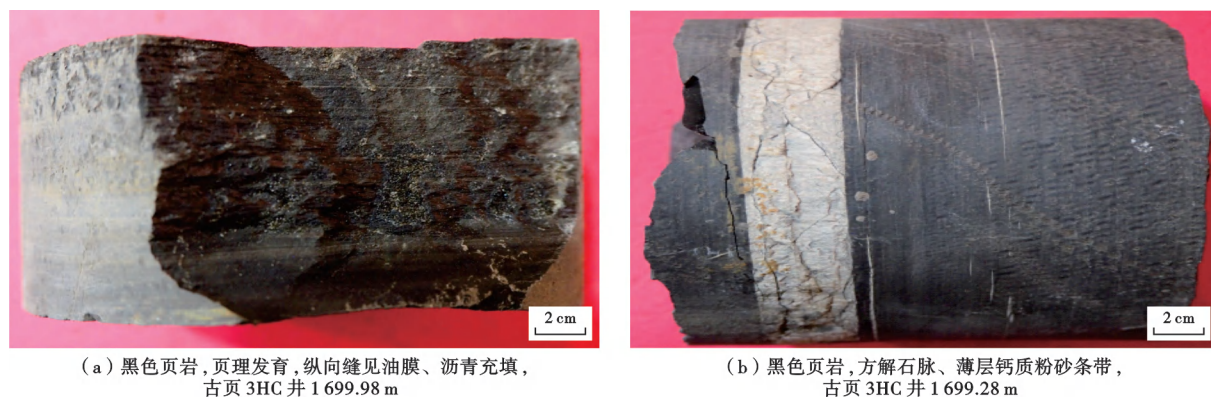


图 10 嫩二段底部岩性及微观特征

Fig. 10 Lithology and microscopic characteristics of the bottom of Member 2 of Nenjiang Formation

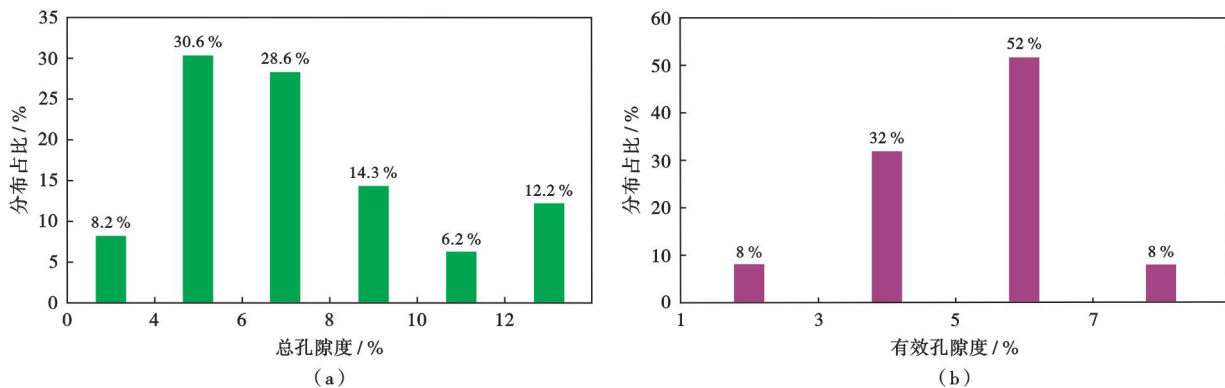


图 11 嫩江组泥岩孔隙度分布

Fig. 11 Porosity distribution of mudstone in Nenjiang Formation



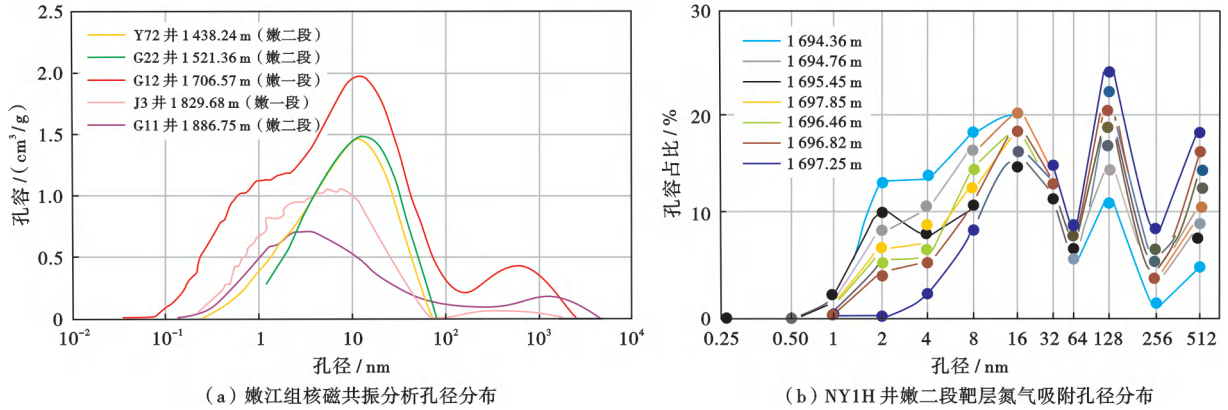


图 12 嫩江组泥岩孔径分布

Fig. 12 Pore size distribution of mudstone in Nenjiang Formation

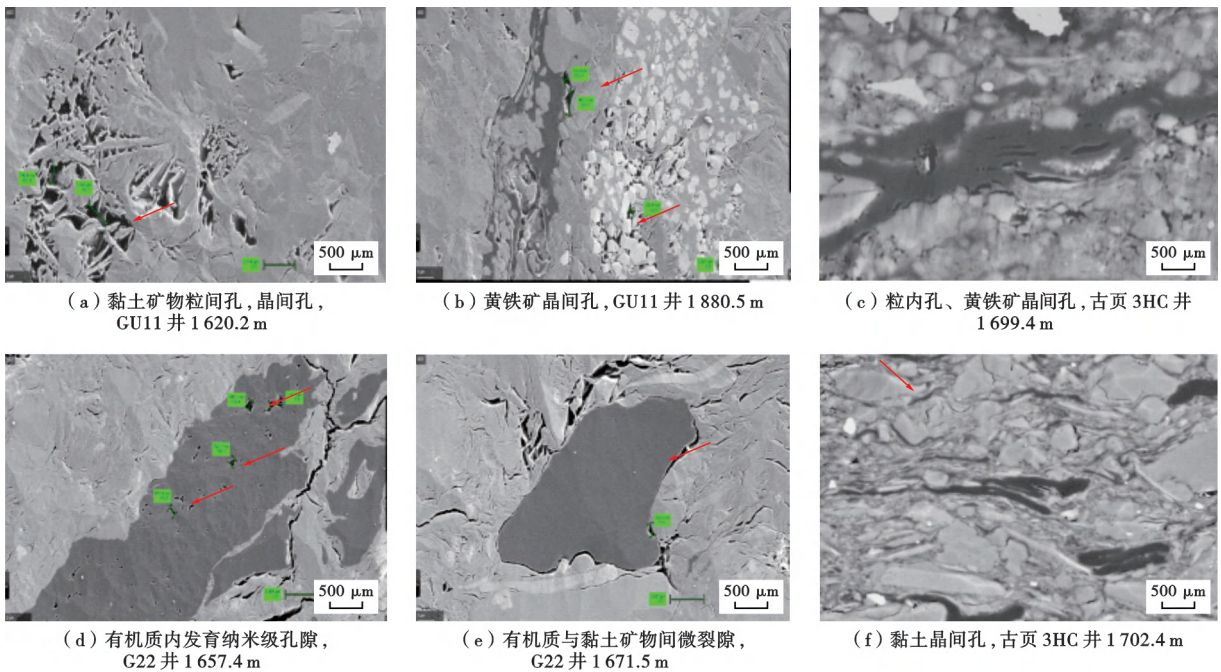


图 13 嫩江组页岩微观储集空间类型及特征

Fig. 13 Types and characteristics of the shale reservoir microspace in Nenjiang Formation

2.3.3 可压性

脆性矿物含量决定了油藏的人工压裂改造模式。石英、方解石等脆性矿物反映了储层的渗透性,一般脆性矿物含量越高,储层的可压性越好,储层越容易形成复杂缝网。嫩江组以泥岩为主,黏土矿物和脆性矿物共同制约了储层的可压性。松辽盆地北部古水体环境研究表明,嫩江组沉积期经历了海侵,导致湖平面升高,水体携带大量的陆源有机质和陆源碎屑。嫩二段底部的矿物组分以石英为主,脆性矿物含量较高,平均为 54.9%;嫩一段中部的石英含量比嫩二段底部低,脆性矿物含量平均为 48.7%。黏土矿物以伊利石为主,其次为蒙皂石和绿泥石,高岭石含量不足 10%。

随着热演化程度增加,生烃过程中产生的酸性流体促进了蒙脱石向伊利石转化,形成硅质,也可增加脆性并增强储层的可压裂性。三轴力学试验表现为杨氏模量低、泊松比高、抗压强度低,岩心表现出塑性特征,岩石呈剪切破坏形态。

2.3.4 有利储集条件成因

温暖湿润的古沉积环境是富有机质页岩规模发育的重要条件<sup>[12-14]</sup>。岩心观察表明,嫩一段发育火山灰,在盆地中心及边部均有发育,证明嫩一段沉积期火山活动较为频繁,火山灰中的有机质也为泥页岩有机质的赋存提供贡献。凝灰岩呈浅灰色,具有细粒凝灰结构、块状构造,其厚度为 10~20 cm,充填在断层、裂缝

中,在断层处有明显的擦痕光滑面(图 14)。火山活动带来的 P、Mo 等元素提供了丰富的营养物质。有机元素、无机元素分析表明,嫩一段—嫩二段沉积期为咸水向淡水变化的沉积环境<sup>[15]</sup>。嫩一段中部的正构烷烃同位素显著偏负,这指示沉积期有大量淡水注入湖泊,湖水盐度随之降低。嫩二段底部的 TOC 含量高, Sr 同位素显著偏正,指示沉积期的沉积环境有显著变化,生产力明显提高。松辽盆地在嫩一段沉积期的湖泊面积较大,是一个大型湖盆,生物发育,受陆源有机质影响小。采用有机碳法计算古湖泊生产力,同时兼顾水生生物在有机质中的贡献率,笔者对松科 1 井、英 15 井、双油 1 井和青 D11 井的嫩江组样品进行了有机碳和孔隙度实验室分析和古湖泊生产力恢复。研究表明,嫩一段—嫩二段底部

的湖泊水体为富养湖—超养湖水体,古湖泊生产力高(图 15),全岩镜检显示发育层状藻、结构藻,藻类的勃发为优质烃源岩的形成奠定了物质基础。咸化、厌氧、富硫的湖底水环境<sup>[16]</sup>为有机质的保存提供了优良的条件。在嫩一段沉积早期,湖泊水体的盐度分层,厌氧、富硫<sup>[16]</sup>,藻类等水生生物异常发育,湖底具有很好的有机质保存条件,从而形成了大面积的优质烃源岩。根据烃源岩的有机质丰度、沉积环境、古生产力等提出了这些条件与有效烃源岩之间的关系。优质烃源岩形成于超养湖和富养湖条件下,而在中养湖和贫养湖中则多形成一般烃源岩或无效烃源岩,即古湖泊生产力大于  $450 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  时形成优质烃源岩,在  $200 \sim 450 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  时形成一般烃源岩,小于  $200 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  时则形成无效烃源岩<sup>[17]</sup>。

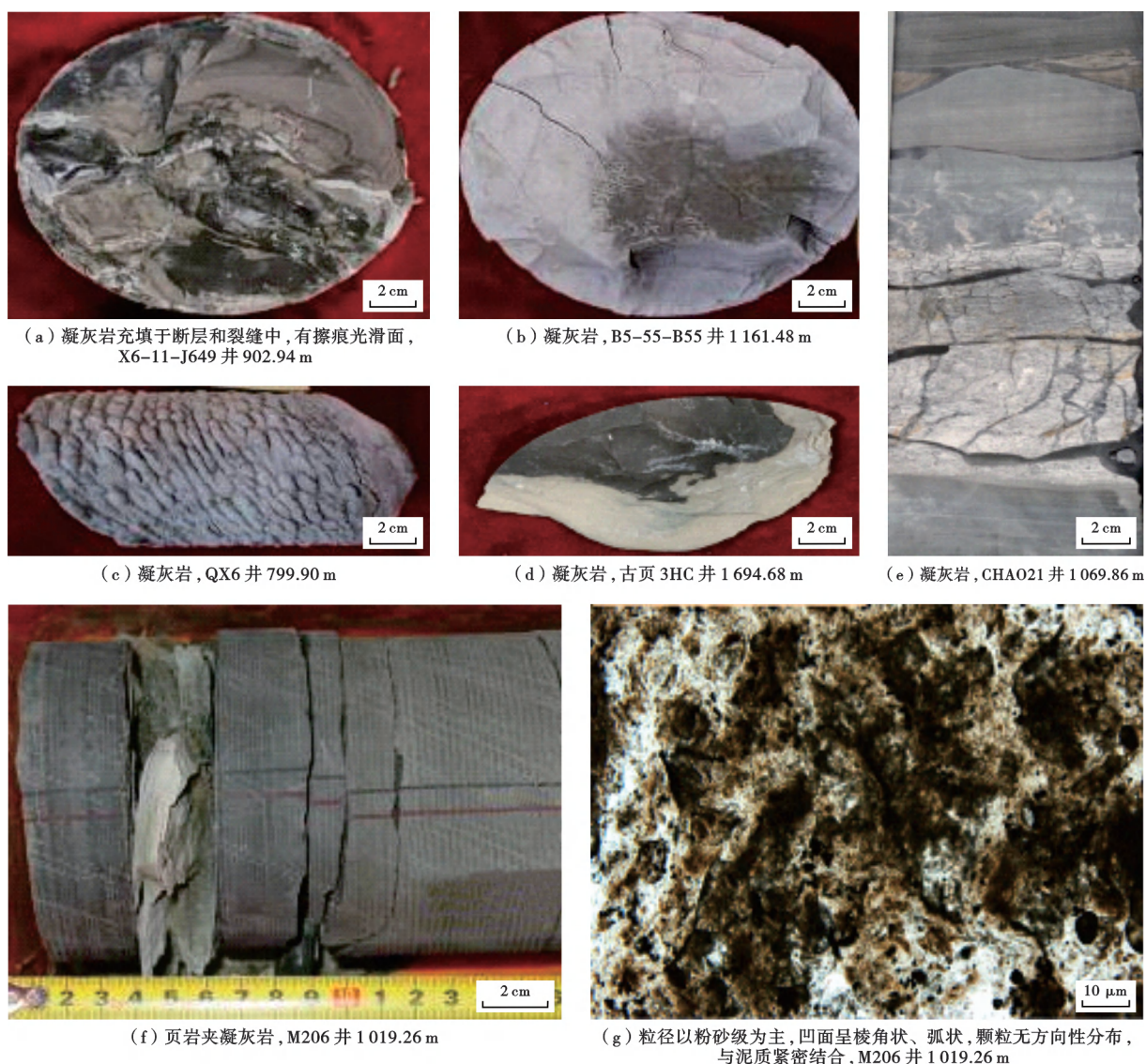


图 14 嫩江组凝灰岩岩心及构造特征

Fig. 14 Core and structural characteristics of tuff in Nenjiang Formation

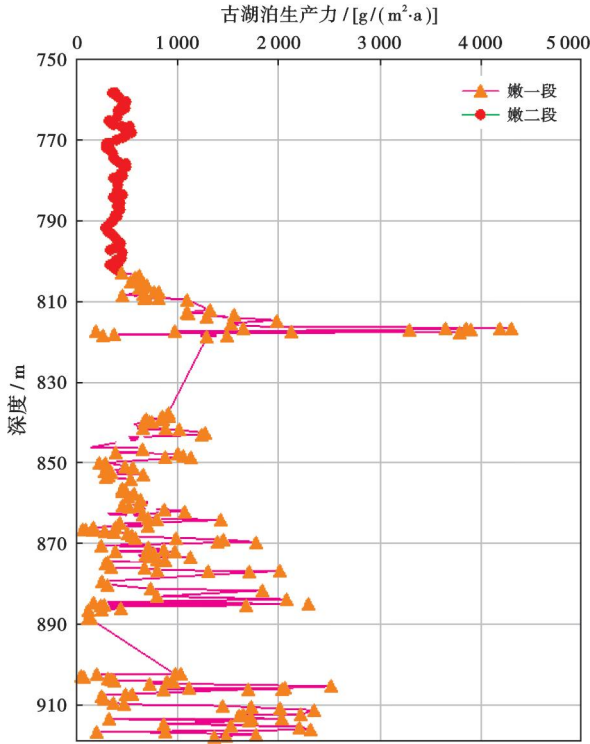


图 15 嫩一段、嫩二段古湖泊生产力剖面

Fig. 15 Productivity profile of ancient lakes in the Member 1 and 2 of Nenjiang Formation

优质的源-储配置是页岩油富集的关键。广覆式湖相沉积形成的优质烃源岩与多类型微米—纳米储集空间的耦合系统控制了页岩油的富集。嫩江组页岩油

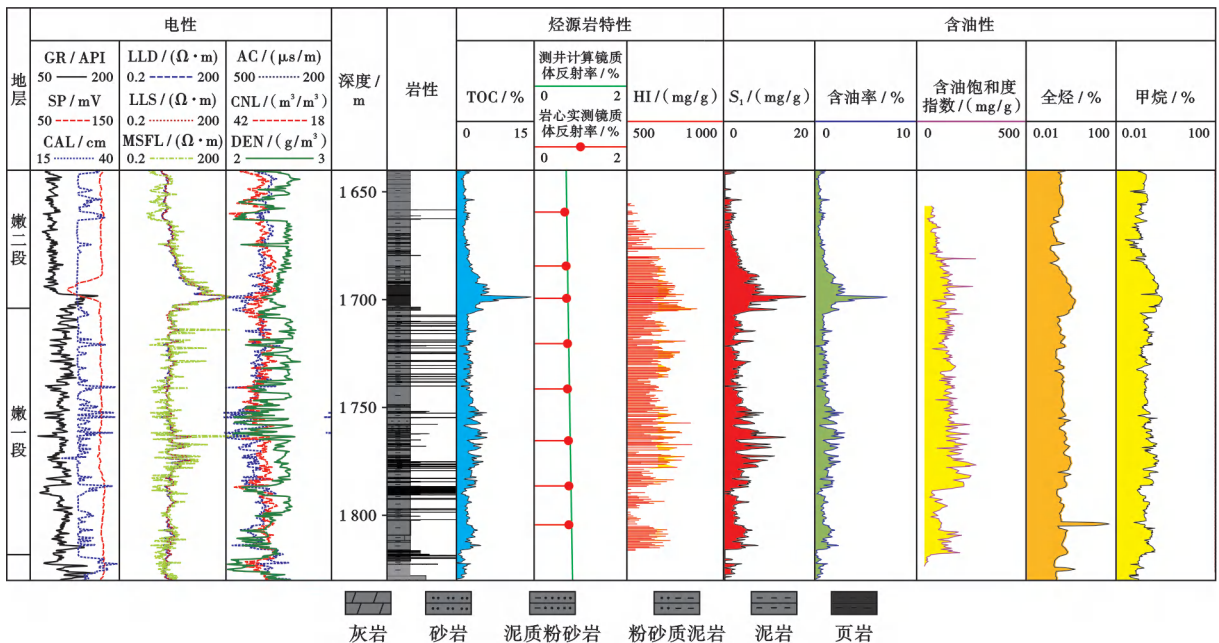
为中—低成熟度源-储一体、连续富集的页岩油藏,其特征是页岩油在烃源岩层中原地生成,又在烃源岩中滞留并富集成藏;生烃增压形成的少量页理缝及页岩中普遍发育的纳米级黏土矿物晶间孔、粒间孔共同构成了烃类的有效储集空间;大面积分布的黑色富有机质页岩具有良好的储集性和较高的含油性,使得烃类富集并原地成藏。保压岩心分析资料显示,嫩江组的含油饱和度为 28.7%~74.8%,与总孔隙度呈现良好的正相关性。

### 3 页岩油富集层综合评价

嫩江组页岩具有优质的烃源岩条件、多种类型微米—纳米储集空间、良好的含油显示,有利于页岩油成藏富集<sup>[18-19]</sup>。综合烃源岩特性、含油性等关键参数,形成了以有机质发育程度为核心兼顾含油性的低成熟页岩油富集层优选方法。

#### 3.1 页岩油富集层的纵向分布

重点取心井的实测数据分析表明,嫩一段、嫩二段在纵向上分布着 3 套有机质丰度高、游离烃含量高的页岩层段(图 16)。在测井曲线上,有机质富集层表现为自然伽马高、电阻率高、声波时差低的特征。嫩二段在纵向上均质性好,横向分布稳定连续,页岩油富集层厚度大(平均为 16 m),页岩的有机质丰度高(3.5%~15.0%)、游离烃含量高(4~15 mg/g)、氢指数高(600~900 mg/g),是目前嫩江组最优质的页岩油富集层。其



注:GR—自然伽马;SP—自然电位;CAL—井径;LLD—深侧向电阻率;LLS—浅侧向电阻率;MSFL—微球电阻;AC—声波时差;CNL—补偿中子;DEN—密度测井;TOC—总有机碳;HI—氢指数;S<sub>1</sub>—游离烃含量。

图 16 古页 3HC 井嫩江组页岩油纵向分布

Fig. 16 Vertical distribution of shale oil in Nenjiang Formation of Well Guye3HC

次为嫩一段,其在纵向上分布2套页岩油富集层,其中,中部在横向上的非均质性较强,页岩油富集层的厚度平均为22m,有机质丰度为1%~6%,游离烃含量为1~10mg/g、裂解烃含量为12~60mg/g、氢指数为500~950mg/g。嫩一段底部页岩油富集层的平均厚度为11m,比上部2套页岩油富集层的厚度

明显减小;其页岩的有机质丰度为1%~5%,游离烃含量为1~6mg/g、裂解烃含量为9~30mg/g、氢指数为500~930mg/g。过NY1井的2条交叉井位地震剖面显示,在稳定的湖相沉积背景控制下,地震同相轴在横向上呈稳定分布,地层厚度无明显变化,呈连续分布(图17)。

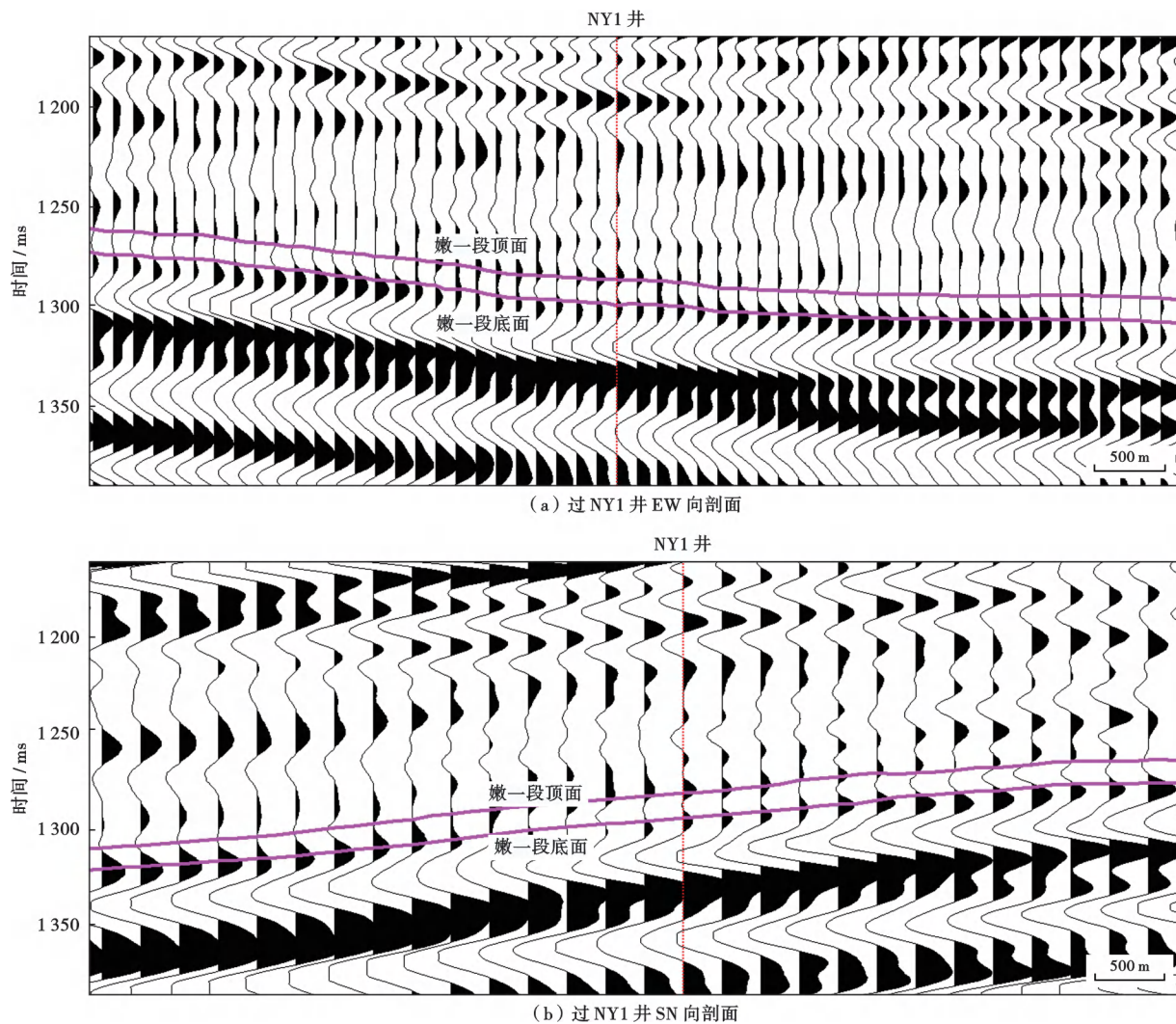


图17 过重点井位地震剖面

Fig. 17 Seismic profile crossing key well

### 3.2 平面富集区优选

综合有机质丰度、游离烃含量和成熟度分析,笔者划定了嫩江组中—低成熟页岩油有利区的分布范围。将 $R_o \geq 0.70\%$ 、TOC含量 $\geq 2\%$ 的湖相沉积地区划为嫩江组页岩油发育有利区,有利区主要分布在齐家凹陷—古龙凹陷,其中,嫩二段页岩油有利区的面积为 $3776 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,嫩一段页岩油有利区的面积为 $6180 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。采用体积法初步估算,嫩江组页岩油有利区的总资源量超过 $100 \times 10^8 \text{ t}$ ,具有广阔的勘探前景(图2)。

## 4 勘探突破的意义

继2020年古页油平1井在青山口组取得中—高成熟页岩油重大突破,获得高产、稳产工业油气流后,大庆油田有限责任公司在古龙凹陷嫩江组中—低成熟页岩油分布区开始谋划风险勘探。2021年,基于松辽盆地北部页岩油富集规律和有利区带评价,大庆油田有限责任公司在古龙凹陷南部部署了NY1H水平井,优选含油性好、厚度大、连续性好的嫩二段底部TOC含量高的层段作为水平井靶层。靶层的厚度为16m,

$R_o$  为 0.71%, 有机碳丰度为 2.9%~13.1%、平均为 5.7%,  $S_1$  为 4.0~11.6 mg/g、平均为 6.9 mg/g, 总孔隙度为 4.6%~7.9%、平均为 6.4%, 脆性矿物含量为 61.9%。

根据嫩二段泥页岩页理发育、塑性强的储层特征, 大庆油田有限责任公司采用“高黏造主缝、低黏开页理、高黏携砂”的大规模复合压裂改造模式对储层进行了有效

改造。水平井的水平段长度为 2005 m, 分 48 段 332 簇实施压裂。2021 年 12 月 13 日放喷试油, 在返排率为 1.22% 时开始出油, 产油量为 12.3 t/d, 产气量为 1000 m<sup>3</sup>/d。截至 2023 年 9 月 23 日, 返排率为 36.3%, 产油量为 8.6 t/d, 见油生产 424 d, 累积产油量为 2160 t (图 18)。原油密度为 0.859 g/cm<sup>3</sup>, 动力黏度为 53 mPa·s, 含蜡量为 26.99%, 凝固点为 41 °C, 属于中质油。

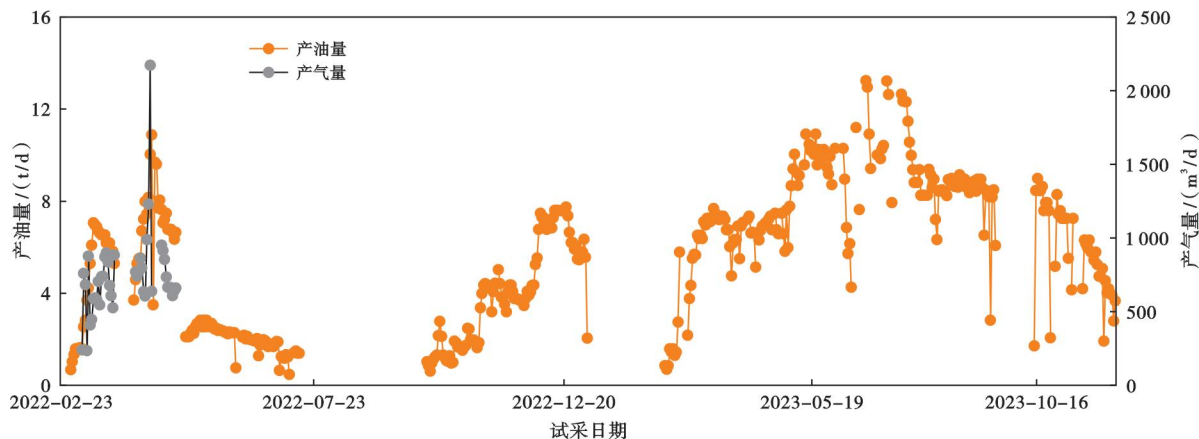


图 18 NY1H 井试采曲线

Fig. 18 Test production curve of Well NY1H

嫩二段页岩油具有 TOC 含量高、气油比较高、处于常压地层的特征, 在生产过程中呈现出初期高产、阶段稳产的生产规律, 证实了该类中—低成熟页岩油具有较好的资源潜力。NY1H 井的勘探实践开辟了松辽盆地北部低成熟页岩油勘探的新类型和新层系, 实现了低成熟度含黏土质页岩产油、低成熟度较高气油比页岩油生产以及低成熟页岩油连续生产 3 大突破, 极大地拓展了陆相页岩油的规模增储空间, 为中国陆相页岩油规模勘探开发奠定了坚实的资源基础, 极大地助力了中国陆相页岩革命。

## 5 结论

(1) 松辽盆地在嫩江组沉积期发生了最大规模的湖侵, 形成了一套厚度大、平面分布广的暗色优质页岩。该套页岩是良好的生油层系, 其有机质含量高, 含油性好, 有机质类型以 I 型、II<sub>1</sub> 型和 II<sub>2</sub> 型为主, 有机质的热演化程度处于低成熟阶段。

(2) 嫩江组页岩的矿物组成以长英质为主, 页岩储层的储集空间以纳米级为主, 主要发育粒间孔、粒内孔、黄铁矿晶间孔及少量有机质孔和溶蚀孔。有效储层的孔径峰值主要分布在 64~128 nm。

(3) 松辽盆地嫩江组属于深湖—半深湖沉积, 在温暖湿润的古沉积环境背景下, 藻类的勃发为优质烃源岩的形成奠定了环境基础, 咸化、厌氧、富硫的湖底水环

境为有机质的保存提供了优良的条件。广覆式湖相沉积形成的优质烃源岩与多类型微米—纳米储集空间的耦合控制了页岩油的富集, 共同造就了具有中—低成熟度、源—储—体、连续富集特征的嫩江组页岩油藏。

(4) 综合烃源岩特性、含油性和矿物组成等关键参数, 建立了以有机质发育程度为主兼顾含油性的低成熟页岩油富集层优选方法, 其中, 嫩二段是最优质的“甜点层”, 其次是嫩一段中部。采用体积法初步估算嫩江组页岩油的总资源量超过  $100 \times 10^8$  t, 资源潜力巨大。

(5) 松辽盆地北部嫩江组低成熟页岩油获得的勘探重大突破不仅证实了嫩江组的资源潜力, 同时开辟了页岩油勘探的新类型与新层系。通过合理的增产改造技术手段及科学的举升方式, 能够实现资源的有效动用, 助力未来油气资源的增储上产。

## 参考文献

- [1] 焦方正, 邹才能, 杨智. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1067-1078.  
JIAO Fangzheng, ZOU Caineng, YANG Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1067-1078.
- [2] 杨智, 邹才能. “进源找油”: 源岩油气内涵与前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 173-184.  
YANG Zhi, ZOU Caineng. “Exploring petroleum inside source kitchen”: connotation and prospects of source rock oil and gas[J]. Petrole-