

文章编号: 0253-2697(2024)12-1699-16 DOI:10.7623/syxb202412001

松辽盆地古龙页岩油重点地区资源潜力

孙龙德^{1,2} 贾承造² 张君峰^{1,3} 崔宝文^{1,4} 白静^{1,3} 霍秋立^{1,5}
徐兴友^{1,3} 刘卫彬^{1,3} 曾花森^{1,5} 刘伟^{1,6}

(1. 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; 2. 中国石油天然气集团有限公司 北京 100007;
3. 中国地质调查局油气资源调查中心 北京 100083; 4. 大庆油田有限责任公司 黑龙江大庆 163453;
5. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712; 6. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要:松辽盆地是中国已采出油气最多的大型超级盆地,古龙页岩油勘探评价已取得战略性突破,但资源潜力和规模尚不明确。基于古龙页岩的有机碳、岩石热解、镜质体反射率、保压岩心游离烃含量等大量地球化学分析数据,结合测井资料和生产数据,系统开展了以齐家—古龙凹陷为主的多类型页岩油的资源评价。建立了以有机质成熟度、储集类型等为核心指标的松辽盆地页岩油分类方案,制定了以总有机碳、含油量、有效孔隙度和含油饱和度等为核心参数的页岩油分级标准,形成了以含油量精细评价、游离烃恢复和可采系数标定等为核心技术的页岩油资源评价方法。基于生产动态数据,对页岩油的地质资源量进行了现有工艺技术条件下的技术可采资源潜力评估,实现了页岩油资源可利用性预测分析。综合评价认为:松辽盆地齐家—古龙凹陷中—高成熟页岩油的地质资源量为 $107.73 \times 10^8 \text{ t}$ (其中,I级地质资源量为 $42.08 \times 10^8 \text{ t}$,II级地质资源量为 $33.67 \times 10^8 \text{ t}$),技术可采资源量超过 $8 \times 10^8 \text{ t}$;溶解气的地质资源量为 $1.75 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量为 $0.13 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。资源评价结果显示,松辽盆地古龙页岩油的有利资源主要分布在齐家—古龙凹陷,是松辽盆地重要的战略接替资源,预计在未来随着开采技术升级,页岩油的可动用潜力将进一步增大。

关键词:松辽盆地;古龙页岩油;页岩油分类;地质资源分级评价;技术可采资源评价

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Resource potential of Gulong shale oil in the key areas of Songliao Basin

Sun Longde^{1,2} Jia Chengzao² Zhang Junfeng^{1,3} Cui Baowen^{1,4} Bai Jing^{1,3} Huo Qiuli^{1,5}
Xu Xingyou^{1,3} Liu Weibin^{1,3} Zeng Huasen^{1,5} Liu Wei^{1,6}

(1. National Key Laboratory for Green Mining of Multi-resource Collaborative Continental Shale Oil, Heilongjiang Daqing 163712, China; 2. China National Petroleum Corporation, Beijing 100007, China; 3. Oil and Gas Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 4. Daqing Oilfield Limited Company, Heilongjiang Daqing 163453, China; 5. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Limited Company, Heilongjiang Daqing 163712, China; 6. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: As the super and most petroliferous basin in China, Songliao Basin has achieved strategic breakthroughs in the exploration and evaluation of Gulong shale oil, of which the potential and scale of resources remain unclear. Based on the extensive geochemical data including total organic carbon (TOC), rock pyrolysis, vitrinite reflectance and pressure-reserved core, in combination with logging and production data, a systematic evaluation was conducted on various types of shale oil, primarily in Qijia-Gulong sag. A classification scheme using organic matter maturity and reservoir type as key indicators was developed for shale oil in Songliao Basin. As a result, grading standards for shale oil were established based on the key parameters such as TOC content, oil content, effective porosity, and oil saturation. A shale oil resource evaluation method was created, involving the key technologies such as precise evaluation of oil content, light hydrocarbon recovery and calibration of recoverable coefficient. Based on dynamic production data, the geological resource potential of shale oil under current technological conditions was assessed, achieving the predictive analysis of resource recoverability. The comprehensive evaluation indicates that Qijia-Gulong sag contains medium- to high-maturity shale oil resources of $107.73 \times 10^8 \text{ t}$ (including $42.08 \times 10^8 \text{ t}$ of Class I resources and $33.67 \times 10^8 \text{ t}$ of Class II resources), with technically recoverable resources exceeding $8 \times 10^8 \text{ t}$. Additionally, the geological resources of dissolved gas are estimated to be $1.75 \times 10^{12} \text{ m}^3$, and the technically recoverable resources amount to $0.13 \times 10^{12} \text{ m}^3$. The resource evaluation results suggest that the favorable shale oil resources in

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“全国页岩油资源潜力评价项目”(DD20242404)资助。

第一作者:孙龙德,男,1962年3月生,2000年获中国科学院地质与地球物理研究所博士学位,现为中国工程院院士、中国石油天然气股份有限公司教授级高级工程师,长期从事油气勘探开发研究工作。Email:sunld-tlm@petrochina.com.cn

通信作者:张君峰,男,1971年9月生,2005年获中国石油勘探开发研究院博士学位,现为中国地质调查局油气资源调查中心教授级高级工程师,主要从事油气调查与资源评价研究工作。Email:zhangjunfeng@cgs.gov.cn

Songliao Basin are mainly distributed in Qijia-Gulong sag, as being the essential strategic replacement resource. With future advancements in development technologies, the recoverable potential of shale oil is expected to increase significantly.

Key words: Songliao Basin; Gulong shale oil; shale oil classification; geological resource grading evaluation; technically recoverable resource evaluation

引用: 孙龙德, 贾承造, 张君峰, 崔宝文, 白静, 霍秋立, 徐兴友, 刘卫彬, 曾花森, 刘伟. 松辽盆地古龙页岩油重点地区资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(12): 1699-1714.

Cite: SUN Longde, JIA Chengzao, ZHANG Junfeng, CUI Baowen, BAI Jing, HUO Qiuli, XU Xingyou, LIU Weibin, ZENG Huasen, LIU Wei. Resource potential of Gulong shale oil in the key areas of Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(12): 1699-1714.

中国陆相页岩油资源潜力大^[1-3], 已经成为常规油气重要且现实的资源接替领域^[4-6]。近年来, 中国已在松辽盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、渤海湾盆地、四川盆地和柴达木盆地等大型含油气盆地实现页岩油勘探重大突破, 相继获批建设吉木萨尔、古龙和济阳3个国家页岩油示范区^[7-9]。陆相页岩油展现出广阔的发展前景, 对保障国家能源需求和实现“稳油增气”发展目标发挥着重要的支撑作用^[10]。

松辽盆地是中国油气资源最为富集的大型超级盆地之一, 上白垩统青山口组、嫩江组富有机质页岩广泛发育^[11-13], 是盆地最主要的烃源岩层系, 也是页岩油资源潜力最大的层系。古龙页岩指松辽盆地上白垩统含丰富有机质、具有一定成熟度和成岩演化程度的深水细粒纹层状岩系^[11]。古龙页岩油指在这类岩系中富集的、经过人工改造后有经济开发价值的油气^[11]。从地区分布来看, 古龙页岩主要集中分布在齐家—古龙凹陷、三肇凹陷、长岭凹陷和大庆长垣凹陷的南部地区, 以齐家—古龙凹陷为主^[12-14]。近年来, 古龙页岩油勘探实现了历史性重大战略突破。2020年, 古页油平1井在青山口组纯页岩层系内获得页岩油高产突破; 2021年, 古龙陆相页岩油国家级示范区获批建立^[15-16]。页岩油勘探的快速发展和页岩油示范区的建设都需要夯实页岩油的资源家底, 落实不同级次、不同类型、不同序列的页岩油资源规模与分布, 为页岩油的梯次勘探开发部署提供资源支撑^[17-19]。

随着古龙页岩油的勘探实践逐渐深入, 学者们对古龙页岩油的资源潜力进行了评价, 认识逐步清晰, 但目前仍存在一定的局限性: ①松辽盆地页岩油类型多, 尚未形成统一的页岩油类型划分方案, 不同类型页岩油资源评价方法与参数标准体系有待完善; ②缺乏页岩油分区分级的评价认识, 难以有效支撑页岩油勘探开发规划部署与战略决策; ③缺乏基于生产动态资料的页岩油技术可采潜力评估, 页岩油可动用潜力有待落实。

为支撑松辽盆地古龙页岩油勘探开发快速发展,

系统认识松辽盆地整体页岩油资源潜力, 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室组织多家单位联合开展了松辽盆地页岩油资源评价。在整体研究的基础上, 针对松辽盆地页岩油的地质特征, 建立了不同类型页岩油资源的分级评价标准, 明确了松辽盆地白垩系页岩油资源规模与分布规律。按照现有开发工艺技术条件, 开展了中—高成熟页岩型和砂质混合型页岩油技术可采资源潜力分析。笔者着重介绍松辽盆地古龙页岩油富集的重点地区齐家—古龙凹陷页岩油资源评价的结果与认识, 以期为其他地区页岩油资源评价提供借鉴与参考。

1 古龙页岩油特征与勘探开发现状

1.1 古龙页岩油发育特征

晚白垩世, 松辽盆地处于大型淡水—微咸水湖相沉积环境, 沉积了嫩江组和青山口组2套湖相优质页岩, 为页岩油的形成与富集奠定了物质基础^[20-22]。平面上, 古龙页岩油主要分布在齐家—古龙凹陷、三肇凹陷、大庆长垣凹陷南部和长岭凹陷[图1(a)]。其中, 在页岩油形成与富集地质条件上, 齐家—古龙凹陷最为有利, 页岩油资源品质最好^[23-24]。纵向上, 古龙页岩油富集层主要分布在青山口组一段(青一段)—青山口组二段(青二段)下部、嫩江组一段(嫩一段)下部和嫩江组二段(嫩二段)^[25-26][图1(b)]。

与国外海相页岩盆地和国内其他陆相盆地相比, 松辽盆地古龙页岩油的发育具有独特性, 表现出中等有机质丰度、较高成熟度、高游离烃含量和页理缝发育的地质优势。此外, 古龙页岩具有流体相态复杂、黏土矿物含量高突出的工程技术难点^[11-12, 27-29]。

整体上, 青山口组页岩有机质丰度高, 现今页岩残留的总有机碳(TOC)含量为1.5%~4.0%, TOC含量大于2%的页岩厚度为80~120 m。页岩有机质类型主要为I型, 氢指数(HI)为600~800 mg/g, 生烃潜力大。页岩的游离烃(S_1)含量高, 分布在2~15 mg/g, 平均为7 mg/g, 局部发育高值段, 在齐家—古龙凹陷页岩油勘探主体区, 页岩的 S_1 含量达10 mg/g以上。青山

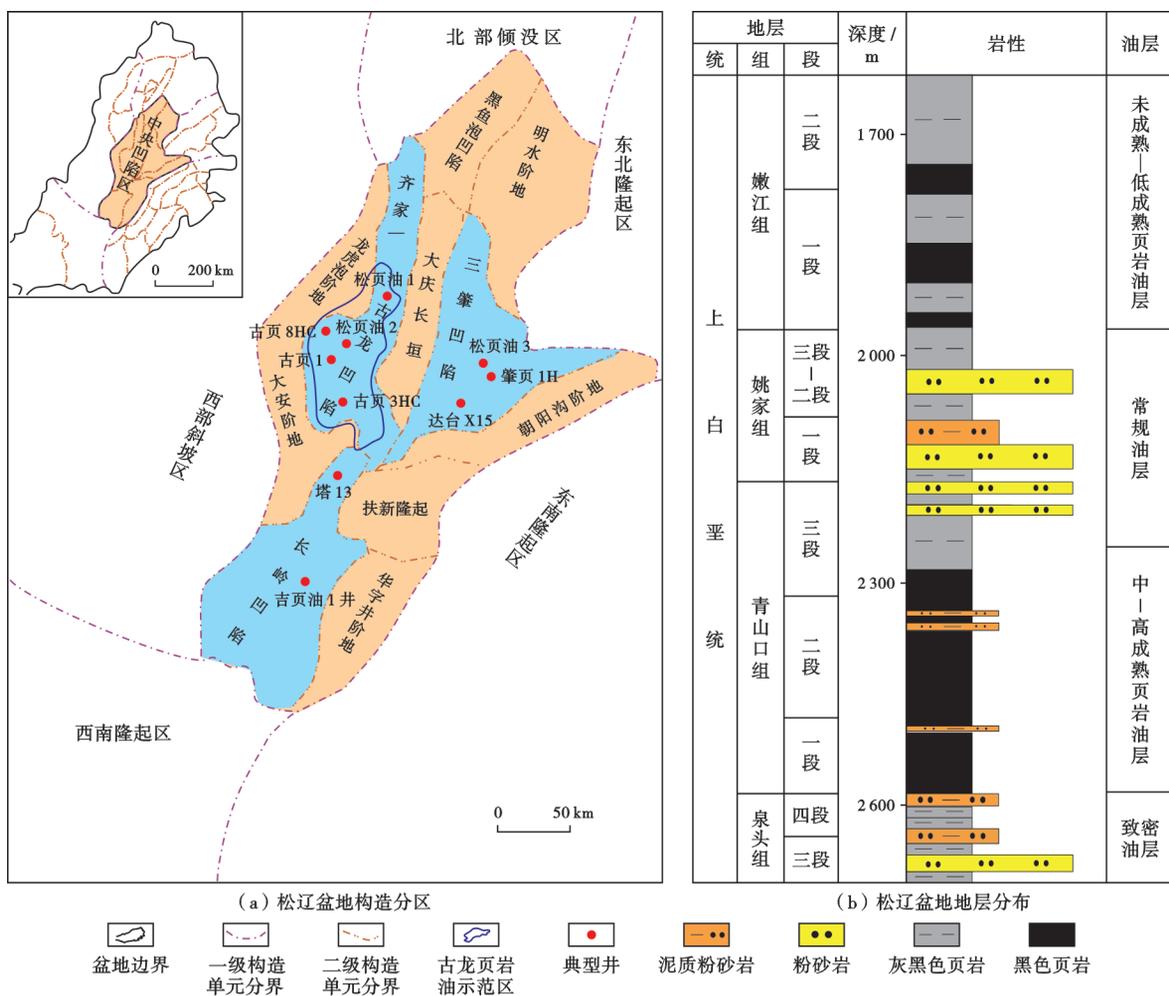


图 1 松辽盆地构造单元分区与古龙页岩油层位分布
Fig. 1 Tectonic unit division of Songliao Basin and strata of Gulong shale oil

口组页岩的热演化程度相对较高,页岩成熟范围广,以青一段为例,镜质体反射率(R_o) $>0.75\%$ 的成熟页岩面积超过 $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,在齐家—古龙凹陷深凹区,页岩的成熟度更高, R_o 为 $1.2\% \sim 1.7\%$ 。

嫩江组页岩有机质丰度高,现今残留的 TOC 含量主体为 $1.0\% \sim 4.0\%$,最高可达 15.6% ,页岩有机质以 I 型、II₁ 型为主,页岩生烃潜力大,HI 为 $600 \sim 800 \text{ mg/g}$ 。在埋深超过 1750 m 、 $R_o > 0.75\%$ 的嫩江组页岩段,游离烃富集, S_1 含量为 $2 \sim 7 \text{ mg/g}$,含油饱和度指数(S_1 与 TOC 含量的比值,OSI)可达 100 mg/g 。然而,嫩江组页岩的热演化程度相对较低, R_o 整体为 $0.5\% \sim 0.8\%$,以嫩一段为例, $R_o > 0.75\%$ 的成熟页岩的面积不足 1500 km^2 ,仅分布在齐家—古龙凹陷的深凹部位。

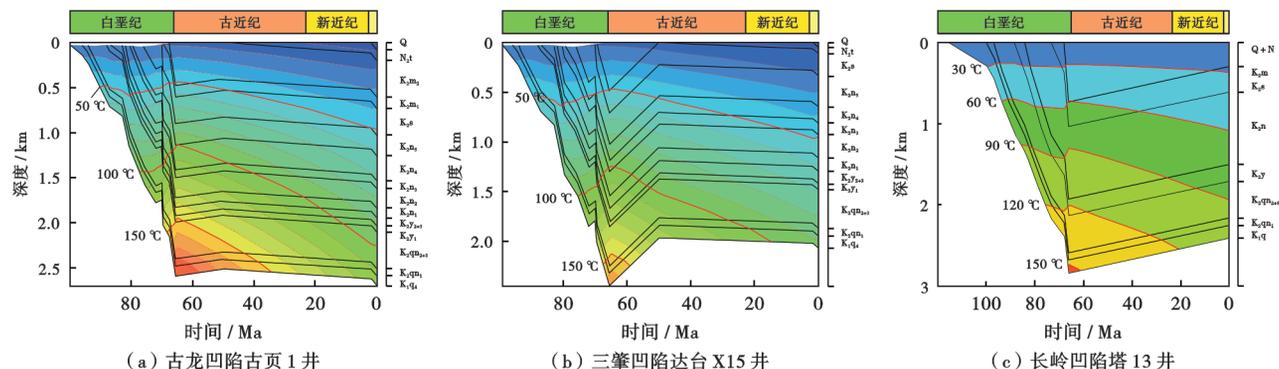
古龙页岩的突出特征之一是黏土矿物含量高,黏土矿物在古龙页岩油形成与富集过程中发挥了重要作用。古龙页岩中发育大量黏土有机复合体,黏土矿物的抑制作用增加了反应的活化能,扩大了页岩油的生

成窗口,黏土矿物的加氢作用降低了歧化反应速度,增加了页岩油的轻烃产率,页岩油中的轻质组分含量高^[24]。页岩储集空间的形成与溶蚀和生烃作用有关,构成了页岩特有的纳米级孔缝—微米级页理缝双重介质的储集层,高密度分布的有机质生烃缝和微米—纳米级溶蚀孔提高了储层的储集和渗流能力。孙龙德等^[24]在古龙页岩中发现了纳米级有机黏土复合孔缝,提出成熟—高成熟演化阶段的页岩油主要富集在溶蚀孔和有机黏土复合孔缝内。古龙页岩具有全孔径含油特征,页岩油具有“原生、原储、原位”成藏特征,不同孔径中的页岩油具有不同的相态和流动性。热演化程度越高,孔缝越发育,地层压力越大,越有利于形成页岩油高产稳产富集区^[22-23]。

区域构造演化是控制齐家—古龙凹陷页岩油高效富集的主要因素。松辽盆地在嫩江组沉积晚期发生转化,由伸展盆地变为挤压盆地,构造抬升作用从东南隆起区向盆地内扩展,沉积中心逐渐向 NW 迁移,晚期差异构造抬升作用导致松辽盆地主要生烃凹陷的构造

抬升启动时间和抬升幅度存在明显不同,南部地区的构造抬升时间要比北部地区早 10~15 Ma。三肇凹陷的抬升作用发生在嫩江组沉积晚期。嫩江组沉积末期,长岭凹陷开始抬升,齐家—古龙凹陷持续沉降,直到明水组沉积末期才开始抬升^[30](图 2)。因此,齐家—古龙凹陷持续埋藏时间长,构造抬升作用发生较

晚,其烃源岩的演化程度明显高于长岭凹陷和三肇凹陷,其原油性质受烃源岩成熟度控制,成熟度越高,页岩中的游离烃含量越高,原油密度和黏度越小,油质越轻,易于高产。此外,晚期构造抬升作用还控制了地层能量。齐家—古龙凹陷的地层压力系数高,最高可达 1.58,有利于页岩油高产。



注:Q—第四系;N—新近系;N₂t—泰康组;K₂m—明水组;K₂m₂—明水组二段;K₂m₁—明水组一段;K₂s—四方台组;K₂n—嫩江组;K₂n₅—嫩江组五段;K₂n₄—嫩江组四段;K₂n₃—嫩江组三段;K₂n₂—嫩江组二段;K₂n₁—嫩江组一段;K₂y—姚家组;K₂y₂₊₃—姚家组二段+三段;K₂y₁—姚家组一段;K₂qn₂₊₃—青山口组二段+三段;K₂qn₁—青山口组一段;K₁q—泉头组;K₁q₄—泉头组四段;K₁q₂₊₃—泉头组二段+三段;K₁q₁—泉头组一段。

图 2 松辽盆地齐家—古龙凹陷、三肇凹陷和长岭凹陷典型井的地层埋藏史

Fig. 2 Burial histories for typical wells in Qijia-Gulong sag, Sanzhao sag, and Changling sag of Songliao Basin

1.2 古龙页岩油勘探开发现状

古龙页岩油主要经历了勘探评价、先导试验和扩大试验等发展阶段^[12-13,31-32]。2018年,大庆油田有限责任公司(大庆油田)在松辽盆地北部的古龙凹陷部署钻探了古页1井进行系统取心,基于厘米级岩心的精细描述和实验样品的联合测试,建立了“铁柱子”井,明确了古龙页岩油在纵向上的储集能力和富油层段。古页油平1井试油获得了自喷产油量为30.5 t/d、天然气产量为13 032 m³/d的高产工业油气流,实现了在高黏土矿物含量的纯页岩层内页岩油产量的重大突破。基于此,大庆油田在齐家—古龙凹陷等地区部署了32口直井、25口水平井,系统取心42口井,岩心长度超过8 100 m,完成了5大类60项80 000余次样品分析化验。2021年,大庆油田计算古龙页岩油的预测地质储量为12.68×10⁸ t,成功设立古龙陆相页岩油国家级示范区。该示范区覆盖面积为2 778 km²[图1(a)],设计水平井500口,计划在2025年实现产油量达100×10⁴ t以上。2023年,计算古页1区块青山口组页岩油的探明地质储量为2.04×10⁸ t,古页1区块成为中国页岩油单体规模最大储量区。随着古龙页岩油开发试验技术的逐步提升,古龙页岩油的单井产油量由5.5 t/d提高至21.2 t/d,单井最终可采储量(EUR)由0.8×10⁴ t提高至2.7×10⁴ t,初步实现了高黏土矿物含量页岩油的效益开发。

2 古龙页岩油类型划分与资源评价方法

2.1 页岩油类型

页岩油类型划分是页岩油资源评价的基础,不同类型页岩油的富集机制不同,资源评价方法与参数体系差别较大^[33-35]。根据松辽盆地发育全序列页岩类油气的地质背景,充分考虑未来的开发方式,为方便快速评价和计算页岩油资源量,遵循页岩油评价相关标准和规范并参考前人的页岩油类型划分方案^[36-37],笔者提出了古龙页岩油类型的划分方案(图3)和评价标准(表1)。

以产油层能否生油为依据,将页岩油划分为页岩型页岩油和混合型页岩油2大类^[5]。

页岩型页岩油以页岩生油、页岩储油为主,源-储一体,页岩油以游离态和吸附态赋存于页岩的纳米级孔隙和页理中,为原位滞留成藏。考虑现有和未来的不同开发工艺条件,以页岩成熟度为依据,将页岩型页岩油进一步划分为未成熟页岩型页岩油(埋深>200 m, R₀<0.5%,无可动烃,可以原位地下加热的方式开采)、低成熟页岩型页岩油(0.5%<R₀≤0.75%,有一定的可动烃,可以原位加热的方式开采)和中-高成熟页岩型页岩油(R₀>0.75%,有大量可动烃,可以水平井体积压裂方式规模化开采)3种类型。

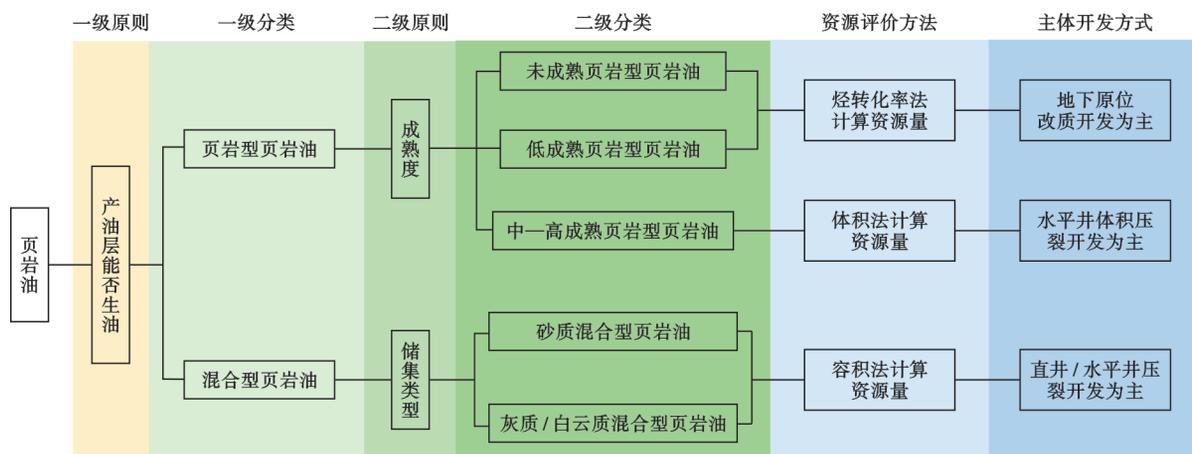


图 3 松辽盆地古龙页岩油类型划分方案

Fig. 3 Classification of Gulong shale oil in Songliao Basin

表 1 松辽盆地古龙页岩油主要类型与划分标准

Table 1 Main types and classification criteria for Gulong shale oil in Songliao Basin

页岩油类型	主要划分依据	主要赋存特征	主要地质特征	主要开发方式	地层
页岩型 低成熟页岩型页岩油	$0.50\% < R_o < 0.75\%$	已生成的油以吸附态为主 + 尚未转化有机质	源-储一体, 页岩整体含油, 高 TOC 含量, 高生烃潜力	化学方式: 地下原位改质	嫩一段 嫩二段
中一高成熟页岩型页岩油	$R_o > 0.75\%$, 砂岩单层厚度 $< 2\text{m}$, 砂地比 $\leq 10\%$	游离态 + 吸附态	源-储一体, 页岩整体含油, 纹层或页理缝富集, 高 TOC 含量, 高含油率	物理方式: 水平井 + 体积压裂	青一段 青二段 嫩一段 嫩二段
混合型 砂质混合型页岩油	砂岩单层厚度为 $2\sim 5\text{m}$, 砂地比为 $10\%\sim 30\%$	游离态	源-储共存, 薄砂岩层“甜点”富集	物理方式: 直井/水平井 + 体积压裂	青一段 青二段

注: R_o —镜质体反射率; TOC—总有机碳。

混合型页岩油储层本身不具备生油能力, 页岩油赋存在富含有机质页岩层系的粉砂岩、细砂岩和碳酸盐岩中, 单层厚度小, 源-储共存, 源岩与储层互层叠置。根据主要储层类型, 可将混合型页岩油划分为以砂岩为主的砂质型页岩油和灰质/白云质型页岩油 2 类。

松辽盆地白垩系主要发育低成熟页岩型页岩油、中一高成熟页岩型页岩油、砂质混合型页岩油 3 种类型的页岩油资源。低成熟页岩型页岩油主要发育在嫩一段和嫩二段; 中一高成熟页岩型页岩油主要发育在青一段和青二段, 在嫩一段和嫩二段深埋区也有分布; 砂质混合型页岩油主要发育在青二段和青一段(表 1)。由于尚未开展针对松辽盆地低成熟页岩型页岩油的研究与试验, 此次页岩油评价主要针对松辽盆地中一高成熟页岩型页岩油和砂质混合型页岩油开展地质与可采潜力评价。

2.2 资源评价方法

2.2.1 页岩型页岩油

国内外中一高成熟页岩型页岩油资源评价方法包括成因法、类比法和统计法等多种方法, 各有其适用性^[38-39]。成因法目前只能用于评价页岩总滞留油量; 类比法需要建立页岩油刻度区, 但考虑到目前页岩油

尚处于勘探开发的早期, 刻度区参数体系的建设尚不完善, 类比条件还不具备。基于松辽盆地古龙页岩油的地质特征和扎实的分析测试数据, 评价主要采用统计法, 统计法主要采用体积法和容积法。

中一高成熟页岩型页岩油表现为连续分布的原位滞留油藏, 资源评价的理念是评价页岩内滞留的游离烃规模, 确定页岩油的地质资源量^[40]。页岩游离烃量的确定方法有直接测定和间接测定 2 种^[41-42]。其中, 直接测定法目前主要采用岩石热解法^[43-44]; 间接测定法则分别测定页岩的总含油量和吸附油量, 再通过差减法获得游离烃量^[41]。与间接测定法相比, 直接测定法的相对误差更小, 而且数据的可获得性和丰富性都要更好, 因此, 此次页岩油资源评价的游离烃量主要采用易于取得、数据丰富的岩石热解参数表征。资源量的计算主要采用体积法:

$$Q = 0.1 \times \rho_r \times A \times h \times S_1 \times K_{S1} \quad (1)$$

在评价中, 项目团队研发了基于数值空间建模技术的页岩油资源评价软件系统 (ShaleOilAssess V1.0), 实现了页岩油关键参数空间分布的预测与资源量计算, 解决了地质参数空间分布非均质性的难题, 提高了资源量计算的精确度。

2.2.2 砂质混合型页岩油

砂质混合型页岩油藏表现为连续性聚集弹性驱动的页岩油藏^[45]。该类型页岩油的资源量计算以运移聚集为理论依据,以容积法为主。基于目前松辽盆地青山口组砂质混合型页岩油的勘探现状,评价主要采用基于孔隙度的小面元容积法计算砂质混合型页岩油的地质资源量。其体积法的计算式为:

$$Q = 100 \times A \times h \times \phi \times S_o \times \rho_o / B_o \quad (2)$$

3 古龙页岩油资源评价参数

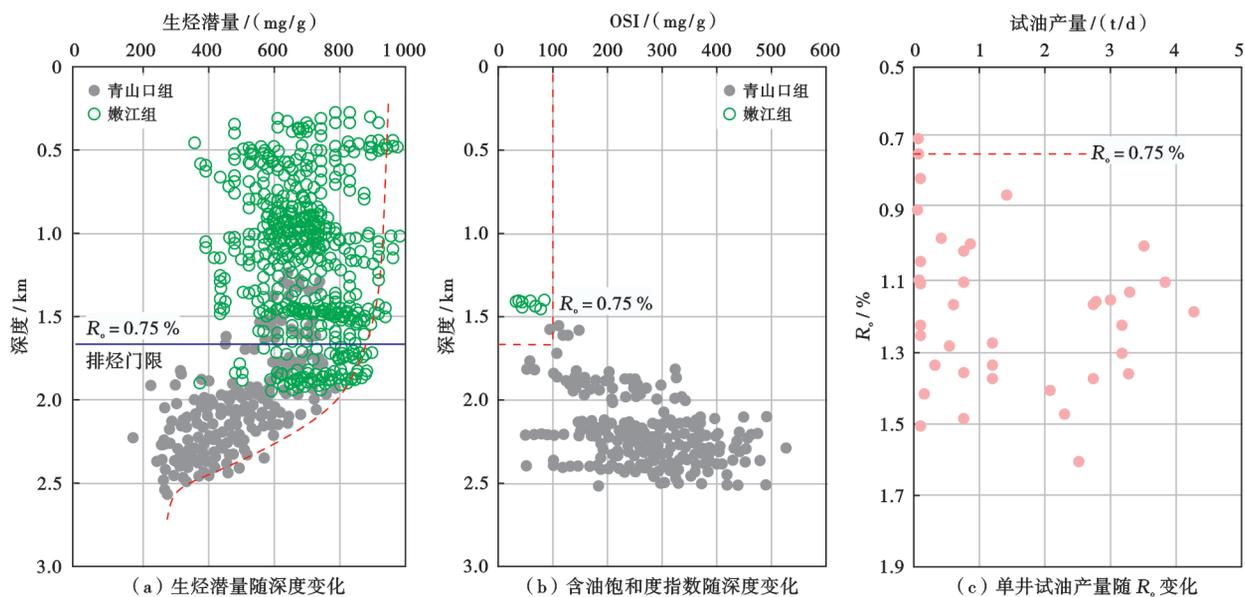
3.1 资源量计算的起评下限

3.1.1 中—高成熟页岩型页岩油资源的起评下限

页岩油资源评价起评条件的确定是现阶段页岩油资源评价的主要难题之一^[46-48]。合理确定不同类型页岩油关键参数的界限,是科学评价页岩油资源潜力的关键^[49]。

中—高成熟页岩型页岩油主要为页岩中原位富集的可流动的烃类资源,成熟度的起算界限是中—高成熟页岩型页岩油评价的关键。表征页岩油资源富集程度的参数如 TOC 和 S_1 ,其起算界限的认识相对统一,但表征页岩成熟度和页岩油流动能力的参数如 R_o ,其起算标准在各盆地中的认识差异就较大。在评价中,笔者基于松辽盆地青山口组和嫩江组页岩油的地质条件,结合勘探实际,建立了“以页岩有机质生烃演化为基础,页岩油赋存特征和原油性质为核心,页岩储层演化为约束,勘探实践为根本”的中—高成熟页岩型页岩

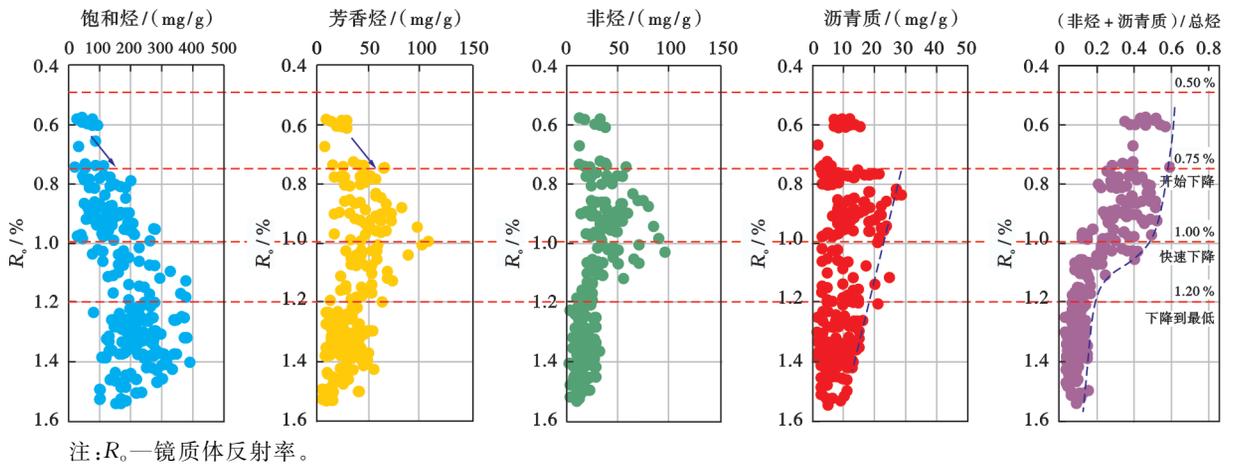
油成熟度起评界限确定方案。首先,根据饱和排烃理论,青山口组和嫩江组页岩在 R_o 为 0.75% 时达到饱和吸附量,生烃潜量($S_1 + S_2$)开始降低,反映此时在地层条件下可以产/排油[图 4(a)]。松辽盆地古龙页岩油保压岩心(18 口井,384 块样品)的含油量分析表明[图 4(b)],当 $R_o > 0.75%$ 时,青山口组和嫩江组页岩中有机质的吸附油量普遍达到饱和,具有石油超越效应,即 OSI 超过有机质的饱和吸附量(一般取 100 mg/g)。岩心热模拟实验和不同成熟度页岩油的赋存状态实测证实:当 R_o 为 0.50%~0.75% 时,页岩内的滞留烃以干酪根溶胀吸附烃为主;当 $R_o > 0.75%$ 时,页岩内的游离烃含量开始增加,在 R_o 达到 1.00% 后,进入游离烃富集高峰阶段。古龙页岩油的单井试油产量与 R_o 的关系[图 4(c)]显示,当 $R_o > 0.75%$ 时,试油均可见油流,而在此界限以下的试油结果主要为干层,且随 R_o 增加,试油产量总体呈增加趋势。从滞留油的族组成(图 5)来看: $R_o > 0.75%$ 时,非烃+沥青质的比例开始下降; R_o 约为 1.0% 时,非烃+沥青质的比例快速下降; R_o 约为 1.2% 时,非烃+沥青质的比例降到最低,此后变化不大。此外,页岩的成岩演化分析表明:当 $R_o > 0.75%$ 时,青山口组页岩储层的成岩演化达到中成岩阶段 A2 期,无机矿物的转化达到关键点,蒙脱石达到消亡线,伊利石含量占主体,有利于水力压裂改造^[11,24]。综合上述生烃演化、滞留烃组分演化和页岩储层成岩演化规律确定, $R_o > 0.75%$ 为松辽盆地中—高成熟页岩型页岩油资源评价的成熟度参数下限。



注:OSI—含油饱和度指数; R_o —镜质体反射率。

图 4 松辽盆地青山口组和嫩江组页岩生烃潜量、含油饱和度指数与埋深的关系,以及单井试油产量与 R_o 的关系

Fig. 4 Variation of hydrocarbon generation potential and oil saturation index of Qingshankou Formation and Nenjiang Formation shale with burial depth, and variation of oil production per well with R_o , Songliao Basin

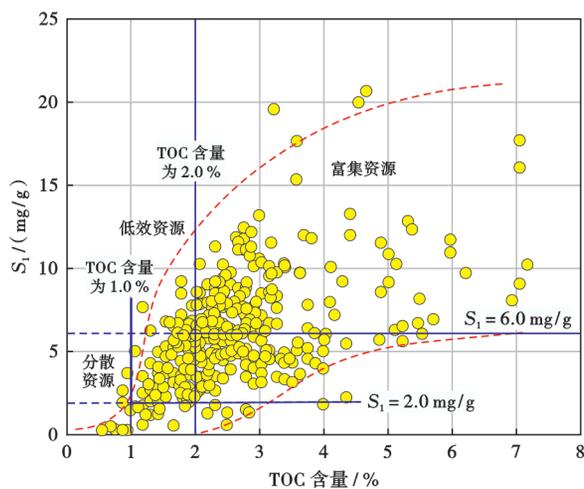


注: R_o —镜质体反射率。

图 5 松辽盆地古龙页岩滞留油的族组成与 R_o 的关系

Fig. 5 Variation of group composition of residual shale oil with R_o in Gulong area of Songliao Basin

油气资源只有达到一定的富集程度,才具有技术经济开采的价值。卢双舫等^[50]对渤海湾盆地、江汉盆地和南襄盆地等盆地的页岩进行了分析并提出基于含油性与 TOC 含量关系的“三分性”特征,用以对页岩油资源的富集程度进行评价,该方法具有普遍适用性。笔者基于松辽盆地古龙页岩油保压密闭取心资料,采用保压岩心的岩石热解和 TOC 含量分析数据,建立了 TOC 含量与 S_1 的三分关系(图 6)。从图 6 可以看出:当 TOC 含量 $< 1.0\%$ 、 $S_1 < 2.0 \text{ mg/g}$ 时,页岩油资源为分散(无效)资源;当 TOC 含量为 $1.0\% \sim 2.0\%$ 、 S_1 为 $2.0 \sim 6.0 \text{ mg/g}$ 时,页岩油资源为低效资源;当 TOC 含量 $> 2.0\%$ 、 $S_1 > 6.0 \text{ mg/g}$ 时,页岩油资源为富集资源。由此,确定了 TOC 含量 $> 1.0\%$ 且 $S_1 > 2.0 \text{ mg/g}$ 为页岩型页岩油资源的起评下限。



注: S_1 —游离烃; TOC—总有机碳。

图 6 松辽盆地青山口组和嫩江组保压岩心 TOC 含量与 S_1 的关系

Fig. 6 Relationship between TOC content and S_1 of pressure-reserved core samples from Qingshankou Formation and Nenjiang Formation in Songliao Basin

3.1.2 砂质混合型页岩油资源的起评下限

砂质混合型页岩油主要为近源运移的石油,其油藏特征与致密油相似,资源评价可以采用与致密油资源评价相同的方法,其关键参数是含油饱和度和孔隙度。通过松辽盆地砂质混合型页岩油产油井的采油强度和含油饱和度与孔隙度的相关分析确定,有效孔隙度的起评下限为 4.0% [图 7(a)],含油饱和度的起评下限为 40% [图 7(b)]。

3.2 关键参数取值方法

在页岩油资源评价中,关键参数的确定是资源量计算的基础^[51]。依据不同类型页岩油的资源评价方法,中—高成熟页岩型页岩油评价的关键参数主要为游离烃量、轻烃恢复系数和页岩有效厚度等;砂质混合型页岩油评价的关键参数主要为储层有效厚度、有效孔隙度和含油饱和度等。

3.2.1 游离烃量

页岩中的游离烃量主要采用岩石热解参数表征,但目前业界对于热解温度仍存在争议。例如:石油天然气行业标准 SY/T 7661—2022^[52]规定,游离烃量的热解温度为 $350\text{ }^\circ\text{C}$;而国家标准 GB/T 18602—2012^[53]规定,游离烃量的热解温度为 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 。为了准确测得松辽盆地页岩中的游离烃量,笔者针对青山口组页岩在不同温度条件下的游离烃开展了分步热解气相色谱对比实验。当采用 GB/T 18602—2012 标准中的热解方案^[53]时,设置热解温度大于 $300\text{ }^\circ\text{C}$,在气相色谱检测中发现页岩几乎不含游离烃,但页岩中开始出现干酪根裂解烃。而当采用 SY/T 7661—2022 标准中的分步热解方案^[52]时,对青山口组不同成熟度页岩开展的热解气相色谱检测结果显示:当温度升高到 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,页岩中开始出现大量干酪根裂解烃,即轻质—中质游离烃中只有少量游离烃,包括了大量干酪根裂解烃。上述

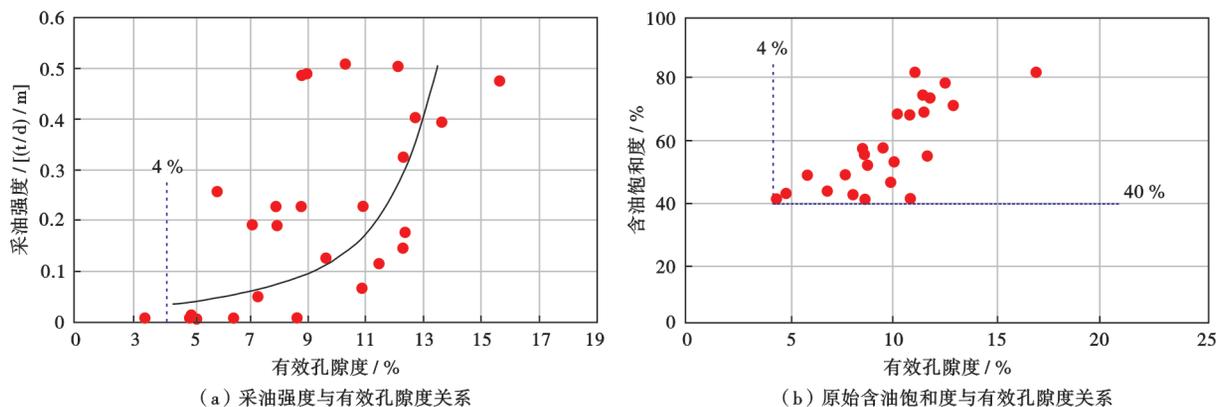


图7 松辽盆地青山口组砂质混合型页岩油的采油强度和含油饱和度与有效孔隙度的关系

Fig. 7 Variation of oil recovery intensity and oil saturation of sandy mixed shale oil with effective porosity in Qingshankou Formation, Songliao Basin

对比实验分析表明,对于青山口组页岩中的游离烃量,采用岩石热解最高温度 300℃ 是符合实验结果的,能够准确反映其中的游离烃量。

在上述实验基础上,笔者基于大量常规岩心热解的 S_1 数据并校正,结合页岩含油量的测井计算,编制了松辽盆地不同层位页岩的含油量分布图(图8)。

3.2.2 游离烃恢复系数(K_{S_1})

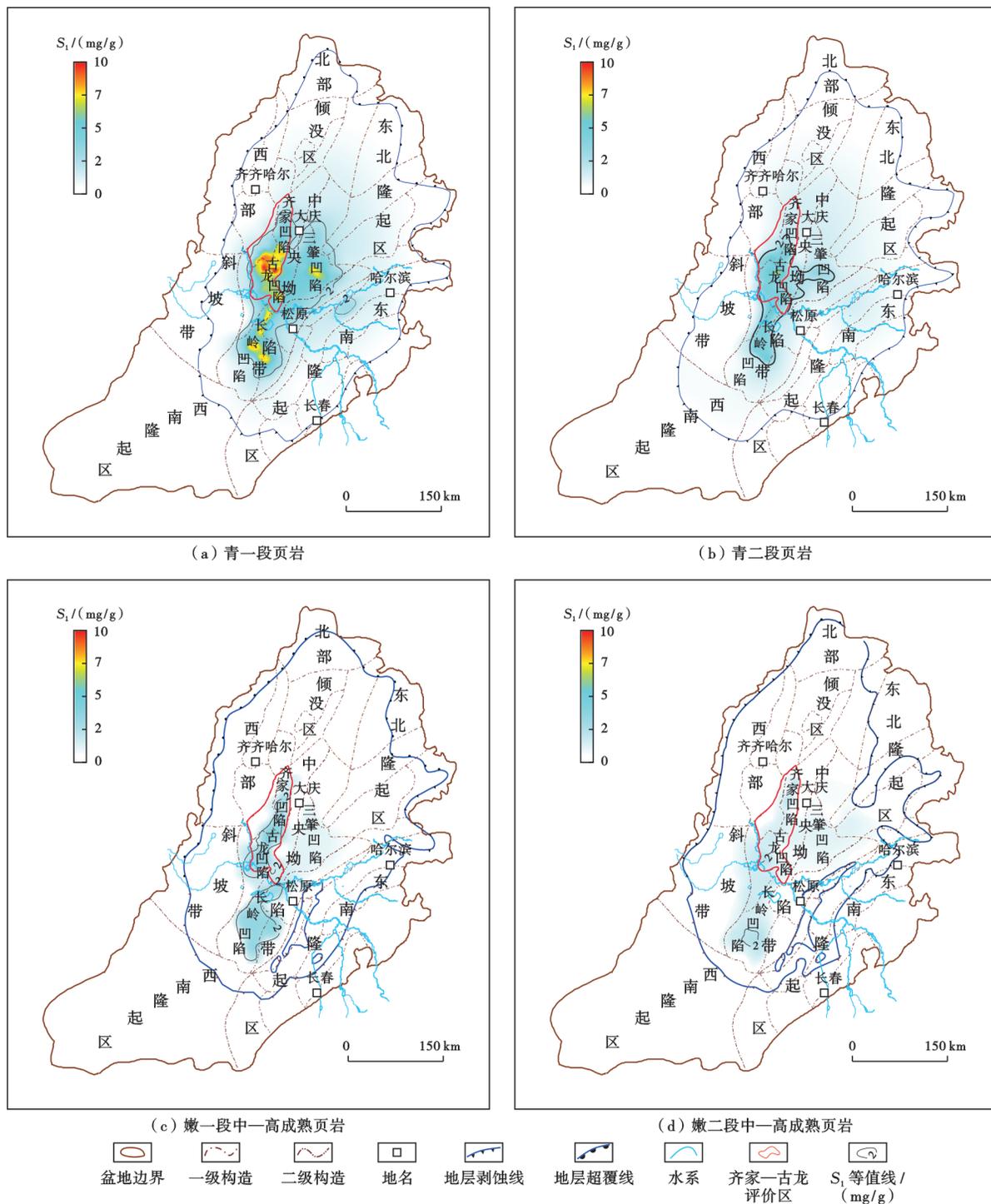
当岩心从地层中取出,到实验分析,这一过程中温度和压力均发生变化,岩石中的油气相平衡会发生改变,轻烃(包括气态烃)发生解析,因此,常规样品的游离烃量不足以完全反映页岩的含油量,需要进行轻烃恢复^[43-44,51]。最晚至20世纪80年代,地球化学家就已认识到常规岩石热解中的 S_1 分析结果存在气和轻烃的损失^[54],但对于如何恢复这部分损失的烃类,长久以来没有直接的测定手段,只能通过一些间接的手段进行估算^[54-56],其结果存在不确定性且误差大。例如:Cooles等^[54]基于未成熟页岩的室内生烃模拟实验获得了轻烃组成的比例,确定了 S_1 测试中的轻烃损失为总烃量的35%;谌卓恒等^[55]根据物质平衡原理计算了 S_1 测试中的轻烃损失,认为其主要不确定性在于排烃量的确定方法;谌卓恒等^[56]采用溶解气的气油比(GOR)或地层体积因子来近似反推页岩油储层中的轻烃损失,认为其主要不确定性在于原始气油比的准确估算。

松辽盆地青山口组页岩油中的轻烃含量高,放置1d的损失量超过50%。为了解决松辽盆地页岩油油质轻、易挥发和含油量难以准确测定的问题,笔者建立了基于保压岩心的页岩含油量及含油组成同步分析技术。当保压岩心出筒后,从样品切割、运输、分样到样品粉碎等全过程均在液氮冷冻下进行,并通过增加分析样品粒径、缩短进样时间等措施,有效降低轻烃损

失。其方法概述如下:①采用保压(密闭)岩心,在样品测试前,全程采用液氮保存;②为减少天然气和轻烃损失,采用1~3mm的块状样品,在液氮冷冻保护下进行样品制备;③采用热解气相色谱同步测定含油气组成和质量。以古页1井保压岩心(图9)为例,采用该技术不仅可以获得游离烃(C_{6+})含量及组成,还可以获得包括甲烷在内的相对完善的气态烃(C_1-C_5)含量及组成。保压岩心与常规岩心含油组成的对比结果表明,页岩油的轻烃损失不是简单的 C_{14} 损失,而是 C_{10} 以前的全部损失, $C_{11}-C_{14}$ 部分损失。原油与保压岩心的轻烃挥发实验结果也表明,岩心中游离烃的轻烃挥发速率远高于原油中的轻烃挥发速率。因此,以往通过间接计算获得的轻烃恢复系数存在较大误差。笔者通过对14口井保压(密闭)岩心热解分析的 S_1 与常规热解分析的 S_1 开展相关分析,采用S型函数非线性拟合,建立了松辽盆地页岩的游离烃恢复系数与 R_o 的关系模型(图10);恢复后的 S_1 与保压岩心热解分析的 S_1 的相对误差小于10%。从图10可以看出:低成熟阶段($R_o < 0.75\%$),由于烃类的成熟度较低,组分偏重,轻烃损失相对较少,游离烃恢复系数一般小于1.5;中等成熟阶段($0.75\% < R_o < 1.20\%$),页岩中的轻烃损失随着成熟度增加呈指数增长,游离烃恢复系数由1.5上升到3.0;高成熟阶段($R_o > 1.2\%$),轻烃损失量大,但相对稳定,轻烃恢复后的 S_1 是常规热解分析 S_1 的3.0~3.5倍。

3.2.3 页岩有效厚度

准确厘定页岩油富集的有效页岩厚度是确保页岩油资源量计算结果可靠性的基础。以往页岩的有效厚度主要基于烃源岩的厚度或者高有机质丰度页岩的发育厚度来确定。这种方法主要确定出富有机质页岩的发育厚度,但其并不能完全代表含油页岩的发育厚度。



注: S_1 —游离烃。

图 8 松辽盆地青山口组和嫩江组页岩中的游离烃分布

Fig. 8 Free hydrocarbon distribution of Qingshankou Formation and Nenjiang Formation shale in Songliao Basin

因此,需要建立基于连续页岩段含油性分析的页岩有效厚度预测方法。然而,大部分油田的钻井无连续取心,含油页岩的有效厚度识别及空间预测难度大。基于 $\Delta \log R$ 技术思路^[57-58],笔者建立了页岩含油量的测井计算方法,通过该方法可以获得全层段页岩含油量的连续曲线。在页岩岩相分析的约束下,基

于页岩油评价的起评下限值,可实现页岩有效厚度的精确厘定。

应用该技术,对青山口组和嫩江组 4 个评价层段页岩有效厚度的平面分布进行了预测。结果显示:青一段和青二段有效页岩在齐家—古龙凹陷、长岭凹陷和三肇凹陷均有分布,厚度中心主要分布在齐

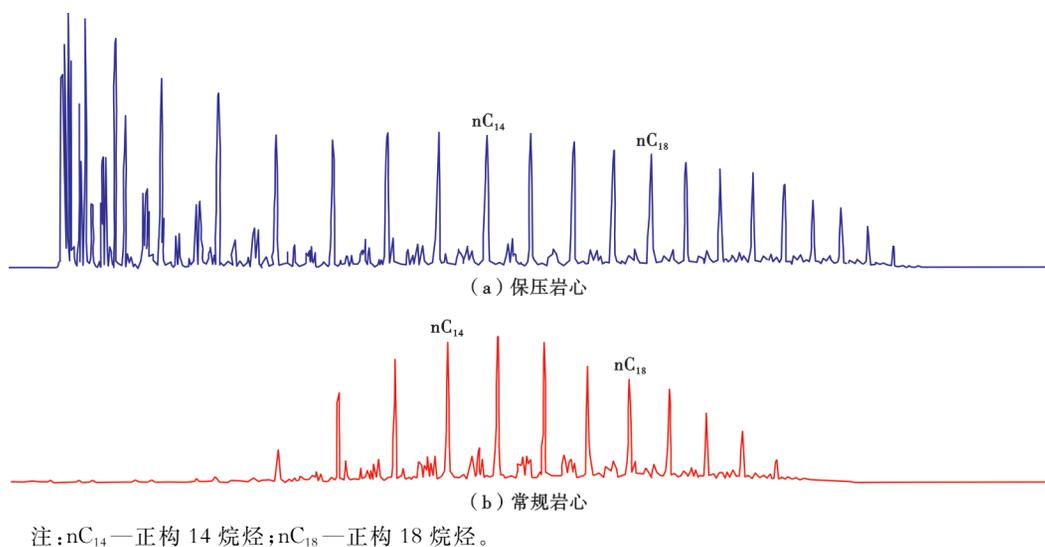
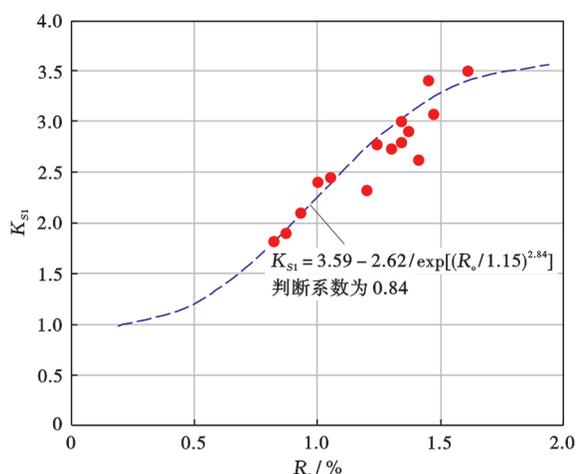


图 9 古页 1 井保压岩心与常规样品热解游离烃组分分析对比

Fig. 9 Free hydrocarbon component comparison between pressure-reserved core samples and conventional samples from Well Guyei



注: R_o —镜质体反射率; S_1 —游离烃; K_{S1} —游离烃恢复系数。

图 10 古龙页岩游离烃恢复系数与 R_o 的关系

Fig. 10 Relationship between the recovery coefficients of free hydrocarbons and R_o in Gulong shale

家—古龙凹陷,其中,青一段页岩的有效厚度为 30~90 m,青二段页岩的有效厚度为 20~120 m;嫩一段和嫩二段中—高成熟页岩有效厚度的分布相对局限,主要分布在齐家—古龙凹陷和长岭凹陷,其中,嫩一段页岩的有效厚度为 10~70 m,嫩二段页岩的有效厚度为 10~40 m。

3.2.4 技术可采系数

可采系数是科学评估页岩油可采资源量的关键参数。笔者系统分析了松辽盆地古龙页岩油示范区主体的开发工艺技术,根据古龙页岩油 5 个试验区的生产情况标定了现今工艺技术条件下的页岩油可采系数。采用目前松辽盆地页岩主体压裂工艺,基于生产时间

长和生产状态稳定的典型生产井的产量递减规律拟合,分析显示古龙页岩油的产量整体呈“双曲线”递减模式^[49,59]。选取 9 口生产时间为 330~1 100 d 的页岩型页岩油典型井,2 口生产时间在 1 100 d 以上的砂质混合型页岩油典型井,进行单井 EUR 计算。基于“双曲线”递减模式计算,青一段中—高成熟页岩型页岩油的单井 EUR 为 $(2.41 \sim 3.64) \times 10^4 \text{t}$ 、平均为 $2.59 \times 10^4 \text{t}$;基于水平井的泄流面积计算,单井控制的地质储量为 $(34.7 \sim 39.4) \times 10^4 \text{t}$ 、平均为 $37.1 \times 10^4 \text{t}$,技术可采系数标定为 0.064~0.077、平均为 0.070。青二段中—高成熟页岩型页岩油的单井 EUR 为 $(3.78 \sim 3.84) \times 10^4 \text{t}$ 、平均为 $3.86 \times 10^4 \text{t}$;基于水平井的泄流面积计算,单井控制的地质储量为 $(46.7 \sim 50.2) \times 10^4 \text{t}$ 、平均为 $48.1 \times 10^4 \text{t}$,技术可采系数标定为 0.079~0.081、平均为 0.080。青山口组砂质混合型页岩油的单井 EUR 为 $1.88 \times 10^4 \text{t}$;基于水平井的泄流面积计算,单井控制的地质储量为 $18.3 \times 10^4 \text{t}$,技术可采系数标定为 0.1。

3.3 页岩油地质资源分级评价

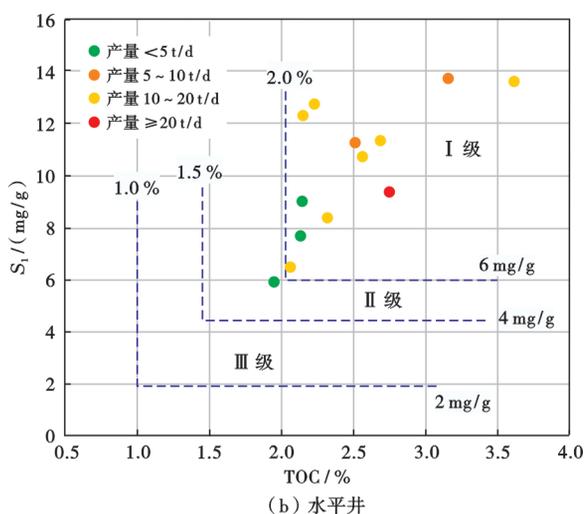
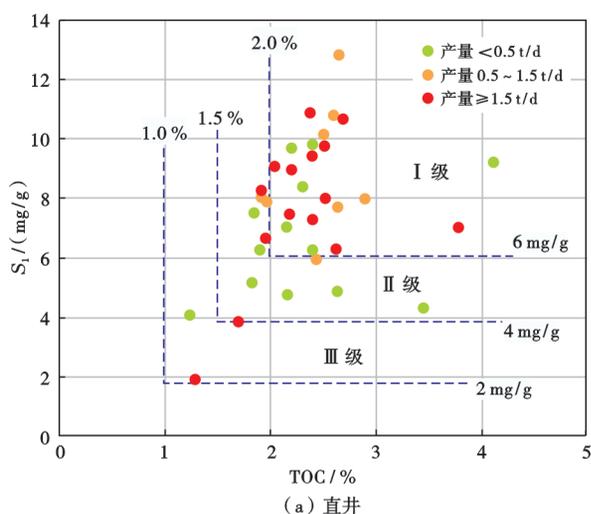
由于陆相页岩具有强非均质性的特点,页岩油资源丰度在纵向上和平面上的分布存在很强的非均质性,部分资源在目前技术经济条件下无法动用。因此,需要科学厘定不同级别页岩油的资源规模,为页岩油资源开发梯次的部署提供支撑^[49-50]。基于大量实际生产数据,笔者开展了页岩油产能与关键参数的相关性分析,确定了不同级次页岩油的参数评价标准。建立的页岩油地质资源分级评价标准主要基于页岩油的资源富集程度,即从 I 级—Ⅲ级。I 级资源丰度最高,是当前水平井开发的主要资源,是现实资源;Ⅱ级资源丰

度中等,直井试油普遍见油流,产量相对较低,需要加大技术攻关,是潜力资源;Ⅲ级资源丰度较低,目前还不具备水平井开发的条件,是远景资源。

3.3.1 页岩型页岩油的分级评价标准

试油产量是地质与工程参数的综合反映,因此主要通过松辽盆地青山口组页岩型页岩油直井和水平井的试油产量与关键参数 TOC、 S_1 的关系开展分析,建立页岩型页岩油的分类标准(图 6、图 11)。分

析结果显示,当页岩的 TOC 含量为 1.0%~1.5%、 S_1 为 2.0~4.0 mg/g 时,只有个别直井在试油中见油流,尚无水平井开发,属于Ⅲ级资源;当页岩的 TOC 含量为 1.5%~2.0%、 S_1 为 4.0~6.0 mg/g 时,直井在试油中普遍见油,少量见工业油流,有少量水平井开发,属于Ⅱ级资源;当页岩的 TOC 含量大于 2.0%、 S_1 > 6 mg/g 时,直井在试油中见工业油流,有大量水平井开发,属于Ⅰ级资源。



注:TOC—总有机碳; S_1 —游离烃。

图 11 松辽盆地青山口组页岩型页岩油的直井与水平井试油产量与 TOC 含量、 S_1 的关系

Fig. 11 Relationships between the shale oil production of vertical and horizontal wells and the TOC content and S_1 of shale-type shale oil in Qingshankou Formation of Songliao Basin

3.3.2 砂质混合型页岩油的分级评价标准

基于松辽盆地青山口组页岩中砂质储层的油气显示及产能,确定砂质混合型页岩油的资源分级。Ⅰ级资源砂质储层的含油显示普遍为油浸;Ⅱ级资源砂质储层的含油显示主要为油浸和油斑;Ⅲ级资源砂质储层的含油显示为油迹和油斑。基于松辽盆地北部和南部混合型页岩油的烃源岩条件、含油性与储层物性的关系(图 12)分析,确定了以孔隙度、含油饱和度为核心参数的混合型页岩油资源的分级标准。Ⅰ级资源储层的孔隙度大于 9%,含油饱和度大于 60%;Ⅱ级资源储层的孔隙度为 6%~9%,含油饱和度为 50%~60%;Ⅲ级储层的孔隙度为 4%~6%,含油饱和度为 40%~50%。

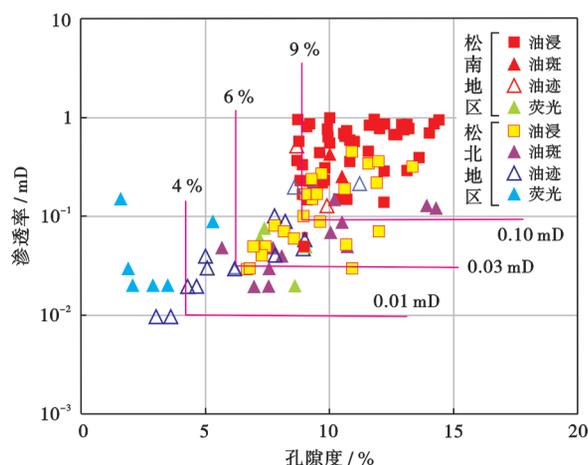


图 12 松辽盆地青山口组砂岩型页岩油储层的有效孔隙度与渗透率关系

Fig. 12 Relationship between effective porosity and permeability of sandstone-type shale oil reservoirs in Qingshankou Formation of Songliao Basin

4 古龙页岩油资源评价结果

基于松辽盆地青山口组、嫩江组页岩的关键参数研究,应用自主研发的资源评价软件对松辽盆地的 2 套层系 4 个层段、2 种不同类型的页岩油资源量进行了全资源序列评价,明确了不同类型页岩油的资源规模与分布。综合评价结果表明:松辽盆地齐家—古龙凹陷中—高成

熟页岩油的地质资源量为 107.73×10^8 t,溶解气的地质资源量为 1.75×10^{12} m³,是松辽盆地现实的接替资源。

2023 年,在古页 1 井探明储量区,计算的探明储

量与同面积、同层系资源量的评价结果对比显示,二者的吻合度超过90%,表明资源评价结果的可靠性较高。基于国际石油工程师协会(SPE)资源量分级的综合分析认为,在评价中,中一高成熟页岩油的地质资源与分级地质资源为高确定性结果。按SPE未发现资源的3U分级,中一高成熟页岩油总体达到2U资源级别,属于中等概率资源。

4.1 中一高成熟页岩油的地质资源潜力

4.1.1 页岩型页岩油

按照中一高成熟页岩型页岩油的起算标准(TOC

含量 $>1.0\%$ 、 $R_o > 0.75\%$ 、 $S_1 > 2 \text{ mg/g}$),对松辽盆地齐家—古龙凹陷青一段、青二段、嫩一段和嫩二段4个页岩层段的中一高成熟页岩型页岩油的资源量进行了计算。评价结果(表2)显示,松辽盆地齐家—古龙凹陷中一高成熟页岩型页岩油的地质资源量总计为 $99.78 \times 10^8 \text{ t}$,溶解气的地质资源量为 $1.75 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。从纵向分布来看,中一高成熟页岩型页岩油主要分布在青一段,资源量的占比达52%;其次分布在青二段,资源量的占比达42%;嫩江组中一高成熟页岩型页岩油的资源量占比不足6%。

表2 松辽盆地齐家—古龙凹陷页岩油资源评价结果

Table 2 Results of shale oil resource evaluation in Qijia-Gulong sag of Songliao Basin

类型	地层	有利区面积/ km ²	页岩油地质 资源量/ 10^8 t	页岩油技术可采 资源量/ 10^8 t	I级地质资源量/ 10^8 t	II级地质资源量/ 10^8 t	III级地质资源量/ 10^8 t
页岩型	青一段	6105.31	52.23	3.66	25.43	16.53	10.27
	青二段	4033.85	41.86	3.35	12.46	13.48	15.92
	嫩一段	1461.00	4.85	0.23	0.53	1.21	3.11
	嫩二段	303.00	0.84	0.03	0.32	0.16	0.36
	小计		99.78	7.27	38.74	31.38	29.66
砂质混 合型	青一段	1850.41	2.48	0.25	1.04	0.57	0.87
	青二段	2642.52	3.54	0.39	1.31	1.24	0.99
	青三段	1012.14	1.93	0.19	0.99	0.48	0.46
	小计		7.95	0.83	3.34	2.29	2.32
总计		107.73	8.10	42.08	33.67	31.98	

此外,页岩油资源富集程度的分级评价结果(表2)显示:松辽盆地齐家—古龙凹陷中一高成熟页岩型页岩油的I级地质资源总量为 $38.74 \times 10^8 \text{ t}$,占比达39%;II级地质资源总量为 $31.38 \times 10^8 \text{ t}$,占比达31%;III级地质资源总量为 $29.66 \times 10^8 \text{ t}$,占比达30%。

4.1.2 砂质混合型页岩油

基于小面元容积法,对松辽盆地青一段、青二段砂质混合型页岩油的资源量进行了计算,落实松辽盆地齐家—古龙凹陷混合型页岩油的地质资源量为 $7.95 \times 10^8 \text{ t}$,主要分布在青二段和青一段。从资源富集程度的分级来看,I级地质资源占比达42%,II级地质资源占比达30%,III级地质资源占比达28%。

4.2 中一高成熟页岩油的技术可采资源潜力

中一高成熟页岩油是未来开发上产的主要类型,地质资源潜力大,已开展相关开发试验和技术攻关,在松辽盆地古龙页岩油示范区已形成一定的产能规模,具备进行技术可采资源潜力评价的现实条件^[60]。

基于古龙页岩油示范区现有的主体工艺技术条件,对中一高成熟页岩型页岩油和砂质混合型页岩油开展的技术可采资源潜力评价的结果显示:目前,基于古龙页岩油试验区的主体开发技术,中一高成熟页岩油的技术可采资源量为 $8.10 \times 10^8 \text{ t}$,溶解气的技术可

采资源量为 $0.13 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。随着开发工艺技术的不断调整,古龙页岩油单井评估的EUR已大幅提升,页岩油的可采能力逐步提高。未来,随着压裂改造技术及页岩油开采工艺的进步,预计松辽盆地页岩油的可动用程度具有广阔的提升空间。

5 结论

(1) 松辽盆地上白垩统页岩形成于淡水湖盆沉积背景,页岩油资源具有独特性。松辽盆地页岩具有较高成熟度、高游离烃含量、页理缝发育、黏土矿物含量高和流体相态复杂等突出的地质优势和工程技术改造难点。晚白垩世的构造抬升作用导致松辽盆地各凹陷中页岩油的发育特征有较大差异。齐家—古龙凹陷遭受构造抬升作用较晚,持续埋藏时间长,其页岩的热演化程度明显高于长岭凹陷和三肇凹陷,这决定了齐家—古龙凹陷具有高成熟度、高气油比和高压力系数的页岩油富集特征,是目前松辽盆地页岩油开发的主体。

(2) 页岩油按产油层能否生油可划分为页岩型页岩油和混合型页岩油2大类。页岩型页岩油按成熟度可进一步划分为中一高成熟页岩型页岩油和低成熟页岩型页岩油2类;混合型页岩油按照储层类型可进一步划分为砂质混合型页岩油和灰质/白云质混合型页岩油2类。松辽盆地主要发育中一高成熟页岩型页岩

油、砂质混合型页岩油和低成熟页岩型页岩油3类页岩油资源。中—高成熟页岩型页岩油是松辽盆地资源潜力最大的页岩油类型,也是古龙页岩油目前勘探开发的重点。

(3) 松辽盆地齐家—古龙凹陷页岩油资源量大,可动用潜力高。齐家—古龙凹陷中—高成熟页岩油的地质资源量为 $107.73 \times 10^8 \text{ t}$,溶解气资源量为 $1.75 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是现实的战略接替资源,其中,页岩型页岩油的地质资源量为 $99.78 \times 10^8 \text{ t}$,砂质混合型页岩油的地质资源量为 $7.95 \times 10^8 \text{ t}$; I级页岩油的地质资源量为 $42.08 \times 10^8 \text{ t}$, II级页岩油的地质资源量为 $33.67 \times 10^8 \text{ t}$, I级+II级资源量的占比达70%。基于古龙页岩油现有的开发试验工艺技术,中—高成熟页岩油的技术可采资源量为 $8.10 \times 10^8 \text{ t}$,溶解气的技术可采资源量为 $0.13 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中,页岩型页岩油的技术可采资源量为 $7.27 \times 10^8 \text{ t}$,砂质混合型页岩油的技术可采资源量为 $0.83 \times 10^8 \text{ t}$ 。

(4) 地质理论创新、实验技术进步以及开发生产数据的积累是页岩油资源评价的基础。目前,关于页岩油的生烃、富集和相态等研究已形成大量原创性地质认识;基于大量的保压密闭取心资料,研发了轻烃恢复技术,计算了地层的原始游离烃含量;创新了基于常规测试数据的有效页岩厚度精细预测技术。古龙页岩油的开发试验规律逐步显现,为页岩油可采系数的标定提供了科学性。以上理论认识、技术方法和基础数据等为古龙页岩油资源量的科学评价提供了有利支撑。

(5) 松辽盆地页岩油的发育类型多样。页岩油勘探开发刚刚起步,地质理论和开发生产规律的认识,尚不够深入,资源潜力评价难度大,但意义也大。对于不同勘探开发阶段和不同需求主体,页岩油的资源评价方法和参数会存在一定的差别,因此会有不同的资源评价结果,以服务于国家、企业以及科学研究的不同需求。

致谢 页岩油资源评价工作得到了大庆油田有限责任公司勘探开发研究院和中国石油勘探开发研究院的大力支持,特别在成文过程中得到了刘合院士、金之钧院士、邹才能院士、韩征教授和王建教授等的悉心指导,在此一并感谢。

符号注释: Q —页岩油地质资源量, t ; A —评价面积, km^2 ; h —储层有效厚度, m ; ρ_r —页岩岩石密度, g/cm^3 ; K_{s1} —游离烃恢复系数; ϕ —有效孔隙度; S_o —原始含油饱和度; ρ_o —平均地面原油密度, g/cm^3 ; B_o —原油体积系数; R —测井电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

参 考 文 献

- [1] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [2] 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.
- [3] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 155-171.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 155-171.
- [4] 邹才能,杨智,崔景伟,等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of non-marine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [5] 孙龙德,刘合,朱如凯,等. 中国页岩油革命值得关注的十个问题[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2007-2019.
SUN Longde, LIU He, ZHU Rukai, et al. Ten noteworthy issues on shale oil revolution in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2007-2019.
- [6] 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. Enrichment conditions and distribution characteristics of lacustrine medium-to-high maturity shale oil in China[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 116-127.
- [7] 金之钧,王冠平,刘光祥,等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. 石油学报, 2021, 42(7): 821-835.
JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821-835.
- [8] 袁士义,雷征东,李军诗,等. 陆相页岩油开发技术进展及规模效益开发对策思考[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 13-24.
YUAN Shiyi, LEI Zhengdong, LI Junshi, et al. Progress in technology for the development of continental shale oil and thoughts on the development of scale benefits and strategies[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 13-24.
- [9] 郭旭升,马晓潇,黎茂稳,等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1333-1349.
GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins

- [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1333-1349.
- [10] 贾承造, 王祖纲, 姜林, 等. 中国页岩油勘探开发研究进展与科学技术问题[J]. *世界石油工业*, 2024, 31(4): 1-11.
JIA Chengzao, WANG Zugang, JIANG Lin, et al. Progress and key scientific and technological problems of shale oil exploration and development in China[J]. *World Petroleum Industry*, 2024, 31(4): 1-11.
- [11] 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 453-463.
SUN Longde, LIU He, HE Wenyuan, et al. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing oilfield, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 453-463.
- [12] 朱国文, 王小军, 张金友, 等. 松辽盆地陆相页岩油富集条件及勘探开发有利区[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 110-124.
ZHU Guowen, WANG Xiaojun, ZHANG Jinyou, et al. Enrichment conditions and favorable zones for exploration and development of continental shale oil in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 110-124.
- [13] 张赫, 王小军, 贾承造, 等. 松辽盆地北部中浅层全油气系统特征与油气成藏聚集模式[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 683-694.
ZHANG He, WANG Xiaojun, JIA Chengzao, et al. Total petroleum system and hydrocarbon accumulation model in shallow and medium strata in northern Songliao Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 683-694.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 崔宝文, 赵莹, 张革, 等. 松辽盆地古龙页岩油地质储量估算方法及其应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(3): 14-23.
CUI Baowen, ZHAO Ying, ZHANG Ge, et al. Estimation method and application for OOIP of Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(3): 14-23.
- [17] 金之钧. 中国页岩油资源发展战略研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
JIN Zhijun. China shale oil resources development strategy research[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [18] 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.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, ZHU Rukai, et al. Formation and distribution of nonmarine shale oil in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [19] 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.
- [20] SUN Longde, HE Wenyuan, FENG Zihui, et al. Shale oil and gas generation process and pore fracture system evolution mechanisms of the continental Gulong shale, Songliao Basin, China[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(13): 6893-6905.
- [21] WANG Fenglan, FENG Zihui, WANG Xue, et al. Effect of organic matter, thermal maturity and clay minerals on pore formation and evolution in the Gulong shale, Songliao Basin, China[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 223: 211507.
- [22] 霍秋立, 曾花森, 张晓畅, 等. 松辽盆地古龙页岩有机质特征与页岩油形成演化[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 86-96.
HUO Qiuli, ZENG Huasen, ZHANG Xiaochang, et al. Organic matter characteristics and shale oil formation of Gulong shale in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 86-96.
- [23] 蒙启安, 林铁锋, 张金友, 等. 页岩油原位成藏过程及油藏特征——以松辽盆地古龙页岩油为例[J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(3): 24-37.
MENG Qi'an, LIN Tiefeng, ZHANG Jinyou, et al. In-situ accumulation process and reservoir characteristics of shale oil: a case study of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(3): 24-37.
- [24] 孙龙德, 王小军, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩纳米孔隙形成机制与页岩油富集特征[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1350-1365.
SUN Longde, WANG Xiaojun, FENG Zihui, et al. Formation mechanisms of nano-scale pores/fissures and shale oil enrichment characteristics for Gulong shale, Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1350-1365.
- [25] 高瑞祺, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
GAO Ruiqi, CAI Xiyuan. Oil and gas fields formation and distribution in Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [26] 张君峰, 徐兴友, 白静, 等. 松辽盆地南部白垩系青一段深湖相页岩油富集模式及勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(4): 637-652.
ZHANG Junfeng, XU Xingyou, BAI Jing, et al. Enrichment and exploration of deep lacustrine shale oil in the first Member of Cretaceous Qingshankou Formation, southern Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(4): 637-652.
- [27] 刘合, 黄有泉, 蔡萌, 等. 松辽盆地古龙页岩油储集层压裂改造工艺实践与发展建议[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3): 603-612.
LIU He, HUANG Youquan, CAI Meng, et al. Practice and development suggestions of hydraulic fracturing technology in the Gulong shale oil reservoirs of Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 603-612.
- [28] 袁士义, 雷征东, 李军诗, 等. 古龙页岩油有效开发关键理论技术问题与对策[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3): 562-572.
YUAN Shiyi, LEI Zhengdong, LI Junshi, et al. Key theoretical

- and technical issues and countermeasures for effective development of Gulong shale oil, Daqing oilfield, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 562-572.
- [29] 张君峰, 徐兴友, 白静, 等. 松辽盆地页岩油地质特征与工程实践[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2021.
- ZHANG Junfeng, XU Xingyou, BAI Jing, et al. Geological characteristics and engineering practice of shale oil in the Songliao Basin[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2021.
- [30] 付晓飞, 石海东, 蒙启安, 等. 构造和沉积对页岩油富集的控制作用——以松辽盆地中央拗陷区青一段为例[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 56-71.
- FU Xiaofei, SHI Haidong, MENG Qi'an, et al. Controlling effects of the structure and deposition on the shale oil enrichment; taking Formation qn1 in the central depression of Songliao Basin as an instance[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 56-71.
- [31] 王小军, 白雪峰, 陆加敏, 等. 松辽盆地北部油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2091-2103.
- WANG Xiaojun, BAI Xuefeng, LU Jiamin, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in northern Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2091-2103.
- [32] 崔宝文, 王瑞, 白云凤, 等. 古龙页岩油勘探开发进展及发展对策[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43(4): 125-136.
- CUI Baowen, WANG Rui, BAI Yunfeng, et al. Exploration and development progress and development strategies of Gulong shale oil[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(4): 125-136.
- [33] 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.
- [34] 金之钧, 张谦, 朱如凯, 等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4): 801-819.
- JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 801-819.
- [35] 黎茂稳, 金之钧, 董明哲, 等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(4): 489-505.
- LI Maowen, JIN Zhijun, DONG Mingzhe, et al. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(4): 489-505.
- [36] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 322-331.
- ZHANG Jinchuan, LIN Lamei, LI Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 322-331.
- [37] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 页岩油地质评价方法: GB/T 38718—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geological evaluating methods for shale oil: GB/T 38718-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [38] 郭秋麟, 米石云, 张倩, 等. 中国页岩油资源评价方法与资源潜力探讨[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(3): 402-412.
- GUO Qiulin, MI Shiyun, ZHANG Qian, et al. Assessment methods and potential of shale oil resources in China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(3): 402-412.
- [39] 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.
- [40] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2: shale-oil resource systems[M]//BREYER J A. Shale reservoir-giant resources for the 21st century. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 89-119.
- [41] 李进步, 王民, 卢双舫, 等. 页岩吸附油定量评价模型——以松辽盆地北部白垩系青山口组一段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(5): 990-1002.
- LI Jinbu, WANG Min, LU Shuangfang, et al. Quantitative evaluation model of shale oil adsorption: a case study of the first Member of Cretaceous Qingshankou Formation in northern Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(5): 990-1002.
- [42] 卢双舫, 薛海涛, 王民, 等. 页岩油评价中的若干关键问题及研究趋势[J]. *石油学报*, 2016, 37(10): 1309-1322.
- LU Shuangfang, XUE Haitao, WANG Min, et al. Several key issues and research trends in evaluation of shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(10): 1309-1322.
- [43] HU Tao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie, et al. Movable oil content evaluation of lacustrine organic-rich shales: methods and a novel quantitative evaluation model[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 214: 103545.
- [44] WANG Min, LI Ming, LI Jinbu, et al. The key parameter of shale oil resource evaluation: oil content[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(4): 1443-1459.
- [45] 蒙启安, 张金友, 吴伟, 等. 松辽盆地北部青山口组夹层型页岩油形成地质条件及勘探潜力[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43(3): 38-48.
- MENG Qi'an, ZHANG Jinyou, WU Wei, et al. Geological conditions and exploration potential of interbedded shale oil in Qingshankou Formation of northern Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(3): 38-48.
- [46] 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 1-13.
- SUN Longde, ZHAO Wenzhi, LIU He, et al. Concept and application of “sweet spot” in shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 1-13.
- [47] 匡立春, 侯连华, 杨智, 等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J]. *石油学报*, 2021, 42(1): 1-14.
- KUANG Lichun, HOU Lianhua, YANG Zhi, et al. Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(1): 1-14.
- [48] 李志明, 刘雅慧, 何晋译, 等. 陆相页岩油“甜点”段评价关键参数

- 界限探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1453-1467.
- LI Zhiming, LIU Yahui, HE Jinyi, et al. Limits of critical parameters for sweet-spot interval evaluation of lacustrine shale oil[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1453-1467.
- [49] 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.
- [50] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.
- LU Shuangfang, HUANG Wenbiao, CHEN Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: discussion and application[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 249-256.
- [51] 郭秋麟, 王建, 陈晓明, 等. 页岩油原地量和可动油量评价方法与应用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1451-1463.
- GUO Qiulin, WANG Jian, CHEN Xiaoming, et al. Discussion on evaluation method of total oil and movable oil in-place[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1451-1463.
- [52] 国家能源局. 泥页岩含油量热解分析方法: SY/T 7661—2022 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
- National Energy Administration. Method for pyrolysis of oil content in shale: SY/T 7661-2022 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [53] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 岩石热解分析: GB/T 18602—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of the People's Republic of China. Rock pyrolysis analysis: GB/T 18602-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [54] COOLES G P, MACKENZIE A S, QUIGLEY T M. Calculation of petroleum masses generated and expelled from source rocks [J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10(1/3): 235-245.
- [55] 谌卓恒, 黎茂稳, 姜春庆, 等. 页岩油的资源潜力及流动性评价方法——以西加拿大盆地上泥盆统 Duvernay 页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 459-468.
- CHEN Zhuoheng, LI Maowen, JIANG Chunqing, et al. Shale oil resource potential and its mobility assessment: a case study of Upper Devonian Duvernay shale in western Canada sedimentary basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 459-468.
- [56] CHEN Junqing, PANG Xiongqi, PANG Hong, et al. Hydrocarbon evaporative loss evaluation of lacustrine shale oil based on mass balance method: Permian Lucaogou Formation in Jimusaer depression, Junggar Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 91: 422-431.
- [57] 谭佳静, 吴康军, 李昱翰, 等. 测井预测 TOC 方法在页岩储层评价中的运用[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(1): 258-266.
- TAN Jiajing, WU Kangjun, LI Yuhuan, et al. Application of logging prediction TOC method in shale reservoir evaluation [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(1): 258-266.
- [58] 庞小娇, 王贵文, 匡立春, 等. 沉积环境控制下的页岩岩相组合类型及测井表征: 以松辽盆地古龙凹陷青山口组为例[J]. 古地理学报, 2023, 25(5): 1156-1175.
- PANG Xiaojiao, WANG Guiwen, KUANG Lichun, et al. Logging evaluation of lithofacies and their assemblage under control of sedimentary environment: a case study of the Qingshankou Formation in Gulong sag, Songliao Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(5): 1156-1175.
- [59] 庞彦明, 王永卓, 王瑞, 等. 松辽盆地古龙页岩油水平井试采分析及产能预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(3): 137-146.
- PANG Yanming, WANG Yongzhuo, WANG Rui, et al. Production test analysis and productivity prediction of horizontal wells in Gulong shale oil reservoirs, Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 137-146.
- [60] 刘合, 陶嘉平, 孟思炜, 等. 页岩油藏 CO₂ 提高采收率技术现状及展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 127-134.
- LIU He, TAO Jiaping, MENG Siwei, et al. Application and prospects of CO₂ enhanced oil recovery technology in shale oil reservoir [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(1): 127-134.

(收稿日期 2024-10-10 改回日期 2024-11-15 编辑 雷永良)