

松辽盆地白垩系古龙页岩由“生油”到“产油”的革命性转变及战略意义

白斌^{1,2}, 李国欣^{1,3,4*}, 白雪峰^{2,5}, 朱如凯^{1,2}, 崔宝文⁵, 雷征东^{1,2}, 孟思炜^{1,2}, 何坤^{1,2}, 刘合^{1,2}

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, 大庆 163712
3. 中国石油天然气股份有限公司, 北京 100007
4. 中国石油油气和新能源分公司, 北京 100007
5. 中国石油大庆油田公司, 大庆 163712

摘要 松辽盆地白垩系青山口组富有机质页岩是大庆油田27年连续生产原油5000万t以上、累计生产原油突破25亿t的主要生油源岩。近年来,向深湖区古龙凹陷积极探索,2019年部署的古页油平1井等重点探井,在生油源岩获初期日产油30.5 t,日产气13032 m³的工业油流,实现了青山口组页岩由“生油”到“产油”革命性转变。同样,在松辽盆地白垩系古龙页岩生油、储油、产油及工程改造方面,也取得了相应的研究进展:一是在地质研究方面,提出古龙页岩具有高生油量与低排烃效率特征,为页岩“产油”提供重要的物质基础;同时,古龙页岩广泛发育的微纳米黏土有机复合孔、页理缝等孔-缝组合体系,为页岩油提供了储集空间;二是在工程改造方面,针对古龙页岩“千层饼”的复杂纹层结构,提出提升胍胶压裂液比例、使用粉砂堵塞近井微裂缝、降低段内簇数、提高施工排量、正向利用应力干扰等工程技术,实现“控近扩远”的缝网理念,提高页岩油改造规模与程度;三是在开发方面,通过压裂液弹性驱、岩石和流体弹性驱、溶解气驱量化能量的释放过程和顺序,合理控制压力、有序释放弹性能量,实现体积开发,控制递减速度。陆相页岩型页岩油资源丰富,从“生油”到“产油”革命性转变已获突破,未来保障国家能源安全的战略意义重大。但也面临基础理论认识、工程实践技术与效益开发方面的重大挑战。

关键词 松辽盆地;古龙页岩油;富集规律;生油;产油

收稿日期:2023-08-12;修回日期:2024-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(42072186);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)

作者简介:白斌,高级工程师,研究方向为致密油/页岩油形成条件与地质工程一体化评价,电子信箱:baibin81@petrochina.com.cn;李国欣(通信作者),教授级高级工程师,研究方向为常规-非常规资源地质理论与油气勘探开发管理、油气地质综合研究与非常规油气地质工程一体化,电子信箱:guoxinli@petrochina.com.cn

引用格式:白斌,李国欣,白雪峰,等.松辽盆地白垩系古龙页岩由“生油”到“产油”的革命性转变及战略意义[J].科技导报,2024,42(24):5-12;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.07.01074

近年来,页岩油成为国内外石油地质研究的热点之一。众多学者与相关科研机构将页岩油定义为赋存于富有机质烃源岩层系内,包括泥页岩、碳酸盐岩、粉砂岩等多种类型致密储集层,且常规技术难以开采的石油资源^[1]。同时,根据有机质成熟度(R_o)进一步分为中-高成熟度页岩油($R_o \geq 0.9\%$)和中-低成熟度页岩油($R_o < 0.9\%$)。前者以富有机质页岩层系内砂岩、碳酸盐岩、混积岩等致密储层赋存的液态石油烃为主体,液态烃达到40%~60%,未转化有机质仅占10%~20%,且随着成熟度增加,液态烃、气态烃量增多,可通过水平井体积压裂改造实现油气产出^[2]。而中-低熟页岩油中未转化有机质普遍可达40%~80%,需通过原位转化实现富有机质页岩产出油气,其余少量的液态烃多赋存于砂岩或碳酸盐夹层中,并可通过压裂改造获得^[3]。按照页岩油甜点岩相类型可划分为页岩型页岩油、混积型页岩油以及夹层型页岩油3类^[4-6]。而松辽盆地古龙页岩油产层则为具有生烃能力的白垩系青山口组富有机质页岩,也是大庆油田27年连续生产原油5000万t以上,截至2023年3月累计生产原油突破25亿t的主要生油源岩。近年来,围绕古龙凹陷深湖页岩,2019年部署古页岩平1井等重点探井,在生油源岩获得初期日产油30.5 t,日产气13032 m³的工业油流,实现了古龙页岩由“生油”到“产油”革命性转变,未来勘探潜力值得期待。

1 松辽盆地页岩油勘探开发现状

中国页岩油的勘探开发可以追溯到20世纪70年代。1970年鄂尔多斯盆地长7段直井压裂庆6井致密砂岩获油花;随后相继探索沾化凹陷沙一段、江汉盆地潜四段、松辽盆地青山口组等泥岩裂缝型页岩油,部分井获得短期高产^[7-9]。随着地质认识和钻井压裂工艺水平的不断进步,自2009年至今,鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地和准噶尔盆地页岩油勘探获得突破,2011年中国页岩油年产首次达到 4×10^4 t,于2019年突破 100×10^4 t^[10]。2022年全年产量达到 318×10^4 t,中国石油页岩油产量为 303.6×10^4 t,其中夹层型页岩油产量为 219×10^4 t,

混积型页岩油产量为 75.9×10^4 t,纯页岩型页岩油产量为 8.7×10^4 t^[11],2023年中国石油页岩油产量增至 391.6×10^4 t^[8]。目前已建成鄂尔多斯盆地陇东页岩油示范区、新疆吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区、济阳陆相断陷湖盆页岩油和大庆古龙陆相页岩油国家级示范区,同时沧东凹陷孔二段10万t级陆相页岩油开发平台正式投产。

1.1 松辽盆地页岩油勘探开发历程

松辽盆地古龙凹陷发育上白垩统青山口组和嫩江组两套页岩层系^[12],青山口组页岩作为生油岩,成熟度偏高,转化程度较高,是松辽盆地大规模油气藏的重要油源^[10,13]。随着地质认识的不断创新突破,近年古龙页岩已实现了从单纯的“生油”岩向“产油”岩的革命性转变。

自1981年,大庆油田就开启了页岩油的探索研究,大致经历发现探索、研究认识和试验突破3个阶段。一是1981—1997年页岩油发现探索阶段,英12井在青山口组黑色泥页岩裂缝见良好油气显示,初期日产油4.6 m³,日产气441 m³^[14-15],基于常规油气勘探开发理念技术,部分井获得工业油流,但产量下降快、稳产差。二是1998—2017年研究认识阶段,基于页岩层系内薄砂层勘探开发理念,采用水平井+体积压裂技术,在齐家南三角洲外前缘相带砂岩薄夹层钻探的齐平1井、齐平1-1与齐平1-2井,分别获日产油10.2 t、14.3 t和4.6 t,现场试验区,累计产油 91.14×10^4 t,实现有效开发。2013年针对青山口组泥岩储层钻探英X58井(日产油8.6 m³)、朝21井(日产油1.8 m³)证实了泥岩产油潜力。三是2018年后进入页岩型页岩油试验突破阶段,2019年松页岩1HF井(日产油14.4 m³)和2HF井(日产油10.7 m³)首次在纯页岩段水平井获得突破,2018年钻探的古页1井、古页岩平1井积极探索深部青山口组泥页岩油气,2020年古页岩平1井获得突破,水平段1562 m,累产油959 d,产油峰值30.52 t/d、产气峰值 1.3×10^4 m³/d^[16-17];截至2024年8月30日,累计产油16416 t、产气 646.20×10^4 m³,实现了青山口组页岩油气的重大突破。

1.2 古龙页岩油勘探开发现状

松辽盆地白垩系青山口组古龙页岩(白垩系青

山口组一段和青山口组二段底部)位于中央凹陷区(图1),自下而上细分Q1~Q9共9个油层,上、中、下3个箱体,截至2024年7月共完钻265口水平井,纵向上9个油层均见油,其中上箱体产量最高,稳产能力较强,中箱体2口井获高产,进一步证实了开发潜力,下箱体内部产量Q3层至Q1层产量依次下降。其中,下箱体(Q1~Q4)含油性最佳,累计压裂井数超100口,其中98口已见油,累计产油 17.8×10^4 t,累计产气 7016×10^4 m³。

2 松辽盆地白垩系青山口组页岩由“生油”向“产油”转变

松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组页岩层系分布面积达 3×10^4 km²,厚度90~270 m,富有机质泥页岩占总厚度的90%以上,夹薄层粉砂岩、介壳灰岩和白云岩透镜体。薄夹层厚度普遍小于1 m且较致密,生油岩的页岩为古龙页岩油产层,实现了页岩从传统仅“生油”向“产油”转变。

2.1 青山口组页岩“生油”特征

松辽盆地青山口组一段-二、三段的形成期对应白垩纪出现的两期大洋缺氧事件(OAE)之间湖泊缺氧事件沉积^[16],为深湖-半深湖相沉积。其中,青一段沉积期湖泊面积可达10万 km²,暗色泥岩厚度平均61.5 m;青二、三段沉积期湖泊面积 6×10^4 km²,暗色泥岩厚度平均249 m^[19]。岩性以富有机质黑色页岩为主,含毫米-厘米级粉砂质和碳酸盐岩夹层。长垣东侧朝阳沟-三肇凹陷青山口组页岩有机质丰度(TOC)平均为3~4 wt.%,最高可达12 wt.%,西侧的古龙凹陷青山口组页岩有机质丰度平均为2~3 wt.%(图2)。

青山口组有机质生物来源主要为层状分布的藻类体^[20],处于整体缺氧的沉积环境,导致页岩普遍具有较高生烃潜力(HI),低成熟页岩原始HI也可达600~900 mg/g TOC(图3(a)),有机质类型以I-III型为主。生烃模拟实验揭示,青山口组低成

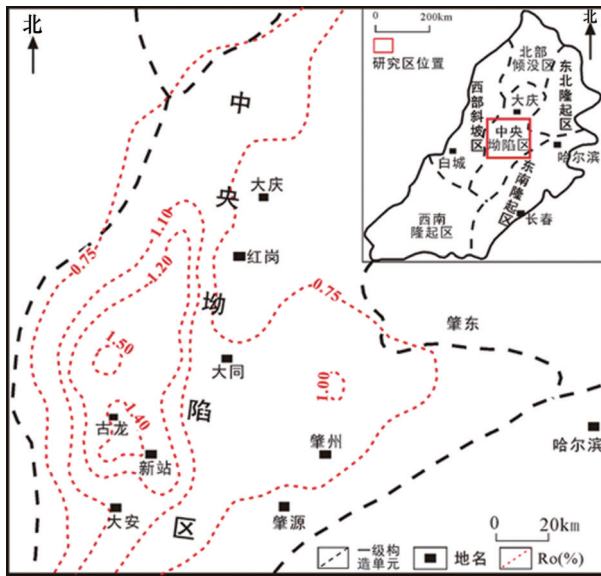


图1 松辽盆地北部古龙凹陷白垩系构造单元及位置图(据文献[18]修改)

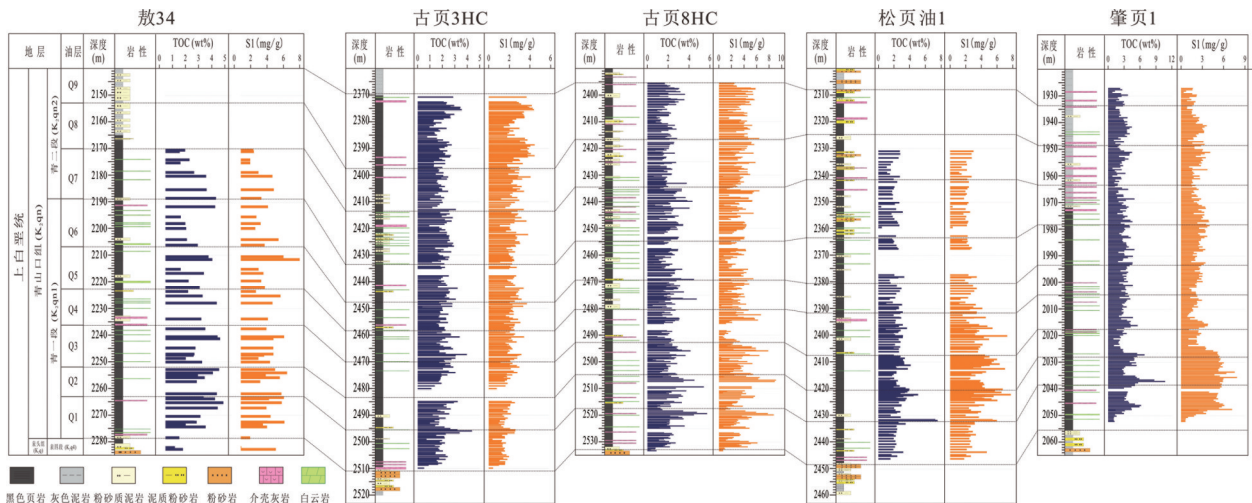


图2 松辽盆地青山口组页岩连井地球化学剖面

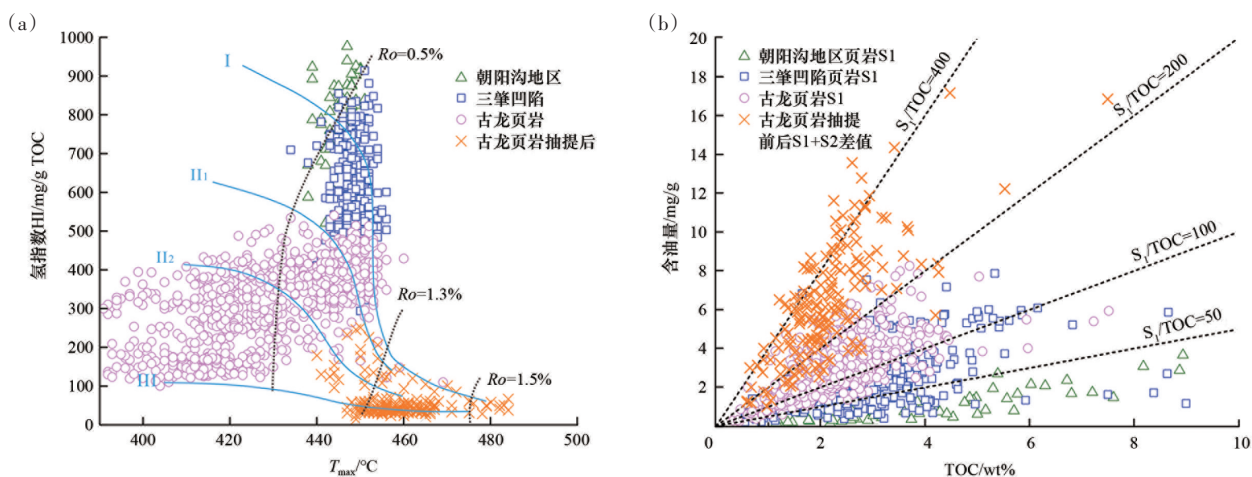


图3 松辽盆地白垩系青山口组页岩生烃潜力(a)和含油性(b)特征(据[22]修改)

熟有机质最大生油量可达 800 mg/g TOC^[21]。因此,青山口组页岩较高的有机质丰度、巨厚的分布范围、高的原始生烃潜力,为松辽盆地北部上白垩统油气聚集提供了物质基础。古龙页岩的热演化程度明显高于朝阳沟-三肇凹陷的青山口组页岩,成熟度(R_o) 1.0%~1.6%(图1),抽提后的残留 HI 为 20~200 mg/g TOC(图3(a)),表明经历了强烈的生烃过程。

作为松辽盆地北部上白垩统常规油和致密油的主力生油岩,古龙页岩贡献了超过 60 亿 t 的大庆常规油储量^[20]。最新关于生排烃模拟和页岩排烃效率计算,揭示古龙页岩的排烃效率主体为 20%~60%,普遍低于 40%^[22-23],而古龙页岩热解结果显示含油量可达 200~400 mg/g TOC(图3(b))。古龙页岩较高的生油量和相对低的排烃效率,是造成源内存在较高滞留烃量的主控因素之一,为页岩油的规模富集提供重要的物质基础。

2.2 青山口组页岩“储油”特征

松辽盆地白垩系青山口组在全区稳定发育,主要形成于三角洲前缘-半深湖-深湖沉积体系,其中古龙页岩主要发育在半深湖-深湖相。古龙页岩矿物组成复杂多样,主要包括黏土矿物、石英、斜长石、方解石、白云石和黄铁矿。其中,黏土矿物含量较高,整体介于 39.2%~60.0%,平均含量为 51.1%,其中以伊利石和伊蒙混层为主,含有少量绿泥石。陆源碎屑主要为石英和斜长石,含量介于 27%~50.7%,平均值为 39.1%。碳酸盐矿物主体为

方解石和白云石,含量变化较大,介于 0.6%~32.9%。古龙页岩发育典型纹层结构,可分为黏土矿物纹层、长英质纹层与介形虫钙质纹层 3 类,纹层频繁交互叠置,根据纹层组合分黏土质页岩、长英质页岩及混积岩 3 种主要岩相^[8]。

古龙页岩主要发育粒间孔、粒内孔、有机质孔及页理缝 4 类储集空间。粒间孔包括脆性矿物粒间孔和黏土矿物粒间孔:前者主要见于长石和石英颗粒相接处,孔径大于 100 nm;后者呈狭缝状,长度 20~200 nm 不等。粒内孔主要为黏土矿物粒内孔,多发育在有机质-黏土集合体内部,以伊利石和伊蒙混层粒内孔最为常见;此外,在长石、方解石和白云石等矿物颗粒内部存在粒内微孔,孔径一般小于 100 nm,呈圆孔状或三角状。有机质孔主要分为矿物共生型有机质孔和矿物吸附型有机质孔。前者多孤立发育,长度大于 20 μm ,有机质孔呈海绵状,边缘见有机质收缩孔缝;后者有机质与黏土矿物呈层状相间分布或充填在粒间孔,孔径较小,主体为纳米级。古龙页岩丰富的孔-缝储集空间,为古龙页岩油“原位富集”提供了空间基础。

2.3 青山口组页岩“产油”特征

根据古龙页岩油典型井生产曲线将开发动态过程分为 4 个阶段。一是人工裂缝线性流阶段,该阶段压力导数曲线的斜率为 1/2,主要依靠压力液和岩石、流体的弹性能来动用裂缝中的流体;二是人工裂缝-页理缝双线性流阶段,该阶段压力导数

曲线的斜率为1/4,页理缝中的原油开始供给,气油比相对稳定;三是基质向裂缝供给阶段,压力导数曲线的斜率接近于0,此阶段基质中的原油开始向裂缝供给,产油量有所增加,油-气相对渗透率比值增加,气油比降低;四是外区线性供给阶段,基质纳米孔隙向裂缝控制区域基质供给,由于供给能力存在较大差异,主要为不稳定流动过程。

结合生产动态不同阶段的出油特征,初步形成以人工裂缝-页理缝-基质渗吸为核心的多相、多尺度流动模式^[24](图4)。在基质区域,根据不同的孔隙类型分为两种流动模式,无机孔内赋存烃类流动主要通过扩散和渗吸作用,而有机孔内赋存烃类

的流动主要由分子在壁面散射引起,运动特征符合努森扩散原理;微纳米尺度的页理缝中主要是非线性流动,以油相滑脱流和气体产生滑动超越现象为主;高密度的页理缝被人造缝有效沟通形成复杂缝网,在开发前中期阶段,页理缝成为主要的油气两相流动区域。对于强支撑人造缝,返排阶段是单相水的流动,中期阶段是气-水两相流动,最后是油、气和水耦合的水力裂缝变形为主的达西流动。在实际开发中,细化出压裂液弹性驱、岩石和流体弹性驱、溶解气驱3个生产阶段,量化了能量的释放过程和顺序,并且通过合理控制压力和有序释放弹性能量,实现体积开发控制递减。

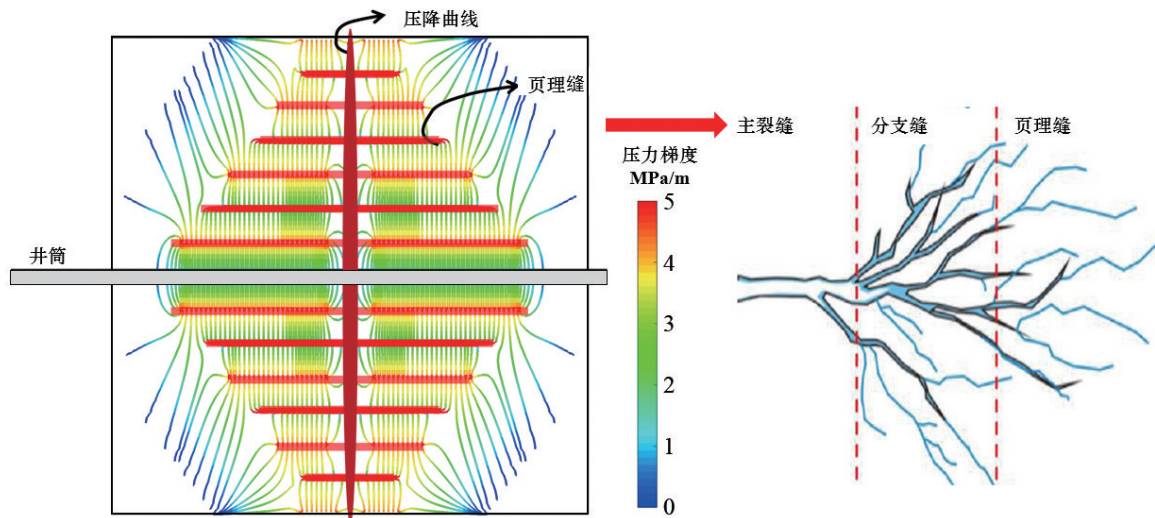


图4 古龙页岩油压裂后流动模式(据[24]修改)

2.4 青山口组页岩工程改造特征

页岩储集层烃类动用难,必须经过体积压裂改造,形成大规模空间缝网,才能改善近井渗流能力、提升单井产量。同时,古龙页岩页理缝十分发育,岩心观察每米达几百至数千条,且多呈复杂波纹状特征^[20]。力学实验结果显示,高密度页理缝控制下,古龙页岩力学特性在纵向上具有极强的波动特征,表现出软硬岩石高频间互特征,在水平方向上同样具有一定的非均质性^[25],呈现“千层小薄饼”特征,类似于厚薄不均的碎纸片、纸板相互堆叠,在压裂过程中裂缝扩展遇到层层遮挡,人工裂缝呈“丰”

字形复杂形态特征,显著制约裂缝垂向扩展,改造体积受到影响,此外造成液体在井筒周围大量滞留,成为制约古龙页岩油规模效益开发的核心问题。

因此,古龙页岩油压裂设计理念突出“控近扩远”,通过提升压裂液胍胶比例、使用粉砂堵塞近井微裂缝、降低段内簇数、提高施工排量、正向利用应力干扰等工程技术,有效促进主裂缝延伸、扩展远井复杂裂缝范围。基于该思想,已初步形成了古龙页岩油的压裂改造主体工艺,微地震监测显示裂缝长度由1号井组的200~300 m提高至3号井组的362~421 m,初步实现了较好的改造效果^[26]。

3 古龙页岩“产油”的战略意义

3.1 页岩产油面临的挑战

松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组湖相沉积发育规模富有机质页岩,但沉积结构、矿物组成、有机质分布、孔隙特征和烃类富集等方面存在极强的非均质性^[27],给页岩产油带来理论认识、工程技术和效益开发3方面的挑战。

3.1.1 理论认识

古龙页岩油作为页岩型页岩油,尚无成功规模商业勘探开发的经验可借鉴,指导其勘探开发的理论认识面临较大挑战,主要体现在3方面。(1)明确页岩型页岩油富集机理是有效识别“资源甜点”、实现高效勘探开发的先决条件。古龙页岩有机质母源复杂,高热演化程度下识别难度大,影响了古龙页岩油形成与富集机理的科学认识。同时古龙页岩发育复杂的微纳米孔、页理缝,成岩作用复杂,影响了页岩油储集性的准确评价与预测。深化页岩油精细地质评价,建立关键评价标准至关重要。(2)古龙页岩油烃类组成复杂,油气在微纳米孔-缝中的相态和渗流机理复杂,有效开发面临挑战。(3)以黏土矿物为主,同时发育多种成因脆性矿物,微观上形成复杂的矿物组合关系,宏观上形成复杂的纹层结构和页理缝,造成岩石破裂和裂缝扩展机理复杂,岩石力学准确评价存在挑战。

3.1.2 工程技术

中国已形成了陆相页岩油水平井+体积压裂主体技术,工程指标不断攀升,整体具备陆相页岩油工程改造能力。目前古龙页岩油工程技术面临的挑战主要体现在3个方面:(1)古龙页岩纹层发育、黏土矿物含量高,水平井施工过程中存在如何避免坍塌卡钻、井眼扩大等井壁失稳工程挑战;(2)压裂改造实施面临如何抑制近井微裂缝扩展、提升裂缝远端延伸能力、增大支撑剂运移距离,确保长期导流、实现“控近扩远”压裂实施的挑战;(3)压裂施工如何避免井间干扰,同时实现最大范围的页岩油动用,合理优化井网井距,建立依据地质资源甜点差异,建立适用性规模效益开发技术存

在挑战。

3.1.3 效益开发

中国现阶段单井水平段长度主体为1600~2000 m,初期产量10~50 t/d, EUR 普遍为(2~3) $\times 10^4$ t,相比北美效益开发存在差异。北美页岩油早期生产阶段,盈亏平衡点为80美元/桶,而随着技术的不断进步,目前已降至35~50美元/桶,到2025年最低将达到18美元/桶^[27]。

其中,地质工程一体化数字化转型与全生命周期管理理念落实不足,造成零衔接高效管理较弱,是目前制约效益开发的因素之一。美国基于地质工程一体化的高效工厂化作业,实现了成本的有效控制。以工厂化钻井为例,可移动并集成自动化控制系统钻机平均节约时间60%以上,单位进尺成本自2011年的451美元降低至2021年的313美元。未来依据中国页岩油资源品质特点,如何全面落实“一全六化”管理理念,助力页岩油高质量发展将面临更大的挑战。

3.2 能源领域内的战略意义

中国陆相页岩油分布范围广,目前已在10余个盆地中发现了16套陆相页岩层系^[28],面积超过 52×10^4 km²,页岩油勘探开发潜力值得期待。陆相页岩层系均经历了复杂而漫长的埋藏,有机质热演化程度普遍进入“液态窗”,生成了大量油气资源。其中,页岩层系普遍发育泥质粉砂岩、泥质碳酸盐岩等致密夹层,为生成的油气提供了初次运移的通道和储集空间,同时页岩内部也发育大量微纳米级孔-缝系统,为页岩油原位滞留提供了储集空间。

据“十三五”资源评价,中国中高成熟度陆相页岩油资源量评估为 283×10^8 t,主要集中在鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地和准噶尔盆地,资源量达 172×10^8 t。在布伦特原油价格为60美元/桶条件下,有利富集区经济性尚好的页岩油资源总量为 $(67\sim 84)\times 10^8$ t^[29]。截至2022年底,全国陆上页岩油累计已落实三级储量 53×10^8 t,其中探明地质储量 15.08×10^8 t、控制地质储量 1.28×10^8 t、预测储量 36.83×10^8 t^[30],如能尽快实现效益开发,将降低中国能源对外依存度,有效保障国家能源安全。

4 结论

松辽盆地白垩系古龙页岩发生了由“生油”到“产油”的革命性转变,得益于地质认识创新、工程技术进步,使传统认知生油源岩产出油气^[31]。(1)古龙页岩具有高生油量和相对低的排烃效率,导致源内仍存在较高的滞留烃量,为页岩油规模富集提供重要的物质基础;(2)古龙页岩广泛发育的黏土矿物粒间孔、粒内孔、黄铁矿粒间孔、长石-石英粒间孔、有机孔及微裂缝组成了微纳米孔缝组合体系,为古龙页岩油“原位富集”提供了空间基础;(3)基于“控近扩远”的压裂设计理念,通过提升胍胶压裂液的比例、使用粉砂堵塞近井微裂缝、降低段内簇数、提高施工排量、正向利用应力干扰等工程技术,有效促进主裂缝延伸、扩展远井复杂裂缝范围,提高了古龙页岩油的改造规模和程度;(4)古龙页岩油开发过程可分3个阶段,即压裂液弹性驱、岩石和流体弹性驱、溶解气驱,初步量化了能量的释放过程和顺序,提出了通过合理控制压力和有序释放弹性能量,实现体积开发控制递减速度的理念。

参考文献(References)

- [1] The Unconventional Oil Subgroup of the Resource & Supply Task Group. Potential of North American unconventional oil resource[R]. Alberta: The NPC North American Resource Development Study, 2011.
- [2] 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.
- [3] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 537-545.
- [4] 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.
- [5] 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, 242-259.
- [6] 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.
- [7] 张光亚, 陈全茂, 刘来民. 南阳凹陷泥岩裂缝油气藏特征及其形成机制探讨[J]. 石油勘探与开发, 1993(1): 18-26.
- [8] 赵喆, 白斌, 刘畅, 等. 中国石油陆上中高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 327-340.
- [9] 杨勇. 济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(1): 1-20.
- [10] 赵文智, 朱如凯, 张婧雅, 等. 中国陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 1-13.
- [11] 朱昌海, 李文翎. 2022年全国油气勘探开发十大标志性成果[J]. 中国石油企业, 2023(Z1): 58-61.
- [12] 孙龙德. 古龙页岩油(代序)[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(3): 1-7.
- [13] 李德生. 松辽盆地的油气形成和分布特征[J]. 大庆石油地质与开发, 1983(2): 81-89.
- [14] 高瑞祺. 泥岩异常高压带油气的生成排出特征与泥岩裂缝油气藏的形成[J]. 大庆石油地质与开发, 1984(1): 160-167.
- [15] 陈章明, 张树林, 万龙贵. 古龙凹陷北部青山口组泥岩构造裂缝的形成及其油藏分布的预测[J]. 石油学报, 1988(4): 7-15.
- [16] 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.
- [17] 何文渊, 白雪峰, 钟建华, 等. 松辽盆地古龙页岩油储层干酪根的有机元素组成及其N元素的地球化学意义[J]. 地质学报, 2024, 98(6): 1840-1866.
- [18] 何文渊, 崔宝文, 王凤兰, 等. 松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组储集空间与油态研究[J]. 地质论评, 2022, 68: 693-741.
- [19] 冯子辉, 方伟, 李振广, 等. 松辽盆地陆相大规模优质烃源岩沉积环境的地球化学标志[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(9): 1253-1267.
- [20] 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.
- [21] 刘洋, 何坤, 李贤庆, 等. 湖相烃源岩生烃动力学及排油效率—以松辽盆地青山口组为例[J]. 现代地质, 2016, 30(3): 627-634.
- [22] 张水昌, 张斌, 王晓梅, 等. 松辽盆地古龙页岩油富集机制与常规-非常规油有序分布[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(5): 911-923.
- [23] He W Y, Zhu R K, Cui B W, et al. The geoscience frontier of gulong shale oil: Revealing the role of continental shale from oil generation to production[J]. Engineering,

- 2023, 28: 79–92.
- [24] 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(3): 562–572.
- [25] Meng S W, Li D X, Liu X, et al. Study on dynamic fracture growth mechanism of continental shale under compression failure[J]. Gas Science and Engineering, 2023, 114: 204983.
- [26] 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.
- [27] 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
- [28] 汪天凯, 何文渊, 袁余洋, 等. 美国页岩油低油价下效益开发新进展及启示[J]. 石油科技论坛, 2017, 36(2): 60–68.
- [29] 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.
- [30] 邹才能, 朱如凯, 董大忠, 等. 页岩油气科技进步、发展战略及政策建议[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1675–1686.
- [31] 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.

The revolutionary transformation from oil generation to oil production in the Cretaceous Gulong shale in Songliao basin and its strategic significance

Bai Bin^{1,2}, Li Guoxin^{1,3,4*}, Bai Xuefeng^{2,5}, Zhu Rukai^{1,2}, Cui Baowen⁵, Lei Zhengdong^{1,2}, Meng Siwei^{1,2}, He Kun^{1,2}, Liu He^{1,2}

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China
2. National Key Laboratory of Continental Shale Oil, Daqing 163712, China
3. PetroChina Company Limited, Beijing 100007, China
4. PetroChina Oil, Gas and New Energy Company, Beijing 100007, China
5. PetroChina Daqing Oil field Company, Daqing 163712, China

Abstract This paper focuses on the latest progress of oil generation, storage, production and engineering transformation of Gulong shale oil in Songliao Basin and holds that the high oil generation and low hydrocarbon expulsion efficiency of Gulong shale provides important material basis for oil production. The micro-nano pore and fracture combination system widely developed in Gulong shale provides the spatial basis for shale oil reservoir. In terms of engineering transformation, engineering technologies such as increasing the proportion of guanidine adhesive fracturing fluid, using silt slug to plug micro-fractures near the well, reducing the number of clusters in the section, increasing the construction displacement, and using stress interference in a positive way are proposed to realize the joint network concept of "controlling near and expanding far" and improve the scale and degree of transformation. By quantifying the process and sequence of energy release through hydraulic elastic flooding, rock and fluid elastic flooding, and dissolved gas flooding, reasonable control of pressure and orderly release of elastic energy can be achieved to control the decline of volume development. Although the revolutionary transformation of continental facies shale oil from "oil generation" to "oil production" still faces major challenges in theoretical mechanism, the engineering technologies and benefit development, continental facies shale oil in a huge scale is one of the important goals to ensure national energy security in the future.

Keywords Songliao basin; Gulong shale oil; enrichment rule; oil generation; oil production ●



(责任编辑 卫夏雯)