

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

赵喆¹, 白斌^{1,2}, 刘畅^{1,2}, 王岚¹, 周海燕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 163712)

摘要: 中国石油天然气集团公司(简称中国石油)矿权区陆相页岩油地质资源丰富,“十三五”资源评价,中国石油陆上中-高成熟页岩油(简称页岩油)地质资源量 201×10^8 t, 占中国页岩油地质资源总量的71%。鄂尔多斯盆地延长组7段、松辽盆地青山口组和准噶尔盆地芦草沟组等重点层系的产量显著增长,中国石油页岩油年产量从2010年的 2.5×10^4 t增至2023年的 391.6×10^4 t, 勘探潜力巨大。研究表明:近年来由于陆相不同类型页岩油具有地质特征非均质性强、富集高产因素明显差异的特点,其效益勘探存在地质认识与勘探技术的双重挑战。特别是:①夹层型页岩油虽在鄂尔多斯盆地长7¹⁺²亚段(延长组7段1+2亚段)实现规模勘探,但勘探靶体钻遇率变化大,深湖区细粒沉积体系研究薄弱,靶体空间展布刻画技术的准确性仍需提升;②混积型页岩油地层垂向厚度大、岩性频繁变化、发育多套地质甜点,在柴达木盆地、渤海湾盆地虽然实现了勘探突破,但垂向地质甜点产量差异明显,页岩油高产主控因素不清,主力靶体评价优选技术、方法仍需完善;③页岩型页岩油在松辽盆地青山口组实现了古龙页岩油勘探突破,但陆相湖盆不同类型页岩生、排烃差异明显,页岩原位滞留烃特征变化大,地质-工程一体化靶体评价技术、方法仍需深化研究。总体上中国石油页岩油勘探开发仍处于快速推进阶段,未来应:①加强淡水湖盆深湖区多类型砂体成因机制研究,实现薄层油积砂体等夹层型页岩油效益勘探;②加强咸化湖盆富碳酸盐混积型页岩油源-储组合评价,优选主体靶体实现混积型页岩油高效勘探;③加强淡水、咸化湖盆优质源岩生、排烃差异性评价,优选最佳靶体,实现不同湖盆页岩型页岩油地质-工程一体化精细勘探。

关键词: 理论技术进展; 靶体; 甜点评价; 勘探现状; 勘探规划; 陆相页岩油; 中国石油

中图分类号: TE132.2 文献标识码: A

Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs

ZHAO Zhe¹, BAI Bin^{1,2}, LIU Chang^{1,2}, WANG Lan¹, ZHOU Haiyan¹, LIU Yuxi¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. National Key Laboratory for Green Mining of Multi-resource Collaborative Continental Shale Oil, Daqing, Heilongjiang 163712, China)

Abstract: China National Petroleum Corporation (CNPC) boasts abundant continental shale oil resources in areas covered by its mineral rights. The national hydrocarbon resource evaluation of the 13th Five-Year Plan reveals that CNPC's geological resources of onshore moderately to highly mature shale oil (hereinafter referred to as shale oil) are estimated at 201×10^8 tonnes, accounting for 71% of the national total. Shale oil production has increased significantly in key plays such as the 7th member of the Yanchang Formation in the Ordos Basin, the Qingshankou Formation in the Songliao Basin, and the Lucaogou Formation in the Junggar Basin, rising from 2.5×10^4 tonnes in 2010 to 391.6×10^4 tonnes in 2023, suggesting enormous potential for shale oil exploration. The study results reveal that CNPC's commercial exploration of continental shale oil is facing challenges in both geological understanding and techniques due to the highly heterogeneous geological characteristics and significantly different factors determining the enrichment and high productivity across various types of continental shale oil reservoirs. Notably, despite large-scale exploration in the 1st and 2nd submembers of the 7th member of the Yanchang Formation in the Ordos Basin, intercalated shale oil

收稿日期: 2024-01-13; 修回日期: 2024-03-19。

第一作者简介: 赵喆(1976—), 男, 博士、教授级高级工程师, 油气资源评价与油气发展战略。E-mail: zhaozhe76@petrochina.com.cn。

通信作者简介: 白斌(1981—), 男, 博士、高级工程师, 页岩油富集规律与甜点评价。E-mail: baibin81@petrochina.com.cn。

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, RIPED-2022-JS-1853)。

reservoirs exhibit greatly varying drilling ratio for targets under exploration, limited research on fine-grained sedimentary sequences of deep lacustrine facies, and the low accuracy of techniques for characterizing the spatial distribution of targets. Shale oil reservoirs of the mixed type exhibit great vertical thicknesses, frequent lithological variations, and multiple suites of sweet spots. Despite breakthroughs in the Qaidam and Bohai Bay basins, the exploration of these reservoirs is constrained by greatly different vertical shale oil production in geological sweet spots, ambiguous major factors contributing to high shale oil production, and imperfect techniques and methods for evaluating and selecting dominant targets. For the exploration of shale oil reservoirs of the pure shale type, breakthroughs have been achieved in the Gulong shale oil reservoirs of the Qingshankou Formation in the Songliao Basin. Nevertheless, due to greatly different hydrocarbon generation and expulsion characteristics and significantly varying in-situ hydrocarbon retention across various types of shales in continental lacustrine basins, it remains necessary to further investigate the geo-engineering integrated techniques and methods for target evaluation. Overall, CNPC's exploration and exploitation of shale oil reservoirs are still rapidly advancing. In the future, it is necessary to intensify research on the genetic mechanisms of various sand bodies in deep parts of fresh lacustrine basins to achieve the commercial exploration of intercalated shale oil reservoirs such as thinly laminated turbidite sand bodies. For shale oil reservoirs of the mixed type, there is a need to enhance the evaluation of source rock-reservoir assemblages of these reservoirs enriched in carbonate in saline lacustrine basins. This will enable the preferential selection of primary targets for efficient exploration. Furthermore, differential evaluations of hydrocarbon generation and expulsion should be underlined for high-quality source rocks in both fresh and saline lacustrine basins to identify the optimal targets. The purpose is to achieve geo-engineering integrated, fine-scale exploration of shale oil reservoirs across various types of lacustrine basins.

Key words: theoretical and technical advance, target, sweet spot evaluation, current exploration status, exploration plan, continental shale oil, CNPC

引用格式: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. DOI: 10.11743/ogg20240202.

ZHAO Zhe, BAI Bin, LIU Chang, et al. Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 327-340. DOI: 10.11743/ogg20240202.

全球页岩油地质资源总量约 $4\,090 \times 10^8 \text{ t}^{[1-2]}$, 其中技术可采资源总量约 $2\,512 \times 10^8 \text{ t}^{[3]}$ 。以美国为代表的页岩油勘探开发呈现良好发展态势, 其页岩油技术可采资源量为 $153.75 \times 10^8 \text{ t}^{[3]}$, 2022年美国页岩油产量达 $3.91 \times 10^8 \text{ t}$, 平均日产超 $900 \times 10^4 \text{ bbl}$, 占美国原油年总产量的65.6%, 2023年虽略有下降, 也达 $3.82 \times 10^8 \text{ t}$ 。相较美国, 中国陆相页岩油(本文专指中-高成熟度页岩油)同样具有巨大资源潜力, “十三五”资源评价, 中国陆上页岩油地质资源量 $283 \times 10^8 \text{ t}^{[4-5]}$, 截至2022年底, 中国陆上页岩油累计已落实三级储量 $53 \times 10^8 \text{ t}$, 其中探明地质储量 $15.08 \times 10^8 \text{ t}$ 、控制地质储量 $1.28 \times 10^8 \text{ t}$ 、预测储量 $36.83 \times 10^8 \text{ t}^{[6]}$ 。中国石油天然气集团公司(下文简称中国石油)页岩油地质资源量约 $201 \times 10^8 \text{ t}$, 主体分布于鄂尔多斯、松辽、渤海湾、准噶尔4大盆地(地质资源量共计 $172 \times 10^8 \text{ t}$), 年产量自2010年的 $2.5 \times 10^4 \text{ t}$ 增至2023年的 $391.6 \times 10^4 \text{ t}$ (图1), 呈现了良好勘探前景。

1 中国石油页岩油勘探现状与勘探潜力

中国陆相页岩油类型多样, 学者分类标准各异^[7-11](表1)。根据页岩油甜点岩相特征和源-储关系, 可分为夹层型、混积型和页岩型3大类。其中, 夹层型页岩油为富有机质页岩层系内一定厚度的致密砂岩等致密储层, 致密储层物性相对有利, 含油性相对较好, 存在从源岩到夹层致密储层的微运移。鄂尔多斯盆地延长组7段1+2亚段(长7¹⁺²亚段)致密砂岩最为典型; 混积型页岩油则指富有机质页岩内碳酸盐岩与碎屑岩混积形成的储集体, 源、储多频繁互层、单层厚度较薄, 岩石脆性好。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组、渤海湾盆地沧东凹陷孔二段、济阳坳陷沙河街组和苏北阜宁组二段(阜二段)均为混积型页岩油^[12-16]; 页岩型页岩油原位滞留在自身生烃的页岩储层, 既生烃又储烃。松辽盆地青山口组古龙

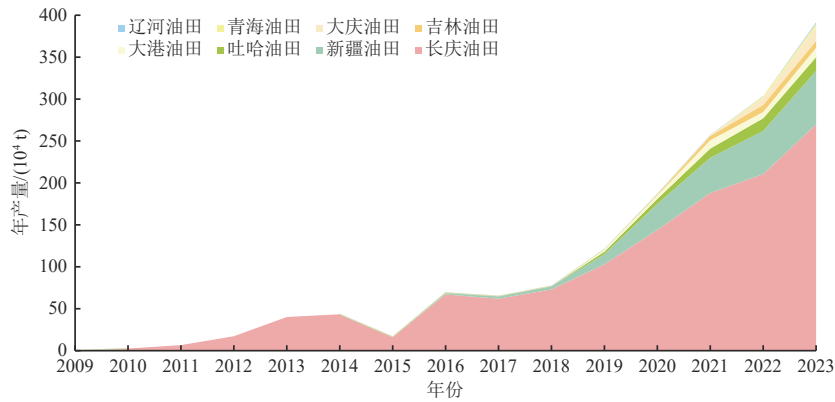


图1 中国石油陆相中-高成熟度页岩油年产量分布

Fig. 1 Annual production of CNPC's continental shale oil of medium-to-high maturity

表1 中国陆相中-高成熟度页岩油类型及地质特征^[11-15]

Table 1 Types and geological characteristics of continental shale oil reservoirs of medium-to-high maturity in China^[11-15]

划分依据	类型	地质特征	参考文献
甜点岩相类型	夹层型	“甜点”为近源薄层砂岩或凝灰岩储集层	焦方正(2020)
	混积型	“甜点”为源内砂质、钙质等有利储集层	
	页岩型	“甜点”为源内捕获或原地滞留砂质、钙质纹层	
松辽盆地青山口组 岩性组合	夹层型	砂岩、页岩互层:页岩占60 % ~ 80 %,单砂体厚度2 ~ 4 m	孙龙德(2021)
	互层型	厚层页岩夹薄层粉砂岩:页岩占80 % ~ 95 %,单砂体厚度0.2 ~ 1.5 m	
	纹层型	发育厚度<0.01 m长英质和混合质纹层,源-储一体	
	页理型	页岩较纯、占比超95 %,发育页理,纳米级孔缝体系,改善储集层物性	
富集机理流动特征与 开发方式	致密油型	短距离油气运移,非达西流动特征,开发方式和开发技术较成熟,递减规律相对清楚	赵文智(2022)
	过渡型	运移与滞留两种富集方式,非达西和组分流动,开发方式和技术视资源主体性而不同	
	页岩型	无运移或层内微运移,滞留烃为主,组分流动特征,无成熟开发方式和技术,递减规律不明	
鄂尔多斯盆地 长7段砂/地比和 砂体叠置厚度	夹层型	重力流砂与半深-深湖泥页岩互层:砂/地比>20 % (一般<30 %),单砂体厚度<5 m	付金华(2021)
		三角洲前缘砂岩与前缘泥岩互层:一般砂/地比<30 %,单砂体厚度5 ~ 10 m	
	页岩型	纹层型:半深-深湖相厚层泥页岩夹薄层粉砂岩砂岩,砂/地比5 % ~ 20 %,单砂体厚度2 ~ 4 m	
		页理型:半深-深湖相黑色页岩、暗色泥岩为主,砂/地比<5 %,单个粉砂岩体厚度<2 m	
页岩油储集岩石类型和 赋存空间	纯页岩型	纹层厚度:纹层状页岩(<1 mm)、层状页岩(1 ~ 10 mm)、块状页岩(>10 mm)	金之钧(2023)
		矿物成分:黏土质页岩、长英质页岩、灰云质页岩、混合质页岩	
		热解滞留烃含量 S_1 :低含油(<2 mg/g)、中含油(2 ~ 4 mg/g)、高含油(>4 mg/g)	
		压力系数:异常低压油藏(<0.8)、常压油藏(0.8 ~ 1.2)、异常高压油藏(>1.2)	

页岩油、鄂尔多斯盆地延长组长7³亚段页岩均为此类。

1.1 中国陆上页岩油发展历程

早在20世纪30年代,中国石油地质学者谢家荣先生在《石油》一书中提出页岩中是含有液态石油^[6,17]。随着中国石油工业的起步,页岩油也逐渐获得勘探突破。整体看,中国陆上页岩油勘探大致经历3个主要阶段(图2)。

1) 泥岩裂缝+砂岩夹层型页岩油勘探探索阶段(1970—1998年),相继在渤海湾盆地沾化凹陷沙一段

直井Y18井、江汉盆地潜4段直井王北11-5井、松辽盆地青山口组直井英12井等泥页岩裂缝获得突破^[18-21],同时鄂尔多斯盆地庆6、岭3和正27井等在长7段页岩层系内直井压裂砂岩获得工业油流,但受限于钻井和压裂工艺技术,未获实质性勘探突破。

2) 夹层/混积型页岩油勘探快速突破阶段(2009—2018年),鄂尔多斯盆地长7段水平井丹101井、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组吉25井、渤海湾盆地沧东凹陷孔二段直井官东1701H井等相继获得突破,水平钻井、体积压裂技术逐步应用,单井产量提升,实现了夹层型与混积型页岩油勘探快速突破。



图2 中国陆相中-高成熟度页岩油勘探历程

Fig. 2 Exploration history of continental shale oil reservoirs of medium-to-high maturity in China

3) 页岩型和夹层/混积型多类页岩油规模勘探、逐步效益建产阶段(2018年至今)松辽盆地古龙凹陷青山口组古页油平1井的历史性突破,揭开页岩型页岩油的勘探序幕。同时夹层型和混积型页岩油规模勘探不断扩大,效益建产逐渐实现。相继建成鄂尔多斯盆地陇东页岩油示范区、准噶尔盆地吉木萨尔芦草沟组国家级陆相页岩油示范区、大庆古龙陆相页岩油国家级示范区^[22]以及渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组国家级示范区,页岩油勘探开发进入快速推进发展的新阶段。

1.2 与北美页岩油的差异

美国页岩油富集的层系以海相沉积为主,有机质丰度(总有机碳含量 TOC)普遍大于2%,平均3%,最高可达25%,有机质类型以Ⅱ型为主,油气同产,伴生气占比近30%,页岩油井气/油比高,多属于挥发油或凝析油,压力系数较高,地层能量充足,原油密度在 $0.77 \sim 0.83 \text{ g/cm}^3$,气/油比多数大于 $100 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最大可达 $850 \text{ m}^3/\text{m}^3$,压力系数在 $1.3 \sim 1.8$,孔隙度主体介于

5%~12%,孔隙结构好,含油性良好,可动烃含量高,易流动,脆性高易压裂。中国陆相页岩油 TOC 分布范围广,介于0.2%~17.0%,有机质类型以Ⅰ型和Ⅱ₁型为主,多属于黑油,气/油比相对较低,含蜡较高,压力系数相对较低,地层能量较弱,原油密度为 $0.760 \sim 0.893 \text{ g/cm}^3$,气/油比最高达 $120 \text{ m}^3/\text{m}^3$,压力系数在 $0.7 \sim 1.7$,孔隙度介于0.2%~19.0%,关键地质参数分布区间广,地质条件整体略差。整体看,美国页岩油地质条件相对有利,但页岩油产量也经历了2000—2011年近12年的低位徘徊时期,年产量均未超亿吨(图3),2012—2017年6年的缓慢增长期,直至2018年页岩油年产量达到 $3.25 \times 10^8 \text{ t}$,产量快速增长,进入稳定发展期。中国石油2010年页岩油产量 $2.5 \times 10^4 \text{ t}$,至2022年已达 $303.6 \times 10^4 \text{ t}$,2023年增至 $391.6 \times 10^4 \text{ t}$,展现出良好的勘探潜力。

但相比北美页岩油,中国页岩油勘探开发仍处于积极推进阶段。截至2022年底,中国石油页岩油水平井共约1 875口,美国页岩油水平井数量为 22.33×10^4 口,是中国石油页岩油水平井数的119倍,而美国

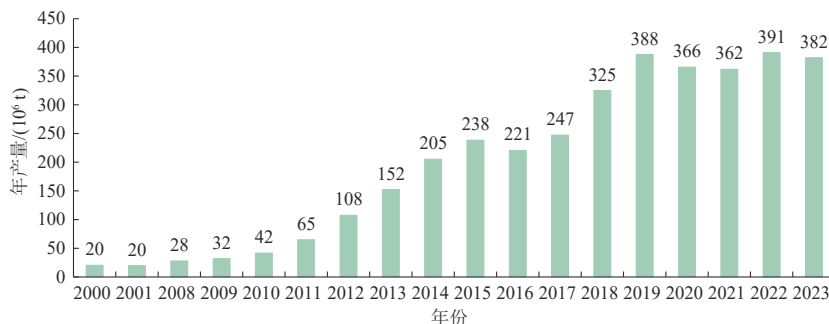


图3 美国页岩油历年产量分布(据EIA, 2024)

Fig. 3 Annual production of shale oil in the U.S. (EIA, 2024)

页岩油产量则为中国石油的128倍,同时,同等改造强度下,按千米日产量、初始日产量及完全成本等关键参数,均与北美存在较大差距,同样未来原油增储上产潜力也值得期待。

1.3 中国石油页岩油勘探现状

从页岩油勘探历程看,不同类型页岩油勘探阶段存在差异。夹层型页岩油储层物性相对有利,鄂尔多斯盆地长7¹⁺²亚段长石砂岩、岩屑长石砂岩平均孔隙度7%,最高可达10%,含油饱和度相对较高,平均大于75%,勘探效果显著,已在鄂尔多斯盆地陇东地区实现了规模勘探开发。混积型页岩油则在渤海湾盆地古近系沙河街组三段、四段与一段,柴达木盆地古近系下干柴沟组与准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组等均获勘探突破,储层以泥灰岩、云质泥岩、致密藻灰岩、致密灰岩和灰云质页岩等,孔隙度介于2%~10%,局部微裂缝发育段孔隙度可达10%以上,含油饱和度中等,单井产量差异大。页岩型页岩油仅在松辽盆地开展了较大规模的平台井开发试验,正处于效益勘探的攻坚期。

1.3.1 夹层型页岩油

夹层型页岩油勘探稳步推进,上产显著。鄂尔多斯盆地长7¹⁺²亚段为典型的夹层型页岩油,岩性特征为富有机质泥页岩夹多期块状粉、细砂岩,单砂体厚2~5 m,提交探明储量 12.55×10^8 t,其中陇东地区约 11.54×10^8 t,陕北地区为 1.01×10^8 t。盆地西233、庄183和宁89井区开展水平井探索试验,25口水平井试油阶段的平均原油日产量超过100 t,发现新安边亿吨级油田^[23]。其中,西平238-77井开发效果最佳,2017年初期平均日产原油33.08 t,目前平均9.09 t,已累产油 4.7×10^4 t。截至2023年,长庆油田夹层型页岩油已累产油 $1\,243.6 \times 10^4$ t,实现了规模勘探开发。

1.3.2 混积型页岩油

混积型页岩油勘探多点开花。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组、渤海湾盆地沧东凹陷孔二段、准噶尔盆地玛湖凹陷风城组和柴达木盆地英雄岭凹陷下干柴沟组均获高产油气流。其中,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组直井吉25井和水平井吉172-H井勘探效果显著,吉172-H井原油初始产量69.46 t/d,累产 2.05×10^4 t^[12]。沧东凹陷官1608井日产原油47.1 t,官东1701H井最高日产原油68.3 t^[15],目前开井37口,超百吨井4口,累产油已达 17.8×10^4 t,建成了年产

10万吨级的混积型页岩油开发示范区;准噶尔盆地玛湖凹陷风城组主要岩性为云质泥页岩,地层厚度300~500 m,有利区面积达1 830 km²,多口井获得工业油流,截至2023年,玛51X井(大斜度)开发效果最佳,日产油达到125.86 m³;柴达木盆地英雄岭凹陷下干柴沟组岩性为云灰质泥页岩夹薄层灰云岩,地层厚度1 000~1 200 m,柴平1井开发效果最佳,最高日产油气132 t,累产油 1.5×10^4 m³,累产气 194.6×10^4 m³^[24],近期估算地质资源量约 21×10^4 t,按现今埋深5 500 m以浅、TOC大于0.8%圈定的有利面积达800 km²。

1.3.3 页岩型页岩油

松辽盆地古龙凹陷青山口组岩性以富有机质泥页岩为主^[25],截至2023年底,共完成压裂137口,投产126口井,5个试验井组,累产页岩油 27.8×10^4 t,2023年达 17.1×10^4 t,有利面积为 1.46×10^4 km²。其中,自2019年始,古页岩平1井初期日产油30.5 t,日产气13 032.0 m³^[8],至2024年4月,日产油仍为10.0 t,日产气10 317.2 m³,已累产油 1.24×10^4 t,累产气 632.19×10^4 m³。

1.4 中国石油页岩油勘探潜力

“十三五”资源评价,中国石油陆上中-高熟页岩油地质资源量 201×10^8 t^[22],占中国页岩油地质资源量七成,主要集中在鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、准噶尔盆地和四川盆地。近期有学者重新评价中国陆上十大盆地中-高熟页岩油资源,给出的地质资源量增至 318.99×10^8 t,技术可采资源量 22.78×10^8 t^[26]。其中,鄂尔多斯盆地页岩油地质资源量 107.30×10^8 t,技术可采资源量为 10.26×10^8 t;松辽盆地页岩油地质资源量为 77.28×10^8 t,技术可采资源量为 3.82×10^8 t;渤海湾盆地页岩油地质资源量为 75.19×10^8 t,技术可采资源量为 4.51×10^8 t;准噶尔盆地页岩油地质资源量为 25.14×10^8 t,技术可采资源量为 1.81×10^8 t;四川盆地页岩油地质资源量为 20.93×10^8 t,技术可采资源量为 1.43×10^8 t^[26]。同时,江汉、苏北、柴达木和三塘湖等盆地页岩油地质资源量也超亿吨。。

2 中国石油页岩油地质勘探理论认识与新进展

实践证实,地质认识的突破和勘探开发技术的不断创新,引领了中国页岩油规模增产。2009年,中国

学者引入连续型油气藏概念并据此创新形成了陆相致密油概念^[27-30],同时在陆相页岩中发现了纳米孔喉系统^[31],并提出陆相页岩油的源-储一体、有序聚集的地质认识。2012年,随着场发射扫描电镜和多尺度CT等多尺度页岩油储层表征技术研发,实现了纳米级孔喉精细表征,推动了陆相页岩油甜点评价与预测。同时形成了湖盆细粒沉积地质学和非常规油气地质学,有效刻画了陆相页岩油的分布范围,推动了新安边亿吨级页岩油田的发现。2018年,围绕陆相不同类型页岩油特殊性^[32],提出陆相页岩油地质条件的非均质性特征与差异化富集规律的新认识^[2],形成多层系、立体式、大井丛、工厂化“小簇距+多簇射孔+高强度加砂+大排量泵注+石英砂替代陶粒+暂堵转向”技术,扩大了页岩油的勘探开发规模和领域,建成了庆城10亿吨级大油田、吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区和古龙国家级陆相页岩油示范区。

2.1 中国石油页岩油地质勘探理论认识进展

2.1.1 淡、咸水湖盆生、排烃差异化认识

根据传统生烃理论,当源岩 R_o (镜质体反射率)从0.5%时进入生油窗, $R_o \approx 1.0\%$ 时大规模生、排烃,此时页岩层系内烃类含量逐渐增加,随着成熟度不断增大,液态烃类逐渐减少,气态烃含量增加,原油密度和黏度降低,流动性显著增强,对于富含黏土-有机质等纳米级基质孔喉的页岩型页岩油更为有利。因此,成熟度成为页岩型页岩油有利区优选的关键参数,松辽盆地青山口组古龙页岩油即以 $R_o > 1.2\%$ 作为轻质油带划分的重要界线。

近期围绕三塘湖盆地芦草沟组、松辽盆地三肇凹陷青山口组富有机质源岩,开展系统烃源岩评价与生、排烃物理模拟,揭示咸化湖盆富有机质页岩生烃门槛偏低,在 R_o 在0.6%~0.8%时可大量生烃,且排烃早。松辽盆地三肇凹陷青山口组沉积期,水体呈半咸水环境,嗜盐微生物发育,源岩呈现早生、早排的特征,数值模拟表明,三肇凹陷青山口组在72 Ma时达到生烃高峰,且 R_o 仅为0.8%,总体早于古龙凹陷的65 Ma, R_o 介于0.7%~1.0%时,即可生成规模页岩油气,扩大了页岩油勘探范围。同时,咸化湖盆页岩层系碳酸盐矿物含量比较高,存在溶蚀粒间孔喉,也利于原油充注、流动与改造。

2.1.2 湖盆细粒沉积与储层多样性

陆相页岩层系多形成于半深湖-深湖相,极少数

形成于浅湖-半深湖相,储层类型多样,分布面积大,岩性包含致密砂岩、细粒混积岩、致密碳酸盐岩与页岩等多类岩性。淡水湖盆细粒沉积由深至浅可分深湖相宁静水体页岩区、砂质碎屑流背景深湖相重力流区和前三角洲粉砂岩区。其中,深湖相宁静水体页岩区以页岩为主,有机碳含量高,I型干酪根,安静水体,强还原环境,黏土矿物悬浮沉积;砂质碎屑流背景深湖相重力流区,砂体累计厚度大,透镜状包裹于烃源岩中,含油饱和度高,主要发育碎屑流砂体和浊流砂体,碎屑流砂体以块状细砂岩为主,见泥砾和变形构造,属于湖底扇扇根沉积。浊流砂体以粒序层理粉砂岩,见火焰构造,属于湖底扇扇端沉积;前三角洲背景粉砂岩分布区以泥岩、粉砂质泥岩为主,有机碳含量低,砂体厚度薄。

其中,三角洲前缘水下分流河道砂体以及席状砂因处于盆地斜坡部位,受重力作用失稳开始滑动,而后滑动块体内部构造发生变形、进一步液化,继而向滑塌沉积转化,形成滑动-滑塌等深水沉积类型。随着沉积物继续向前搬运,流体发生塑性形变,以黏性块体搬运沉积,当与周围水体进一步混合时会发生流体转变逐渐转化为砂质碎屑流,在“滑水作用”的影响下,砂质碎屑流在湖盆坡折带形成较远距离的搬运。随砂质碎屑流搬运至坡脚处,坡度变缓,沉积物大量卸载,并与湖盆水体发生稀释,流体形态逐渐向浊流转化。浊流继续搬运可将粒度较细的细粒沉积岩搬运至湖盆中央深水区,从而形成以粉砂和泥质沉积物为主的朵叶状和扇状沉积体。此类远源浊流形成的细粒沉积物常常与深湖烃源岩形成互层结构,是页岩油赋存的有利载体。松辽盆地青山口组页岩油储层就包含三角洲前缘砂岩、深湖重力流砂岩、深湖泥页岩和半深湖灰云岩等(图4,图5),储层累计厚度2~40 m,孔隙度介于1%~12%。与富有机质页岩共生的致密砂岩所占比重较大,其砂体成因为深湖重力流沉积,特别是远端浊流形成的细粒沉积物,源、储接触更为有利。

2.1.3 页岩油差异化富集因素

陆相淡水湖盆页岩层系发育有机质、泥岩、页岩、粉砂岩和细砂岩等岩石组合,页岩自身也呈现富有机质纹层与黏土、长英质纹层互层或混合的分布特征,咸化湖盆则呈现富有机质纹层与碳酸盐矿物纹层互层或混合基本特征^[33-34]。近期以陆相页岩纹层结构与组合类型精细表征为基础,采用密闭取心和液氮冷冻运输、低温密闭粉碎和分步热解、GCMS烃类全组分

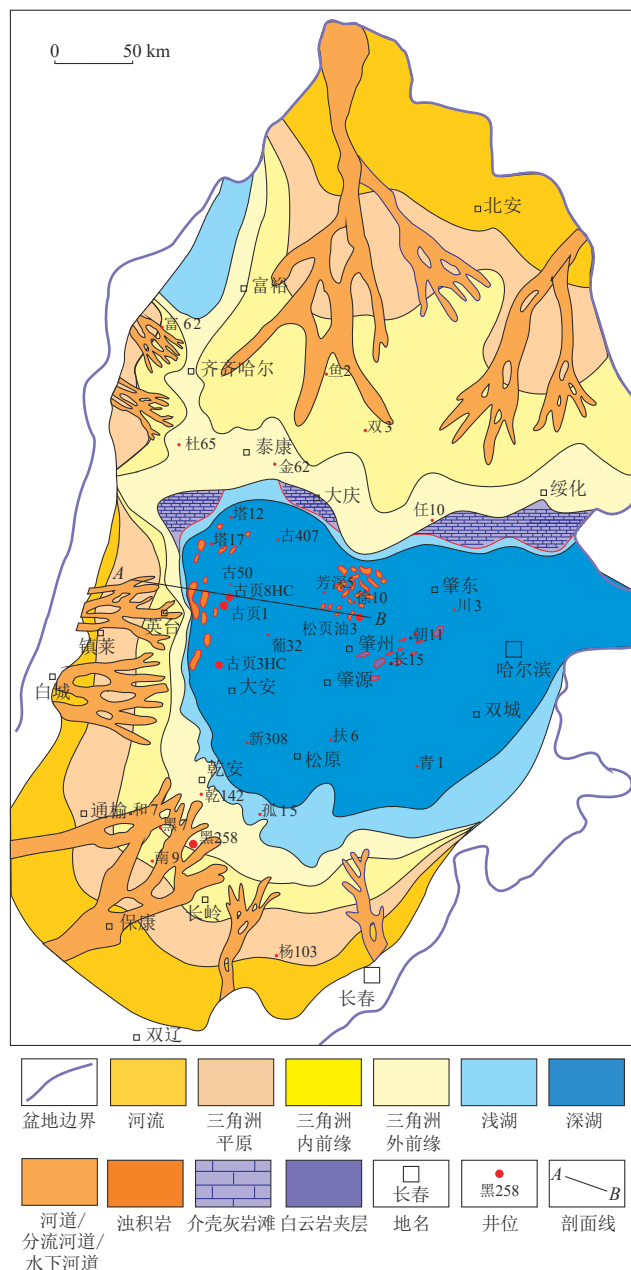
图4 松辽盆地白垩系青山口组沉积相平面图^[2]

Fig. 4 Map showing sedimentary facies of the Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao Basin

检测、不同温度点滞留烃量、滞留烃组分等含油性和可动性评价方法,精细对比烃类组成、含量与分布特征,陆相湖盆页岩层系均发育源内微运聚特征,富有机质纹层有机碳丰度高,生烃能力强,生成烃类向紧邻的长英质纹层、陆源碎屑粉砂岩、内源形成的碳酸盐岩等无机矿物运聚,构成多尺度的生-储-盖组合^[35-36]。同时,生成烃类也会原位滞留在富有机质干酪根内富集成藏。

因此,根据微运聚的差异,陆相页岩油富集程度受到源岩生烃能力、运聚效率、长英质、碳酸盐矿物储集

能力以及保存条件的综合控制,甜点段即可是页岩层系内砂岩夹层、碳酸盐纹层以及其他利于储集烃类的岩相类型,也可能是自身生烃的页岩,甜点岩相类型多样。柴达木盆地古近系下干柴沟组英雄岭页岩油垂向发育纹层状云灰岩、纹层状灰云岩、纹层状黏土质页岩、层状泥岩、层状灰云岩、层状云灰岩以及砂岩,生烃能力与储集性能差异明显,但纹层状云灰岩有机碳丰度最高,TOC可达2.33%,生烃能力强,层状灰云岩孔隙度最高,平均为5.08%,储集性能有利,紧邻源岩(纹层状云灰岩)的有利储层(层状灰云岩),可动油相对高,为甜点富集段。

2.1.4 页岩油甜点差异化评价标准

陆相页岩油甜点类型多样,评价标准应存在差异。其中,夹层型页岩油富集甜点段多为富有机质页岩层系中相对高孔、高渗的砂岩或碳酸盐岩,砂岩或碳酸盐岩甜点段自身普遍不具生烃能力,富集烃类均由临近富有机质页岩运聚。甜点富集程度受邻近富有机质页岩生、排烃效率、砂岩夹层储集物性、厚度和充注效率影响。以鄂尔多斯盆地长7¹⁺²亚段为例,富有机质页岩形成于淡水湖盆,当 $R_o > 1.0\%$ 、TOC>2.0%时,排烃量超过3.8 mg/g,当TOC>8.0%时,排烃量超过6 mg/g,富有机质页岩生烃、排烃能力是夹层型页岩油富集的物质基础。而结合充注物理模拟实验证实,砂岩夹层孔隙度、孔喉半径与渗透率的大小决定了页岩油饱和度高低,进而决定了夹层型页岩油富集程度。

混积型页岩油岩性复杂,垂向频繁互层,多数岩相既可生烃也可储烃,有效源-储-盖富集组合相对有利。柴达木盆地英雄岭页岩油储层发育纹层状云灰岩具较高TOC和 S_1 (游离烃含量),其中TOC分布于0.24%~2.33%,平均0.98%, S_1 分布于0.012~14.860 mg/g,平均4.680 mg/g,而纹层状黏土质页岩TOC介于0.16%~1.70%,平均0.64%, S_1 介于0.06~8.63 mg/g,平均2.54 mg/g,源岩品质明显偏低。其中,纹层状云灰岩发育毫米级互层的富有机质纹层与钙质矿物纹层,烃类向钙质纹层运聚,但其总孔隙度和渗透率不高,无法作为有效储层。而层状灰岩具较高孔隙度和渗透率且发育微米级孔隙,连通性较好,为有效的储层,孔隙度最高可达12.32%,平均5.08%,显著优于其他岩相。因此,层状灰云岩与纹层状云灰岩组合,普遍具较好含油性。柴902井靶层为此有利源-储组合,初期自喷,最高日产油32.5 m³,日产气2 582 m³,目前油压12~17 MPa,日产油5~10 m³,累产油3 306 m³,累产气94×10⁴ m³;柴平1井最高日产油气

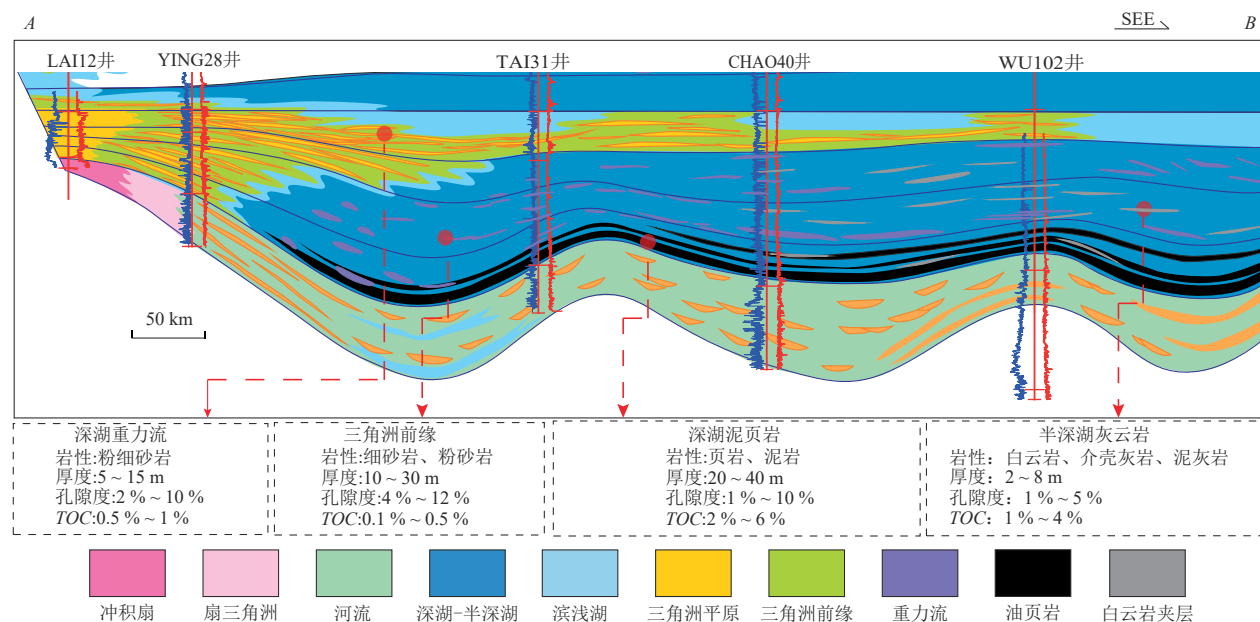


图5 松辽盆地白垩系青山口组沉积剖面(剖面位置见图4)

Fig. 5 Sedimentary cross-section of the Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao Basin
(see the section line A—B in Fig. 4 for the section location)^[2]

132 t, 累产油 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 累产气 $194.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[24]。济阳坳陷古近系同样呈现由优质生烃层与储集层组成的“双层结构”, 富有机质黏土岩相 TOC 在 4.32 % ~ 12.40 %, 平均 8.20 %, 纹层状富碳酸盐岩岩相裂缝孔喉直径一般达到 10 μm 以上, 粒间孔、粒内孔和溶蚀孔直径为 0.025 ~ 2.08 μm , 孔隙度为 5.00 % ~ 16.00 %, 平均 8.72 %, 两者形成成烃和成储“二元耦合”, 使得高孔高渗岩相烃类富集, 具有较高游离油比例^[14], BYP5 井最高日产油达 85.67 t, 最高日产气 $7.39 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[37]。

页岩型页岩油为典型源-储一体^[38], 原位滞留烃量、孔喉结构、烃类流动能力以及压裂改造效果是页岩型页岩油甜点评价的关键因素。其中滞留烃总量是富集的基础条件, 决定了地质甜点的优劣, 烃类极性体现了滞留烃组分的差异, 低碳数烃类含量越高, 流动性越好, 孔喉尺寸决定了赋存在纳米孔喉系统滞留烃能否可动, 特别是受限空间内烃类流动的能力。而页岩型页岩油有别于其他页岩油, 自身富黏土-有机质的岩石特征的压裂改造效果也是评价优选靶体的关键, 对于页岩而言, 烃类普遍原位滞留在富黏土矿物的有机质纹层段, 滞留烃量高, 但相比紧邻的长英质页岩, 富有机质的黏土页岩碎屑石英含量低^[39], 可压性相对较差, 现有技术压裂改造缝网体积有限, 影响开发效果。松辽盆地古龙凹陷青山口组有利甜点区烃源岩 R_o 分布在 1.3 % ~ 1.7 %, 饱和烃量大于 80 %, 同时甲烷等

轻烃含量较高, 相同的压裂改造工艺, 产量明显优于烃源岩 R_o 为 1.0 % 的其他地区。

2.2 中国石油页岩油勘探新进展

2.2.1 夹层型页岩油

鄂尔多斯盆地长 7¹⁺² 亚段半深湖-深湖重力流砂体是中国石油夹层型页岩油主要勘探开发对象。自 2011 年开始, 在 6 年时间内, 西 233、庄 183 和宁 89 等 3 个试验区陆续获得高产工业油流, 其中 25 口水平井试油日产超过 100 t, 在后续试采能维持日产超 10 t, 截至 2023 年底, 仍能日产油 5 t。在 3 个试验区成功勘探开发基础上, 2019 年发现了储量规模超 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 的庆城油田^[40]。2022 年长 7¹ 和长 7² 亚段夹层型页岩油在庆城油田南部新增探明储量 $1.1 \times 10^8 \text{ t}$, 含油面积 406 km^2 。近两年部署实施的 J188H1, L31H1, G62H2 和 G62H3 等系列水平井均获高产, 陕北新区带落实夹层型页岩油含油面积 1 200 km^2 , 储量规模为 $(3 \sim 5) \times 10^8 \text{ t}$ 。同时, 中国石油在松辽盆地古龙凹陷青山口组夹层型页岩油英页 1H 井也相继获得突破。

2.2.2 混积型页岩油

2018 年以来, 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混积型页岩油相继部署 56 口水平井, 其中 40 口以芦草沟组“上甜点段”为靶体, 16 口以“下甜点段”为靶体,

获得探明储量 1.27×10^8 t, 预测储量 2.70×10^8 t。在2020年开启“新疆吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区”建设^[41], 已实现年产油量超 50×10^4 t。同时, 在准噶尔盆地五彩湾-石树沟凹陷平地泉组和玛湖凹陷风城组也相继取得页岩油规模发现, 准噶尔盆地第四次油气资源评价埋深4 500 m以浅3个区带页岩油地质资源量为 $(20 \sim 25) \times 10^8$ t^[41], 吉木萨尔凹陷4 500 m以深地区仍有1/3的有利区未作评价。近期玛页1井和玛51X井等并在4 500 m以深致密(页岩)油层段获得了百吨高产、稳产的成效, 证实玛湖凹陷西侧环带具有超 10×10^8 t规模的致密(页岩)油勘探潜力^[41]。2021年柴达木盆地干柴沟组柴平1井、渤海湾盆地埕口北斜坡沙一段页岩油歧页1H井也相继获得勘探突破。

2.2.3 页岩型页岩油

自2018年以来, 针对松辽盆地青山口组部署的古页1、英X57和朝21等18口直井日产油1.36~6.72 t, 证实了青二段下部到青一段整体含油。含油地层厚度达100~140 m, 特别是在古龙凹陷青一段下部50~60 m厚的页岩地层中发育轻质油带, 横向分布稳定, 面积2 326 km²。针对青一段页岩优势甜点层部署的松页油1HF、松页油2HF、古页油平1和英页1H等4口水平井均获得工业油流。其中古页油平1井位于松辽盆地中央坳陷区古龙凹陷, 青一段下部Q1~Q4页岩为甜点靶层, 获得日产油30.5 t、日产气13 032 m³的高产工业油气流^[8], 有效推动了“大庆古龙陆相页岩油国家级示范区”的建设, 截至2023年底, 示范区累产油27.8 × 10⁴ t。

同时, 咸化湖盆沉积富含细菌和藻类, 是低成熟度阶段可大量生油的重要母质生源, 同时咸化湖盆中沉积的盐类对烃源岩生烃具有较强的催化作用, 能够降低生烃活化能, 从而在低温条件下催化脂肪酸脱羧生烃^[42-43]。松辽盆地东部三肇凹陷青山口组页岩TOC高于古龙凹陷, R_o 介于0.7%~1.0%, 依据咸化湖盆富有机质页岩早生早排地化特征, 在三肇凹陷青山口组页岩 $R_o \approx 0.85\%$ 区带部署肇页1H井获日产15.6 m³, 将松辽盆地东部三肇凹陷页岩油有利勘探面积拓展至8 900 km²。

3 未来勘探方向与挑战

整体看, 中国石油重点页岩层系钻井多可见油, 直井单层试油产量0.25~44.95 t/d, 鄂尔多斯盆地德34直井长7¹亚段日产油达27.88 t、德6直井长7²亚段

日产油26.01 t、陇71直井长7³亚段日产油22.1 t, 长7页岩层系3个亚段均实现工业产量。柴达木盆地古近系下干柴沟组英雄岭页岩油13个箱体直井均获油气, 日产油介于4.22~44.95 t, 柴905井20号箱体获日产油44.95 t、柴902井5号箱体获日产油32.53 t, 松辽盆地青山口组页岩油Q1—Q9油层单层试油也均获油气。但受陆相湖盆沉积微相变化快, 页岩层系地质特征非均质性强, 垂向多套甜点产油差异大, 富集高产认识仍需深化, 特别是不同页岩油甜点评价标准针对性不足, 限制了高效勘探开发。中国石油12家油田页岩油甜点指标多达27~34项(表2)^[44], 页岩油地质特征与富集高产因素认识不够深入, 地质甜点认识有待深化, 但这也为未来陆相页岩油的勘探提供了多样的可能性。

3.1 陆相湖盆深湖区多类型储集砂体是夹层型页岩油有利的勘探方向

陆相湖盆受物源供给、水动力条件、气候和盆地底形等因素影响, 富有机质页岩层系内部、边部均可发育多类型储集砂体^[45]。目前湖盆夹层型页岩油勘探多以三角洲前缘水下分流河道、深湖区碎屑流砂体为主。而深湖区发育规模重力流浊积水道、远端浊积砂体以及异重力流砂体。储集砂体多紧邻富有机质页岩, 源-储组合有利。尽管单层厚度介于0.2~2.0 m, 但累计厚度大, 可与页岩构成有利甜点段。松辽盆地三肇凹陷北部青山口组物源进入深湖区页岩层系, 发育远端浊积粉砂岩, 垂向可见4~8层浊积粉砂岩, 累计厚度3~5 m, 粒间溶蚀孔隙发育, 孔隙度可达7.6%, 是陆相淡水湖盆夹层型页岩油未来相对有利的优质储量。

但由于深湖区页岩层系内富含油砂岩沉积机制与分布规律不清, 且厚度普遍小于5 m, 横向连续性较差, 薄砂层地震资料成像精度与地球物理精细预测精度低, 严重制约了水平井的钻遇率。

3.2 咸化湖盆最佳源-储组合是混积型页岩油有利的勘探方向

混积型页岩油岩性变化更加频繁, 单层岩性厚度普遍小于1 m, 垂向具生烃-储烃的岩相组合均可产油。但综合评价优选最佳源-储组合富集高产段是混积型页岩油的高效勘探开发的关键。柴达米盆地古近系下干柴沟组英雄岭混积型页岩油, 沉积厚度达上千米, 岩相类型互层配置, 最佳富集段即为层状灰云岩与纹层状云灰岩组合(图6), 源-储组合最为有利, 可动

表2 中国油气田中-高成熟度页岩油甜点评价相关参数^[44]

Table 2 Parameters for sweet spot evaluation of shale oil reservoirs of medium-to-high maturity in China's oil and gas fields^[44]

评价参数	大庆	吉林	辽河	大港	胜利	华北	冀东	苏北	长庆	西南	青海	玉门	吐哈	新疆油田	
	油田	油田	油田	油田	油田	油田	油田	油田	油田	油田	油田	油田	油田	吉木萨尔	玛湖
岩性-岩相		√	√		√	√		√				√			√
页岩厚度/m									√	√					
TOC/%		√	√		√	√	√	√		√	√	√		√	√
残留烃含量 S_{r} /(mg/g)	√		√	√	√	√	√	√		√		√			
含油饱和度指数OSI/(mg/g)		√			√		√	√							√
R_{o} /%	√	√			√	√	√	√		√					
氯仿沥青“A”含量/%															√
有效孔隙度/%		√					√	√	√	√	√	√	√		
总孔隙度/%	√														
渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)					√			√				√			
页理密度/(条/m)	√											√			
裂缝发育			√		√			√		√					√
含油饱和度/%	√	√						√			√	√	√	√	
含水饱和度/%														√	
原油黏度/(mPa·s)	√							√							
气/油比/(m^3/m^3)	√	√			√			√							
脆性矿物含量/%	√	√			√	√		√		√					
脆性指数			√	√	√		√		√		√	√			
杨氏模量/GPa	√							√							
泊松比	√														
应力差/MPa	√							√							
最小水平主应力/MPa									√						
应力各向异性			√		√										
可压指数					√										
黏土矿物含量/%							√								
压力系数	√	√			√	√				√					
单层有效厚度/m		√													

烃含量相对较高。

因此,混积型页岩油亟需厘清烃类运聚规律,明确优势运聚单元,落实有利富集岩相组合。同时,混积型页岩油垂向单一岩性厚度相对较小,地球物理性质差异小,虽然测井分辨率可有效识别,但地震岩性预测多解性强,预测精度及符合率偏低,也面临甜点空间分布刻画难度大的技术挑战。

3.3 陆相咸化湖盆富有机质页岩层系是页岩型页岩油勘探拓展的新方向

页岩沉积搬运机制复杂,在埋藏时经历复杂成岩作用,造成了其具有复杂的沉积构造和矿物组成^[33, 34]。同一矿物基本具有特定的力学性质,但是当其分布在

不同沉积构造,具有不同的粒径和矿物接触关系时,其宏观力学性质会产生极大差异。以石英为例,陆源碎屑石英主要分布在长英质纹层,与长石等脆性矿物紧密接触,整体具有较高的脆性,而自生石英粒径小,普遍分散于黏土矿物之间,与其他脆性矿物接触程度弱,造成整体可压性偏差^[39]。因此,湖盆富有机质页岩普遍滞留烃总量高,是页岩型页岩油的地质甜点或资源甜点。其中,富有机质的长英质页岩可压性更强,应是页岩型页岩油有利的勘探对象。同时,陆相不同性质水体所发育烃源岩生、排烃存在差异性,咸化湖盆页岩型页岩油源岩成熟度(R_{o})范围可降至0.7%,三塘湖盆地芦草沟组等咸化湖盆将是有利勘探方向。

但在实际生产中,页岩型页岩油资源、工程甜点段

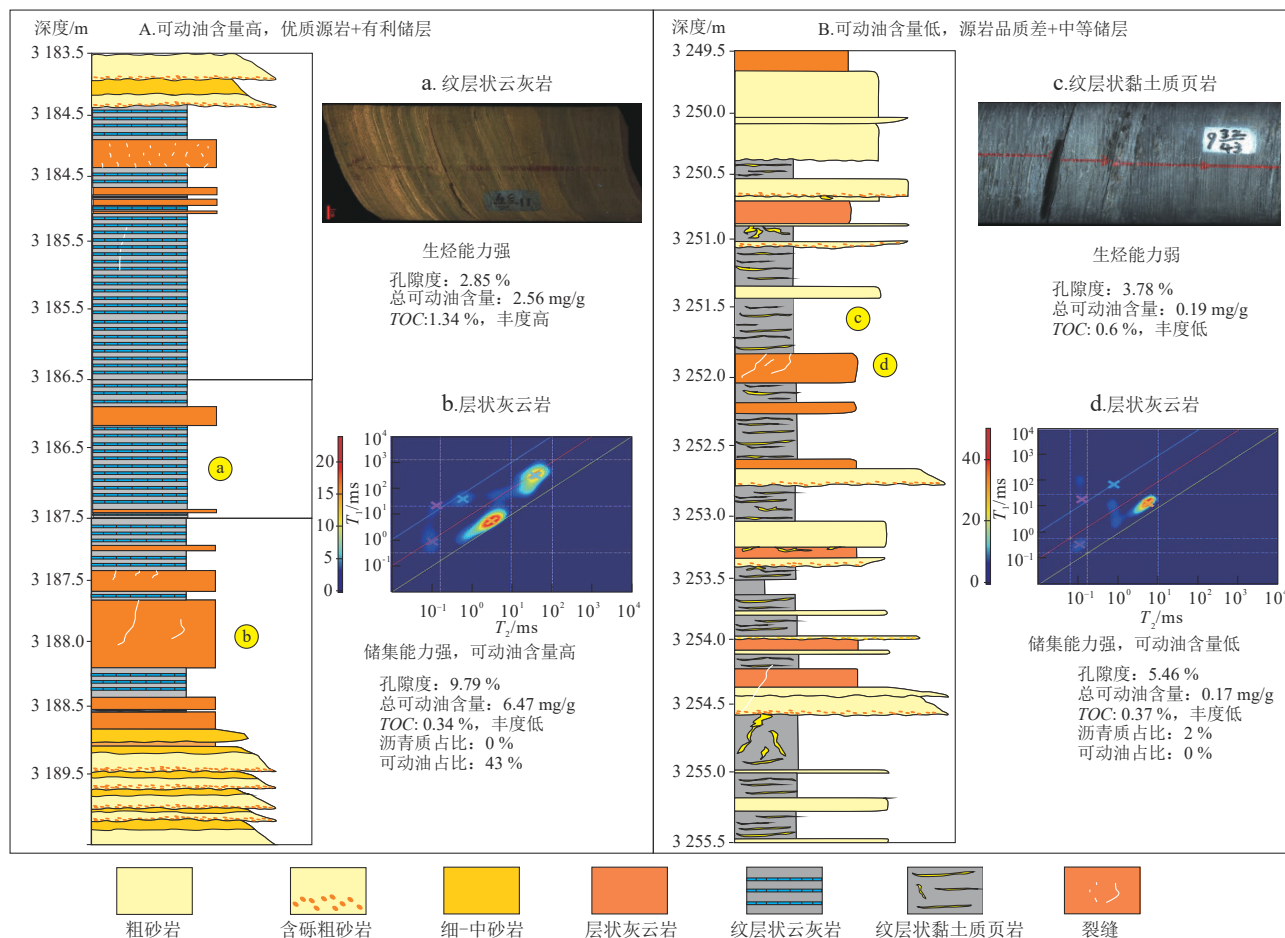


图6 柴达木盆地新近系下干柴沟组混积型页岩油岩相组合与含油性

Fig. 6 Lithofacies assemblages and oil-bearing properties of shale oil reservoirs of the mixed type in the Neogene Lower Ganchaigou Formation, Qaidam Basin

往往不一致。在理论上,有关页岩油地质-工程融合评价流程和指标的认识不足。在地质特征评价方面,多关注油气含量(TOC , S_1 , S_o)、储集性能(孔隙度、孔喉结构)、可流动性(API 、气/油比)和压力系统,而在工程改造评价方面,则多考虑脆性矿物(成因、含量、赋存形态)、地质力学参数(天然裂缝、杨氏模量和应力状态)等可改造性的评价参数,将地质甜点与工程甜点有机融合、多参数精细建模、迭代升级,优选富烃且易压段是一个重要挑战。

4 结语

中国石油陆上中-高熟页岩油地质资源丰富,产量不断攀升,但陆相不同类型页岩油地质特征存在非均质性,效益勘探仍存在地质认识与勘探技术的双重挑战。①夹层型页岩油虽在鄂尔多斯盆地长7¹⁺²亚段实现规模勘探,但靶体钻遇率变化大,深湖区细粒沉积体系研究薄弱,靶体空间展布刻画技术的准确性仍需

提升;②混积型页岩油地层垂向厚度大、岩性频繁互层、发育多套地质甜点,在柴达木盆地、渤海湾盆地、准噶尔盆地等均实现了勘探突破,但垂向地质甜点产量差异明显,页岩油高产主控因素不清,主力靶体评价优选仍需完善;③页岩型页岩油实现了松辽盆地青山口组古龙页岩油勘探突破,但陆相湖盆不同类型页岩生、排烃差异明显,页岩原位滞留烃特征变化大,兼顾地质-工程一体化靶体评价仍需深化。

未来勘探将①加强淡水湖盆深湖区多类型砂体成因机制与分布规律研究,实现薄层浊积砂体等夹层型页岩油效益勘探;②加强咸化湖盆富碳酸盐混积型页岩油源-储组合整体评价,优选主体靶体,实现混积型页岩油高效勘探;③加强淡水、咸化湖盆优质源岩生、排烃差异性评价,拓展页岩型页岩油勘探范围,实现不同湖盆页岩型页岩油地质-工程一体化精细勘探。

致谢:感谢黑龙江省揭榜挂帅项目“古龙页岩油形态、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] USGS. U. S. energy information bureau [DB/OL]. [2021-12-23]. <https://www.eia.gov/electricity/data/eia860/>.
- [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.
- 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.
- [3] 邹才能, 马锋, 潘松圻, 等. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 128-142.
- ZOU Caineng, MA Feng, PAN Songqi, et al. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 128-142.
- [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] 赵殿栋. 我国陆相页岩油勘探开发物探技术需求及对策分析[J]. 石油物探, 2022, 61(6): 963-974.
- ZHAO Diandong. Considerations on application strategies of geophysical techniques for lacustrine shale oil exploration and development [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(6): 963-974.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 付金华, 李士祥, 郭芪恒, 等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1702-1716.
- FU Jinhua, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1702-1716.
- [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.
- ZHAO Wenzhi, HU Suyun, ZHU Rukai. Formation and distribution of nonmarine shale oil in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [11] 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.
- [12] 谢建勇, 崔新疆, 李文波, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油效益开发探索与实践[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 99-110.
- XIE Jianyong, CUI Xinjiang, LI Wenbo, et al. Exploration and practice of benefit development of shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 99-110.
- [13] 金凤鸣, 韩文中, 时战楠, 等. 黄骅坳陷纹层型页岩油富集与提产提效关键技术[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 100-120.
- JIN Fengming, HAN Wenzhong, SHI Zhannan, et al. Enrichment characteristics and key technologies for production and efficiency enhancement of laminated shale oil in Huanghua Depression in Bohai Bay Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 100-120.
- [14] 刘惠民. 济阳坳陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 73-87.
- LIU Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 73-87.
- [15] 赵贤正, 蒲秀刚, 金凤鸣, 等. 黄骅坳陷页岩型页岩油富集规律及勘探有利区[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 158-175.
- ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, JIN Fengming, et al. Enrichment law and favorable exploration area of shale-type shale oil in Huanghua Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 158-175.
- [16] 朱相羽, 段宏亮, 孙雅雄. 苏北盆地高邮凹陷古近系陆相页岩油勘探突破及意义[J]. 石油学报, 2023, 44(8): 1206-1221, 1257.
- ZHU Xiangyu, DUAN Hongliang, SUN Yaxiong. Breakthrough and significance of Paleogene continental shale oil exploration in Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1206-1221, 1257.
- [17] 谢家荣. 石油[M]. 北京: 商务印书馆, 1930.
- XIE Jiarong. Petroleum [M]. Beijing: The Commercial Press, 1930.

- [18] 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, 20(1): 18-26.
ZHANG Guangya, CHEN Quanmao, LIU Laimin. A discussion on the characteristics of fractured reservoir of mudstone in Nanyang Depression and the mechanism of its formation [J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(1): 18-26.
- [19] 苏晓捷. 辽河断陷盆地泥岩裂缝油气藏研究[J]. 特种油气藏, 2003, 10(5): 29-31, 41.
SU Xiaojie. Study on fractured shale reservoirs in Liaohe Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2003, 10(5): 29-31, 41.
- [20] 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.
YANG Yong. Enrichment and high production regularities of shale oil reservoirs in continental rift basin: A case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(1): 1-20.
- [21] 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, 3(1): 160-167.
GAO Ruiqi. Characteristics of petroleum ceneration and expulsion in abnormal pressure shale zones and the formation of fractured shale reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1984, 3(1): 160-167.
- [22] 杨阳, 郑兴范, 肖毓祥, 等. 中国石油中高成熟度页岩油勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 23-33.
YANG Yang, ZHENG Xingfan, XIAO Yuxiang, et al. Progress in exploration and development of high-mature shale oil of PetroChina [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28 (3) : 23-33.
- [23] 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.
- [24] 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 18-31.
LI Guoxin, ZHU Rukai, ZHANG Yongshu, et al. Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49 (1) : 18-31.
- [25] 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.
- [26] 王建, 郭秋麟, 赵晨蕾, 等. 中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2033-2044.
WANG Jian, GUO Qiulin, ZHAO Chenlei, et al. Potentials and prospects of shale oil-gas resources in major basins of China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2033-2044.
- [27] 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 等. “连续型”油气藏及其在全球的重要性: 成藏、分布与评价[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 669-682.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, YUAN Xuanjun, et al. Global importance of “continuous” petroleum reservoirs: Accumulation, distribution and evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-682.
- [28] 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.
- [29] 胡素云, 朱如凯, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油效益勘探开发[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 737-748.
HU Suyun, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Profitable exploration and development of continental tight oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (4) : 737-748.
- [30] 杜金虎, 何海清, 杨涛, 等. 中国致密油勘探进展及面临的挑战[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(1): 1-9.
DU Jinhu, HE Haiqing, YANG Tao, et al. et al progress in China's tight oil exploration and challenges [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(1): 1-9.
- [31] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, BAI Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [32] 胡素云, 赵文智, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 819-828.
HU Suyun, ZHAO Wenzhi, HOU Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47 (4) : 819-828.
- [33] MOUNT J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments [J]. Geology, 1984, 12 (7) : 432-435.
- [34] TIRSGAARD H. Cyclic sedimentation of carbonate and siliciclastic deposits on a late Precambrian ramp; the Elisabeth Bjerg Formation (Eleonore Bay Supergroup), East Greenland [J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66(4): 699-712.
- [35] 胡涛, 姜福杰, 庞雄奇, 等. 页岩油微运移识别、评价及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(1): 114-126.
HU Tao, JIANG Fujie, PANG Xiongqi, et al. Identification and evaluation of shale oil micro-migration and its petroleum geological

- significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(1): 114-126.
- [36] 惠克来, 李克, 操应长, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长73亚段砂-泥协同成岩作用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(6): 1-11.
- XI Kelai, LI Ke, CAO Yingchang, et al. Synergistic diagenesis of sandstone and mudstone in Chang 73 sub-member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(6): 1-11.
- [37] 刘惠民, 李政, 包友书, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷高产页岩油井BYP5页岩地质特征[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1405-1417.
- LIU Huimin, LI Zheng, BAO Youshu, et al. Geology of shales in prolific shale-oil well BYP5 in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1405-1417.
- [38] 何文渊. 松辽盆地古龙凹陷页岩油储层中的纳孔纳缝及其原位成藏理论初探[J]. *地学前缘*, 2023, 30(1): 156-173.
- HE Wenyuan. Preliminary study on nanopores, nanofissures, and in situ accumulation of Gulong shale oil [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(1): 156-173.
- [39] 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 Chaoheng, HOU Xiulin, et al. Authigenic silica in continental lacustrine shale and its hydrocarbon significance [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(5): 896-907.
- [40] 付金华, 王龙, 陈修, 等. 鄂尔多斯盆地长7页岩油勘探开发新进展及前景展望[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(5): 1-14.
- FU Jinhua, WANG Long, CHEN Xiu, et al. Progress and prospects of shale oil exploration and development in the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(5): 1-14.
- [41] 唐勇, 何文军, 姜懿洋, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相页岩油气富集条件与勘探方向[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 125-143.
- TANG Yong, HE Wenjun, JIANG Yiyang, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Permian saline lacustrine shale oil and gas in Junggar Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 125-143.
- [42] 彭平安, 盛国英, 傅家谟, 等. 盐湖沉积环境未成熟油的成因与碳酸盐沉积阶段沉积的有机质有关[J]. *科学通报*, 2000, 45(增刊1): 2689-2694.
- PENG Ping'an, SHENG Guoying, FU Jiamo, et al. The genesis of immature oil in the sedimentary environment of salt lakes is related to the organic matter deposited during the carbonate sedimentary stage[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(S1): 2689-2694.
- [43] 张在龙, 劳永新, 王培建. 盐水对未熟生油岩中脂肪酸催化脱羧生烃的影响[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2000, 24(6): 57-59.
- ZHANG Zailong, LAO Yongxin, WANG Peijian. Effect of salty water and PH value on mineral catalyzed fatty acid decarboxylation in immature source rocks at simulated geology condition [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2000, 24(6): 57-59.
- [44] 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” for shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 1-13.
- [45] 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.
- 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.

(编辑 张玉银)