

陆相页岩油富集机理探讨

郭旭升^{1,2}, 马晓潇^{1,2}, 黎茂稳^{1,2}, 钱门辉^{1,2}, 胡宗全^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

摘要:通过对中国陆相湖盆富有机质页岩形成的构造和沉积环境分析,明确不同湖盆类型陆相优质烃源岩发育条件存在巨大差异性,淡水湖盆形成的泥页岩层系以长英质-黏土质页岩为主要岩相,松辽盆地上白垩统青一段和鄂尔多斯盆地三叠系长7段为典型代表;而咸水湖盆陆相页岩以富碳酸盐-蒸发岩类岩相为主,济阳坳陷古近系沙河街组是典型的实例。中国陆相页岩层系具有互层/夹层、混积页岩和黏土质页岩等3种主要岩相组合类型,它们控制了陆相富有机质泥页岩的源-储耦合特征、烃类差异演化和流体性质多样性。互层/夹层型页岩源-储分离、近源运移;混积页岩宏观上源-储一体,微观上源-储分离;黏土质页岩源-储一体,整体含油。多重证据揭示,无机孔是中-低成熟陆相页岩油最有利的储集空间类型,它们与多类型、多级次微裂缝耦合形成有效的孔缝网络系统,自封闭作用有利于页岩油气原位或近源保存。在典型盆地陆相页岩层系对比分析的基础上,提出良好的源-储耦合关系、适宜的热演化程度和自封闭性是陆相页岩油富集的主控因素,初步建立了中国陆相页岩油差异富集模式。断陷湖盆陆相页岩油勘探应重视缓坡带中-低成熟纹层状页岩和深洼区中-高成熟富黏土质页岩层系,而互层/夹层型和中-高成熟黏土质页岩是坳陷湖盆陆相页岩油突破的关键。

关键词:岩相组合类型;孔缝系统;源-储耦合;成烃差异演化;自封闭性;富集机理;陆相页岩油

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins

GUO Xusheng^{1,2}, MA Xiaoxiao^{1,2}, LI Maowen^{1,2}, QIAN Menhui^{1,2}, HU Zongquan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China,

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: By analyzing the tectonic and sedimentary environments for the formation of organic-rich shales in China's continental lacustrine basins, we identify significant differences in the development of high-quality continental source rocks across various types of lacustrine basins. For shale sequences deposited in fresh-water lacustrine basins, the main lithofacies are felsic and clayey shales, as observed from the 1st member of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation (K_2qn^1 section) in the Songliao Basin and the 7th member of the Triassic Yanchang Formation (T_3yc^7 section) in the Ordos Basin. For shale sequences developed in a saline lacustrine environment, however, carbonates and evaporites are dominant lithofacies, as represented by the Paleogene Shahejie Formation in the Jiyang Depression. There are three types of lithofacies assemblages for Chinese lacustrine shales, that is, the shale interbedded/intercalated with sand, mixed shale, and clayey shale. These lithofacies assemblages determine the hydrocarbon source-reservoir coupling characteristics, differential evolution of hydrocarbon generation, and property differences of in-situ fluids in the lacustrine organic-rich shales. The shale interbedded/intercalated with sand assemblage is characterized by source-reservoir separation and near-source migration. The mixed shale assemblage shows macroscopic integration and microscopic separation between source rock and reservoir. In contrast, the clayey shale acts as both the source and reservoir of in-situ generated hydrocarbons, featuring pervasive oil distribution. As revealed by evidence, inorganic pores provide the most favorable storage space for lacustrine shale oil in medium-low maturity, and form effective pore-fracture networks for hydrocarbon transport together with multi-type and multi-scale microfractures. Self-sealing capacity of shale is conducive to the in-situ or proximal preservation of shale oil and gas. Comparison of typical continental shale

收稿日期:2023-03-07;修回日期:2023-08-28。

第一作者简介:郭旭升(1965—),男,博士、教授级高级工程师、中国工程院院士,石油天然气地质和勘探。E-mail: guoxs_syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42090022)。

sequences in the Chinese sedimentary basins indicates that favorable source-reservoir coupling, suitable thermal maturity level, and self-sealing capacity of shale are the major controls for oil enrichment in lacustrine shale. This study also presents a preliminary model for differential enrichment of lacustrine shale oil in China. Therefore, the laminated shales in medium-low maturity in gentle slope zones and the clayey shale-rich strata in medium-high maturity in deep sags should be prioritized in lacustrine shale oil exploration in downfaulted lacustrine basins. Moreover, both the shale interbedded/intercalated with sand and the clayey shale in medium-high maturity are crucial to making breakthroughs in lacustrine shale oil exploration therein.

Key words: lithofacies assemblage type, pore-fracture network system, source-reservoir coupling, differential evolution of hydrocarbon generation, self-sealing, enrichment mechanism, lacustrine shale oil

引用格式: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. DOI: 10. 11743/ogg20230601.

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. DOI: 10. 11743/ogg20230601.

根据国内外权威机构预测,到2040年油气在全球一次能源中的占比仍将维持在50%以上^[1]。随着地质认识进步和技术水平的提高,油气勘探开发对象经历了构造、地层和岩性圈闭向致密油气、页岩油气的转变。页岩油气储层源-储一体、各向异性显著、岩性致密,油气以游离、与干酪根互溶或吸附等方式赋存于基质孔隙、微裂缝及非烃源岩薄夹层中,往往需要压裂改造才能实现规模经济开采^[2]。本文所述“页岩油”是指富有机质泥页岩层系内的石油聚集,而不是纯页岩中的石油。美国能源信息署(EIA, 2022)^[3]数据显示,全球页岩油气可采资源量与常规油气待发现规模基本相当。以美国为代表的页岩革命,实现了油气勘探目标从圈闭到大面积连续性区带和“甜点”的认识转变,长水平井分段压裂推动了商业生产,井工厂生产模式大幅度降低了勘探开发成本,技术持续迭代提高了勘探开发效率。页岩油气突破使美国在2017年和2020年分别实现了天然气和原油由进口国向净出口国的转变,改变了世界能源的格局。

中国页岩油气资源丰富。通过持续探索与攻关,中国页岩气勘探率先在南海相页岩层系取得突破,发现了涪陵页岩大气田。页岩油勘探目前在6个盆地、多个洼陷和层系获得重大战略突破^[4–15]。先后启动了新疆吉木萨尔、大庆古龙和胜利济阳3个国家级页岩油产能示范区建设。尽管2022年中国 331.5×10^4 t的页岩油产量中可能包括了部分致密油,但陆相页岩油在保障中国原油稳产在 2×10^8 t年产量的作用是毋庸置疑的。与海相页岩比较,中国陆相富有机质页岩层系矿物组成、平面连续性和热演化程度变化大,非均质性强,给页岩油气资源评价、储层表征和“甜点”优选带来一系列的挑战性,陆相页岩油富集理论体系尚未形成。基于不同盆地中页岩层系基本特征的差异性,人们对于能否建立统一的陆相页岩油富集模式,也还没有形成共识。因此,

需要加强海、陆相页岩层系之间以及不同类型陆相页岩层系之间的对比研究,明确不同构造沉降和古气候变化条件制约下的陆相湖盆沉积环境-生物协同演化机制、优质烃源岩发育模式、成岩成储成烃动态演化和页岩油富集机理,为页岩油“甜点”优选和适应性工程工艺技术研发奠定基础。本文通过对中国陆相湖盆富有机质页岩形成环境、岩相组合类型和有利储集空间的对比分析,探讨陆相页岩油富集机理与成因模式。

1 不同湖盆类型富有机质页岩发育条件的差异性

稳定宽缓的构造背景、大面积分布的优质烃源岩和致密顶底板、高峰生油期、合适的源-储耦合配置和裂缝发育程度,对北美海相页岩油规模富集至关重要^[2, 16–19]。由于陆相盆地沉积范围小、时空变化大,湖盆充填更易受物源、气候和水动力条件等控制,湖相页岩层系的沉积非均质性更强^[20–22]。陆相湖泊沉积体系通常形成于拗陷湖盆、裂陷湖盆、走滑湖盆和前陆湖盆。取决于盆地性质和发育的阶段,盆地规模、断裂发育和沉积非均质性变化很大。

中国陆相沉积盆地从晚古生代开始有所发育,主要发育期是中生代—新生代。纵向上,多旋回叠置、残留叠置与单旋回盆地演化发展呈现出显著的差异性。平面上,具有拉张走滑、裂陷、克拉通、陆内凹陷和前陆等多种类型,并且呈现出东西、南北的差异性^[23]。因此,不同盆地陆相页岩油分布面积和主力层系显示出巨大的差异性^[24]。

陆相富有机质泥页岩主要发育在半深湖-深湖相区^[7, 10, 25](图1),具有合适的生物产率、氧化-还原环境和陆源输入等要素组合^[26]。大型陆相拗陷盆地一般

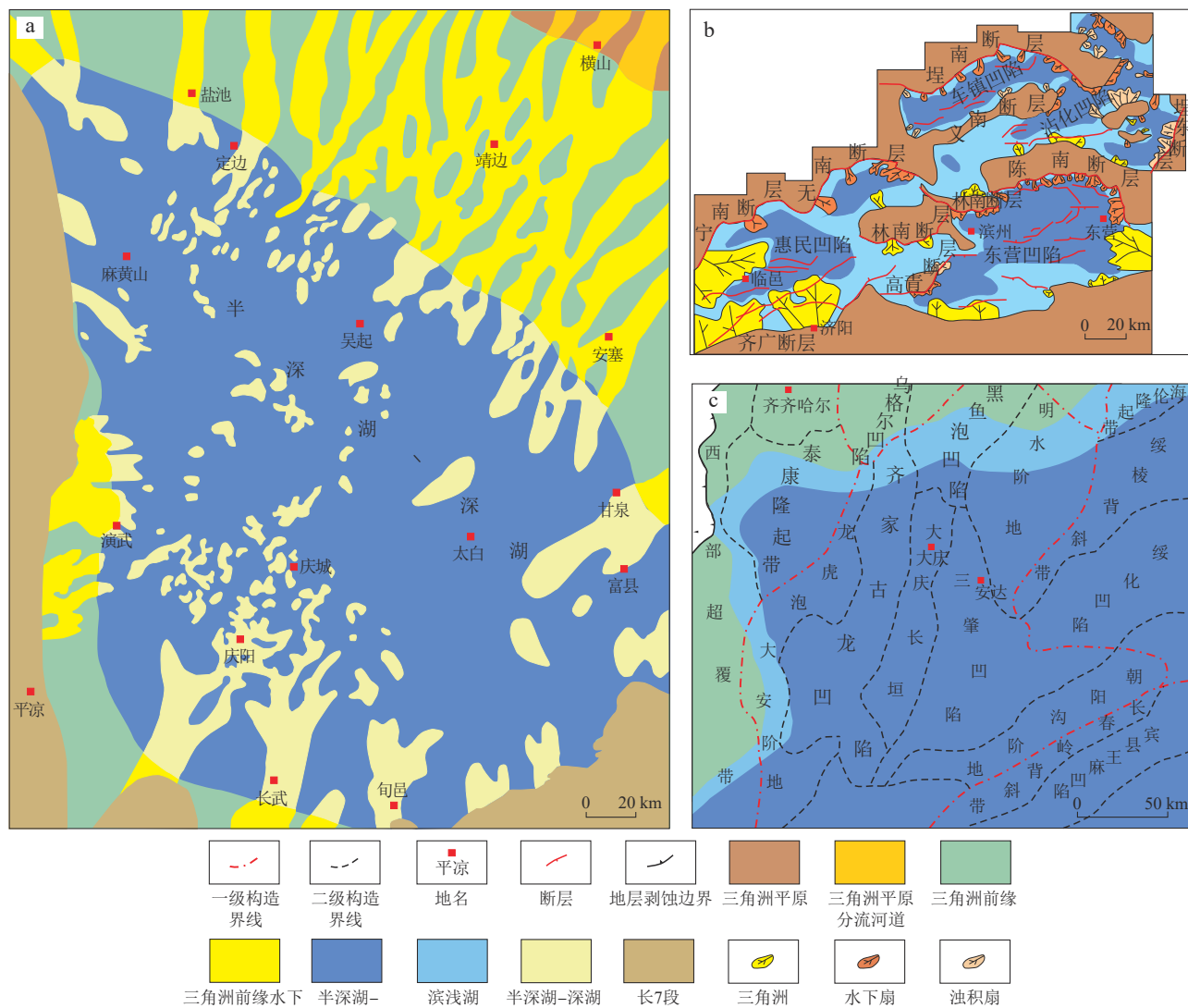


图1 3个代表盆地主要泥页岩层系沉积相分布(根据文献[7,10,25]修编)

Fig. 1 Maps showing the sedimentary facies distribution of primary argillaceous shale strata in the three typical Chinese basins selected (modified after references [7, 10, 25])

a. 鄂尔多斯盆地长7³亚段;b. 济阳坳陷沙三下亚段;c. 松辽盆地青一段

都发育面积较大的半深湖沉积,包括浪基面以下形成的灰色和暗色块状泥岩或水平层理页岩,以及具有波状层理和断续波状层理的薄层泥质粉砂岩及粉砂质泥岩。断陷盆地深湖沉积较为发育,以暗色泥岩为主。深湖沉积体系受沉积物源和地质事件的影响,通常还会见到近岸水下扇、滑塌浊积扇、重力流水道和湖相风暴流沉积等^[23]。

以鄂尔多斯盆地和松辽盆地为典型代表的陆相坳陷湖盆,主要发育淡水沉积体系。在晚三叠世延长组7段(长7段)沉积期鄂尔多斯盆地处于最大湖泛期,半深湖-深湖区面积达 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,发育了一套以富含有机质黑色页岩和暗色泥岩为主的烃源岩^[27-30]。黑色页岩在湖中厚度为10~35 m,平均为20 m,总有机碳含

量(*TOC*)在6.0%~16.0%,平均为13.8%。暗色泥岩厚度多为10~50 m,平均为25 m,*TOC*为2.0%~6.0%,平均为3.8%^[31]。青山口组和嫩江组半深湖-深湖相厚层状暗色泥页岩是松辽盆地坳陷层系的主力烃源岩。青山口组沉积期古气候温暖潮湿,发育大型富营养淡水湖泊,深部热流体活跃,有利于沉积有机质富集,*TOC*普遍大于2.0%^[10]。

准噶尔盆地二叠系和中国东部古近系发育不同构造演化背景下的咸化湖泊沉积体系。例如准噶尔盆地西北部玛湖凹陷在早二叠世风城组沉积期,季节性的潮湿环境与干旱环境交替出现,湖水的咸化程度较高,形成了一套厚达500~1580 m的扇三角洲-浅水湖泊沉积体系,为源-储一体的碱湖相页岩油气成藏体系奠定

了基础^[32-33]。吉木萨尔凹陷为一个中二叠世的前陆型箕状凹陷,在陆内裂谷背景下形成了芦苇沟组半深湖-深湖相咸化湖盆细粒混合沉积,TOC平均为4.6%^[34],并且受到了火山喷发作用及热液活动的影响^[35-36]。

渤海湾盆地古近纪孔店组沉积期在沧东、晋县等断陷湖盆发育了以孔店组二段(孔二段)为代表的半深水-深水咸化湖盆富有机质纹层状细粒沉积体系,纵向厚度可达400 m。古近纪沙河街组沉积期为济阳坳陷的主要断陷期,泥页岩沉积厚度较大,一般为300~1 500 m,而且分布范围广,厚度大于50 m的面积超过7 300 km²。其中,沙河街组四段(沙四)上亚段-沙河街组三段下亚段为半深湖-深湖相沉积,沉积水体环境由下至上逐渐淡化,细粒沉积中碳酸盐矿物含量高(平均为48.6%)^[5,37-38]。受断裂活动的影响,断陷期泥页岩地层厚度和矿物组成空间非均质性强。

因此,尽管陆相富有机质泥页岩多发育在半深湖-深湖相区,但不同盆地陆相页岩发育的地质条件和主控因素存在显著的差异性,进而导致陆相页岩层系在平面和纵向上的强非均质性。

2 岩相组合类型对富有机质页岩源-储耦合关系的控制

岩相和岩相组合是油气系统中源-储耦合关系研究的基础^[39-45]。北美海相页岩油储层多为碳酸盐岩纹层^[46]或夹层^[47-48],而规模页岩气产层主要为长英质-

黏土质页岩岩相组合^[49-50]。中国陆相页岩层系详细的全岩矿物分析结果显示,大型淡水湖盆形成的细粒岩相组合以长英质-黏土质页岩(或粉-细砂岩)为主,而陆相咸化湖盆往往有利于富碳酸盐质页岩岩相组合发育(图2)^[24]。因此,鄂尔多斯盆地延长组和松辽盆地古龙凹陷青山口组半深湖-深湖相以砂泥岩体系为主,而准噶尔盆地芦苇沟组和渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组富有机质细粒沉积往往富含碳酸盐岩矿物。

受物源和古地貌控制,陆相湖盆深湖-半深湖沉积岩相组合平面上通常呈环带状分布。在松辽盆地和鄂尔多斯盆地,富有机质页岩层系岩相的平面分布明显受到沉积物源的影响,青山口组不同亚段陆源碎屑主要来自盆地北部,而延长组则具有多个物源方向。如图3所示,东营凹陷碳酸盐纹层状岩相分布在洼陷中心和缓坡带,长英质岩相分布在靠近物源的盆缘部位,湖侵期长英质页岩分布范围较广;在缓坡带,从盆缘向盆内依次发育外源沉积为主的含有机质灰质泥岩相、混源沉积的富有机质纹层灰质泥岩相,以及内源沉积为主的富机质纹层/层状灰质泥岩相和混源富机质纹层/层状灰质泥岩相;而靠近陡坡带,外源浊积砂发育,向内发育含有机质块状灰质泥岩相。因此,富有机质页岩岩相组合类型决定了陆相页岩层系的源-储耦合方式和油气分布特征,进而影响页岩油的开发方式和工程技术(表1)。

2.1 互层/夹层型陆相页岩层系

互层/夹层型页岩层系以鄂尔多斯中三叠统延长

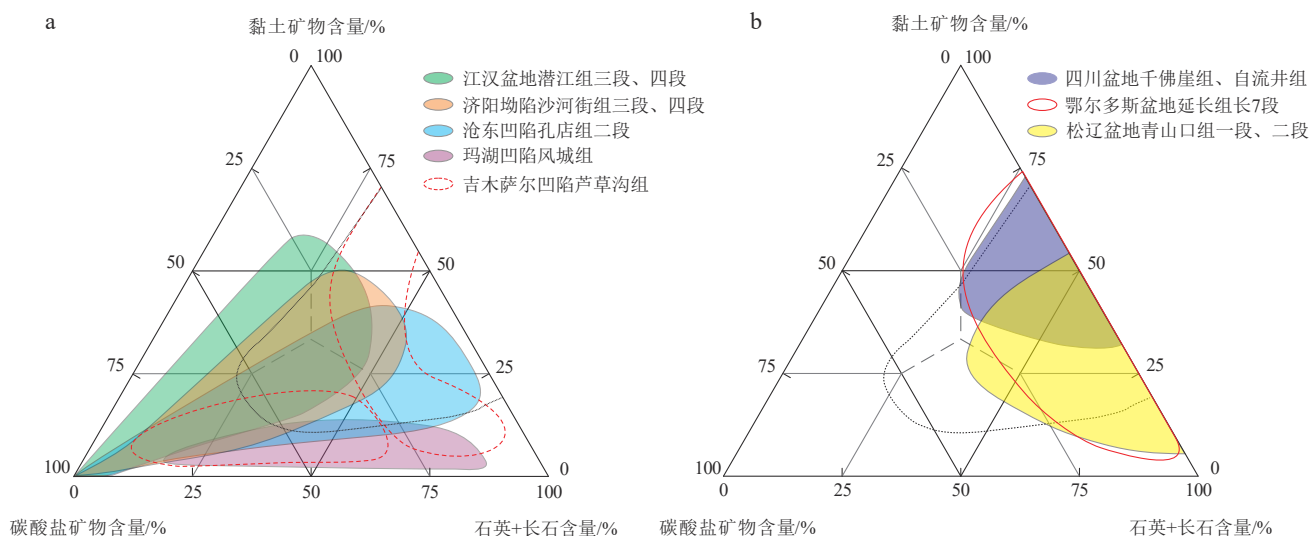


图2 中国主要陆相烃源岩层系全岩矿物组成包络线^[24]

Fig. 2 Envelopes outlining the whole-rock mineral compositions of the representative lacustrine source rock sequences in Chinese sedimentary basins^[24]

a. 咸化湖盆; b. 淡水湖盆

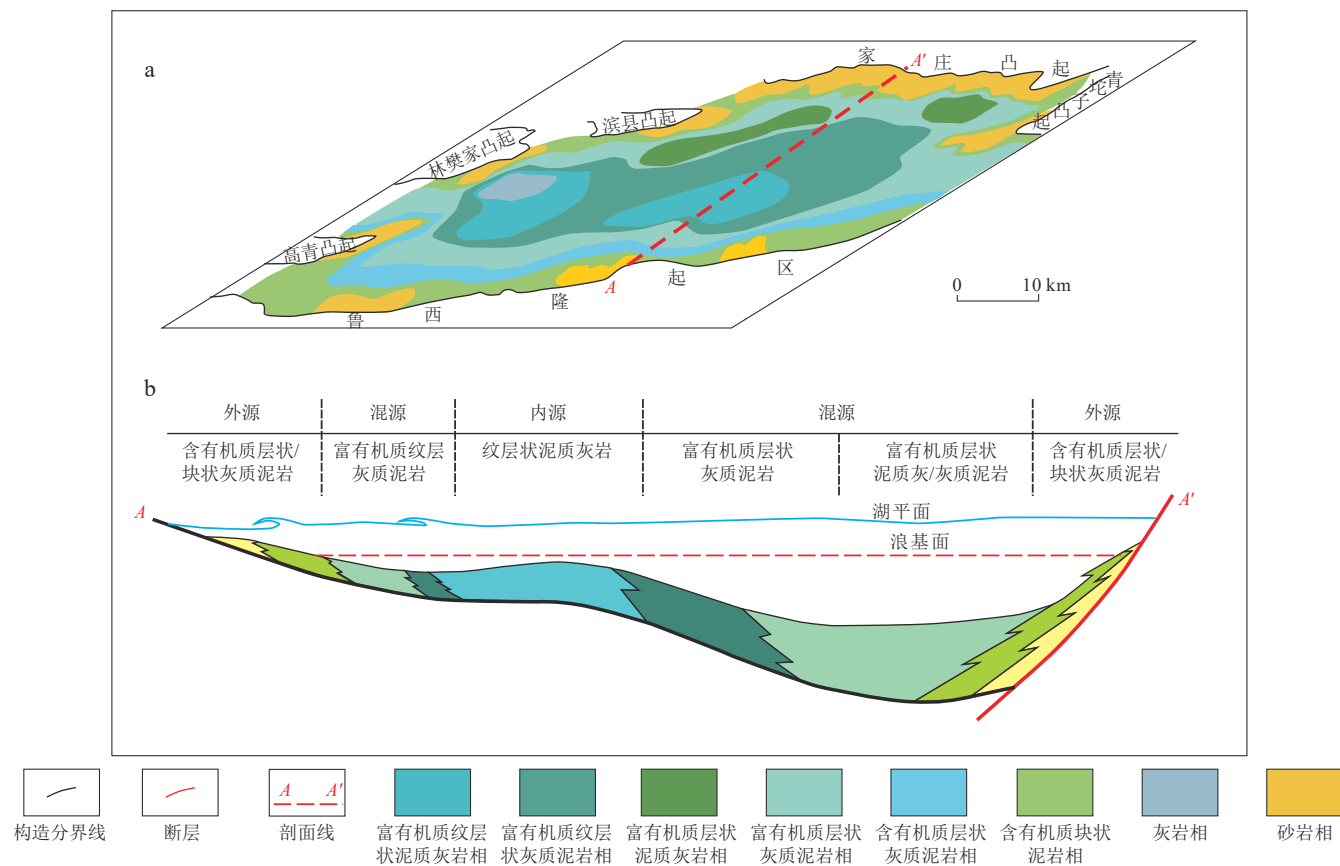


图3 济阳坳陷东营凹陷沙三下亚段富有机质页岩沉积岩相空间分布模式(引自文献[5])

Fig. 3 Lithofacies variation of the organic-rich shales in the lower submember of the 3rd member of the Shahejie Formation (Es^{3l} section), Dongying Sag, Jiyang Depression (cited from reference [5])
a. 沉积相平面展布; b. 沉积相纵向剖面

表1 中国陆相富有机质页岩岩相组合类型及源-储耦合特征

Table 1 Lithofacies assemblage types and source-reservoir coupling characteristics of the organic-rich shales in the Chinese lacustrine basins

岩相组合类型	典型实例	源-储耦合特征	盆地分布
互层/夹层型	鄂尔多斯长7 ¹⁻² 亚段	源-储分离、近源运移,薄层砂岩或灰岩有利于储集层近源捕获石油形成甜点	淡水湖盆:鄂尔多斯、松辽、四川
混积页岩纹层型	渤海湾东营-沾化凹陷沙四段-沙三段,苏北阜二段,沧东孔二段	源-储共存或一体,页岩层系整体含油,多源供烃,混积岩自身与相邻页岩向混积岩储集甜点供油	咸化湖盆:江汉、渤海湾、准噶尔、三塘湖、柴达木
长英质-黏土质页岩型	松辽湖盆中部青一段、四川侏罗系、鄂尔多斯长7 ³ 亚段	源-储一体,长英质-黏土质黑色页岩整体含油,富有机质纹层和砂质、钙质纹层均可原地滞留石油形成“甜点”,高TOC、高演化、地层超压、物性甜点控制富集	淡水湖盆:松辽、四川

组7段(长7段)为代表,具有源-储分离、近源运移的特点,薄层砂岩或灰岩有利储集层近源捕获石油形成甜点。在油气地质评价中,人们一般用 TOC 高低确定烃源岩品质,用热解 S_1 含量表征地层的含油气性,用 S_1/TOC 比值表征地层中烃类的可动性。因此,通过 TOC , S_1 和 S_1/TOC 参数的纵向叠置关系,可以大致确定

富有机质页岩层系的源-储耦合关系。如图4a所示,长7段细粒沉积矿物组成以长英质-黏土质为主,盆地中心部位富有机质页岩层系目前处于大量生油阶段。如图4b所示,长7¹和长7²亚段主要发育与粉-细砂岩呈夹层或者互层、 TOC 相对较低的暗色泥岩,纵向上高热解 S_1 和 S_1/TOC 比值层段与 TOC 相对高值段存在错

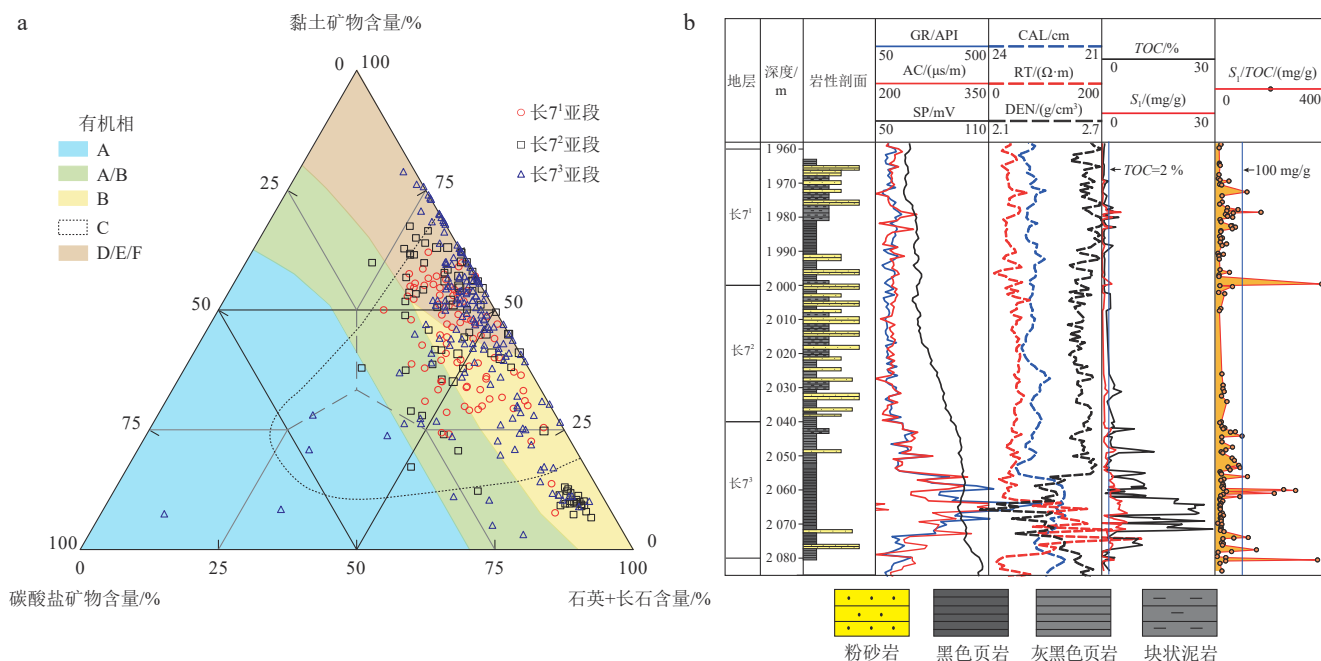


图4 鄂尔多斯盆地长7段:基于矿物组成的泥页岩岩相/有机相分类(a)和典型井地层综合柱状图(b)

Fig. 4 Data of the 7th member of the Yanchang Formation (T_{3yc}^7 section) in the Ordos Basin: lithofacies/organofacies classification for shales in terms of mineral composition (a) and composite stratigraphic column of a typical borehole (b)

(有机相类型:A为Ⅱ-S型;B为Ⅱ型;C为Ⅰ型;D/E为Ⅲ型;F为Ⅲ/Ⅳ型。)[24]

位,指示近源油气运移。庆城油田的主力产层为长7¹和长7²亚段的半深湖-深湖泥页岩夹薄层砂岩重力流沉积,为近源油气富集。在志靖-安塞地区新安边油田,主力产层为三角洲前缘泥岩夹厚层砂岩沉积,油气既可以来源于邻层中成熟烃源岩,也可来源于一定距离的侧向运移^[51]。

2.2 长英质-黏土质型陆相页岩层系

鄂尔多斯盆地长7³亚段的长英质-黏土质黑色页岩TOC可以达到20%以上,热解 S_1 普遍较高,但 S_1 和TOC在纵向上有一定程度的错位关系(图4b),指示黑色页岩中生成的烃类发生了初次运移,在粉砂岩地层中富集成藏,而页岩滞留烃主要赋存于较为致密的纳米-微米级孔隙中。迄今为止,长7³黑色页岩段只在部分薄层粉-细砂岩段获得了工业油流,但在处于主要生油窗内的长英质-黏土质黑色页岩层段的页岩油勘探尚未取得规模突破。

与此不同,古龙凹陷青山口组一段(青一段)和四川盆地中-下侏罗统在高-过成熟长英质-黏土质页岩层系取得了页岩油气勘探突破。这些页岩整体含油、源-储一体,高TOC、高演化、地层超压、发育层理缝等特征控制了油气原位富集。如图5a所示,青一段黑色页岩中黏土矿物含量高达35%~45%,其中伊利石占

黏土矿物含量的50%~75%,有机黏土凝聚体为有机质保存奠定了物质基础^[52]。如图5b所示,青一段镜质体反射率(R_o)分布范围在0.75%~1.70%^[53]。生油高峰阶段部分烃类在有机质收缩孔和黏土矿物中富集,并在高-过成熟阶段,由于热裂解转化为轻质油-凝析油气,同时形成大量纳米孔隙,孔径为10~50 nm^[54]。因此,青一段页岩中游离烃/滞留烃比例和地层压力系数在高-过成熟阶段显著增加,展示出典型的长英-黏土质型页岩油储层特征。

2.3 混积型页岩层系

济阳坳陷沙四上亚段-沙三下亚段形成于陆相断陷湖盆咸水-半咸水环境,以混积页岩为主,碳酸盐矿物发育(图6a)。主要岩相类型包括富有机质纹层状泥晶泥质灰岩相、富有机质纹层状微晶泥质灰岩相、富有机质纹层状粗晶泥质灰岩相、富有机质纹层状灰质泥岩相、富有机质层状泥质灰岩相、富有机质层状灰质泥岩相、含有机质层状含泥质白云岩、含有机质块状灰质泥岩相等^[5]。如图6b中FY1井热解分析结果所示,济阳坳陷沙四上亚段-沙三下亚段页岩层系的含油性与有机质丰度匹配良好,TOC多数在2%以上,主力产层为纹层状富碳酸盐页岩,富有机质纹层与富碳酸盐纹层形成微观源-储组合,宏观表现为自生自储。

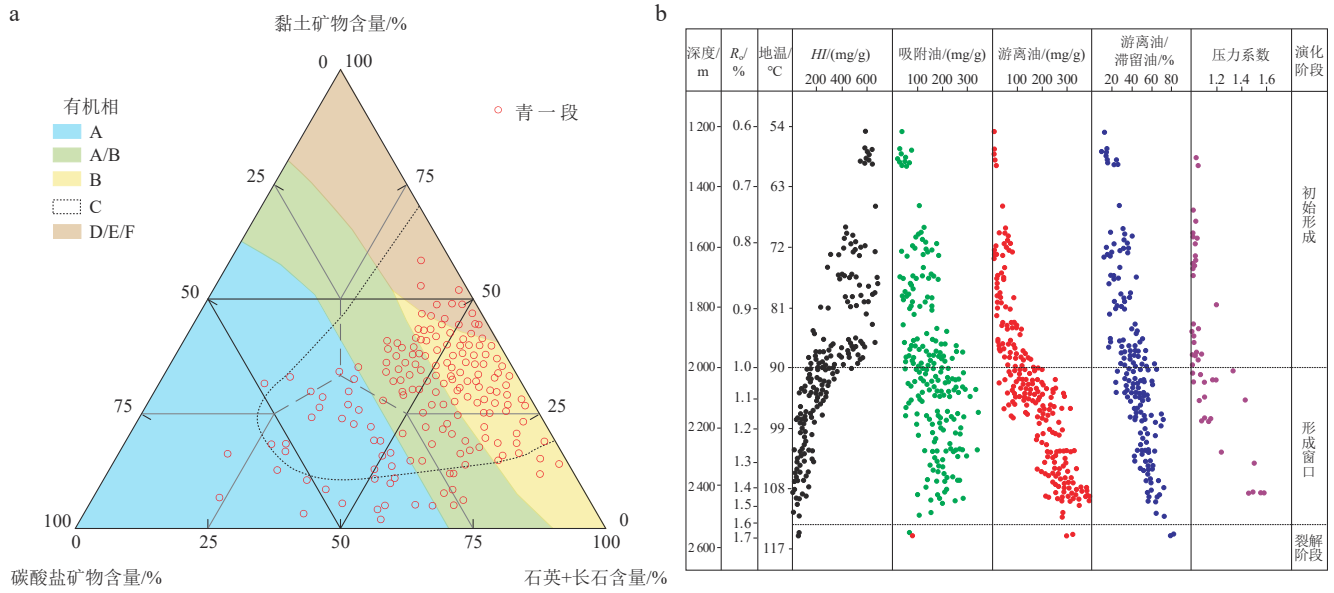


图5 松辽盆地古龙凹陷青一段泥页岩岩相/有机相分类(a)和典型井岩石热解参数(b)^[52]

Fig. 5 Data of the 1st member of the Qingshankou Formation (K_2qn^1 section) in the Gulong Sag, Songliao Basin: lithofacies/organofacies classification of the shale (a) and Rock-Eval pyrolysis parameters of a typical borehole (b)^[52]
(有机相类型:A为Ⅱ-S型;B为Ⅱ型;C为Ⅰ型;D/E为Ⅲ型;F为Ⅲ/Ⅳ型。)^[24]

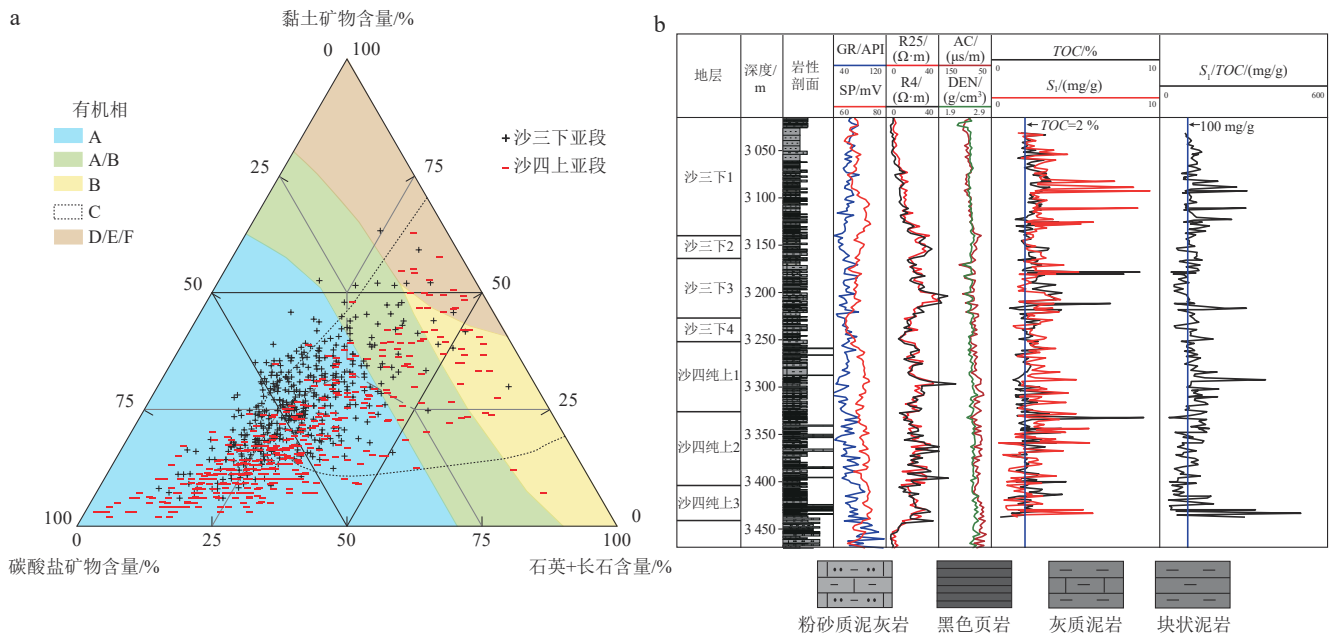


图6 济阳凹陷东营凹陷沙三段和沙四段泥页岩岩相/有机相分类(a)及典型井地层综合柱状图(b)

Fig. 6 Data of the 3rd and 4th members of the Shahejie Formation (Es^3 - Es^4 sections), Dongying Sag, Jiyang Depression: lithofacies/organofacies classification of the argillaceous shale (a) and composite stratigraphic column of a typical borehole (b)
(有机相类型:A为Ⅱ-S型;B为Ⅱ型;C为Ⅰ型;D/E为Ⅲ型;F为Ⅲ/Ⅳ型。)^[24]

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩层系以混积页岩为主,储层矿物成分多样,岩性多为过渡性岩类,纵向上岩层厚度薄、变化快^[8]。如图7a所示,芦草沟组页岩层系主要由长英质-黏土质和碳酸盐-长英质等两类岩相组合构成,在岩石薄片上分别对应于黑-白相间的条带/纹层,黑色纹层生烃,而白色纹层为储集

层。芦草沟组页岩生烃潜量(S_1+S_2)多大于6 mg/g。如图7b所示,J10025井不同层段芦草沟组页岩的全岩热解 S_1 与TOC在纵向上匹配关系存在错位,指示暗色泥页岩生成的烃类经历了不同程度的近源运移,在粉砂岩和沉凝灰岩夹层中富集。准噶尔盆地前期页岩油勘探在芦草沟组识别出上、下两个页岩油“甜点”,并且获

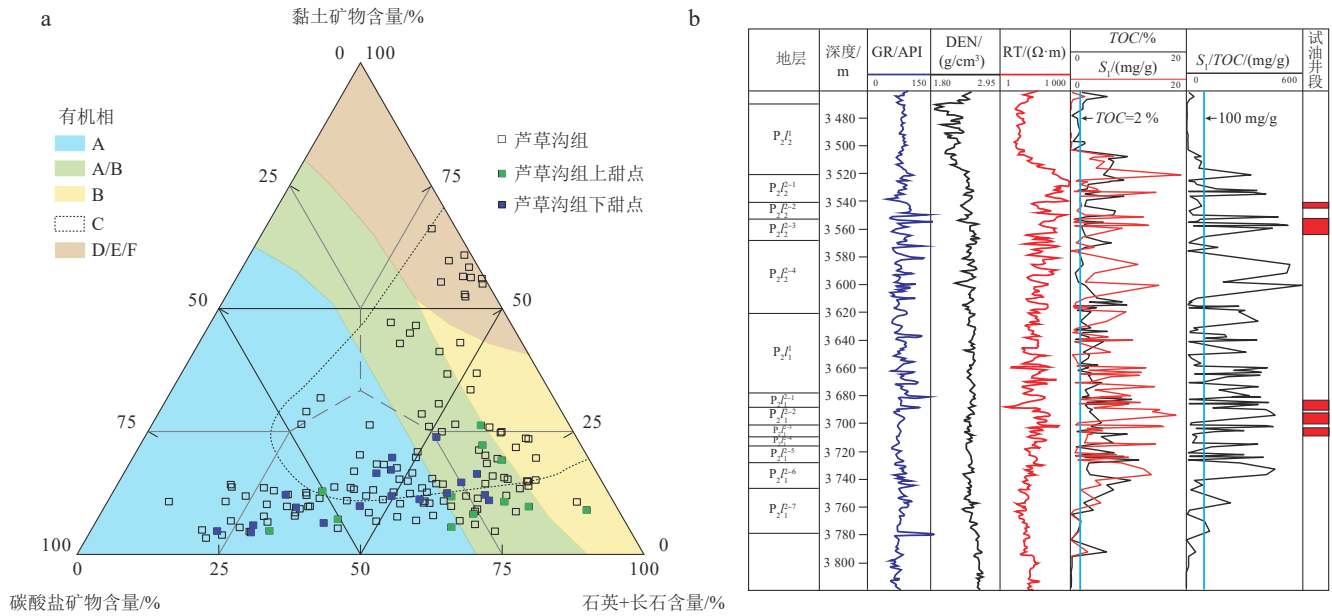


图7 吉木萨尔凹陷芦草沟组泥页岩岩相/有机相分类(a)和典型井地层综合柱状图(b)

Fig. 7 Data of the Lucaogou Formation (P_2f) in the Jimusaer Sag, Junggar Basin: lithofacies/organofacies classification of the argillaceous shale (a) and composite stratigraphic column of a typical borehole (b)

(有机相类型:A为Ⅱ-S型;B为Ⅱ型;C为Ⅰ型;D/E为Ⅲ型;F为Ⅲ/Ⅳ型。)^[24]

得工业油流^[55]。近期研究表明,两个“甜点”体之间可能存在多个尚未证实的有利层段。

3 陆相页岩油富集机理与地质模式

3.1 无机孔是中-低成熟页岩油最有利储集空间类型

岩相和成岩-热演化阶段决定陆相页岩油最有利储集空间类型。在形成于广覆式大型坳陷湖盆的鄂尔多斯盆地长7段中,砂岩与泥页岩大面积直接接触,形成多种类型源-储共生的页岩油体系。砂岩储层的主要储集空间由粒间孔、长石溶蚀孔、黏土矿物晶间孔和微裂缝构成,孔喉为纳米-微米级,并且与层间缝网形成孔喉-缝网耦合系统,有利于夹层型页岩油富集^[31](图8a)。泥页岩中纳米-微米级黏土矿物晶间孔和刚性矿物支撑的粒间孔较为发育,局部可形成有效储集空间,其中黏土矿物晶间孔是束缚烃的主要赋存空间,而刚性矿物粒间孔有利于游离油赋存。在深湖-半湖相黑色页岩中,富有机质黏土质纹层和富长英质纹层通常形成黑-白相间的二元结构^[31],并发育黄铁矿晶间微孔(孔径<200 nm)^[56]。在三角洲前缘相和沼泽相发育区,暗色泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩伴生,储集空间类型既有石英和长石矿物的晶间孔,又有黏土矿物片间孔发育。在沼泽相泥岩中还可以见到有机质团

块、周缘伴随的收缩缝及有机孔。在长7段泥页岩中,黏土微孔及有机孔孔径一般小于50 nm,而粒间孔和层间缝孔径一般在500 nm以上^[56]。

吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油储层中孔缝发育,既包括构造缝、成岩缝、层理缝和缝合线,又包括溶蚀孔、粒间孔、晶间孔和有机质孔(图8b)。在不同类型的岩相中,裂缝-孔隙体系发育程度存在差异。在碳酸盐岩、泥岩和粉砂岩中均发育不规则构造裂缝;被有机质充填的层理缝主要发育在纹层状含粉砂泥页岩中;泥晶白云岩和白云质泥岩中压溶作用往往形成缝合线,而且易被有机质充填。在碳酸盐岩和粉砂岩的基质中广泛发育晶间孔、溶蚀孔和粒间孔,孔径为几微米至几十微米。其中,原生孔隙以石英晶间孔和白云石晶间孔为主,孔径多在几十至几百纳米。伊/蒙混层的黏土矿物晶间孔普遍发育,多呈片状,孔径在几十纳米至几百纳米。在部分处于生油高峰期的页岩基质中也见到了有机孔^[57]。

古龙凹陷青一段页岩中黏土矿物含量较高(一般在25%~40%),以伊利石为主,发育层状和纹层状页岩两种主要页岩岩相,页理缝的发育有效改善了页岩储集能力。古龙凹陷青一段页岩油的储集空间主要由基质孔隙-页理缝构成,页岩总孔隙度与石英和黏土矿物含量呈正比,而与碳酸盐矿物和长石含量呈反比。页岩孔隙类型包括黏土矿物晶间孔、有机质孔缝和少

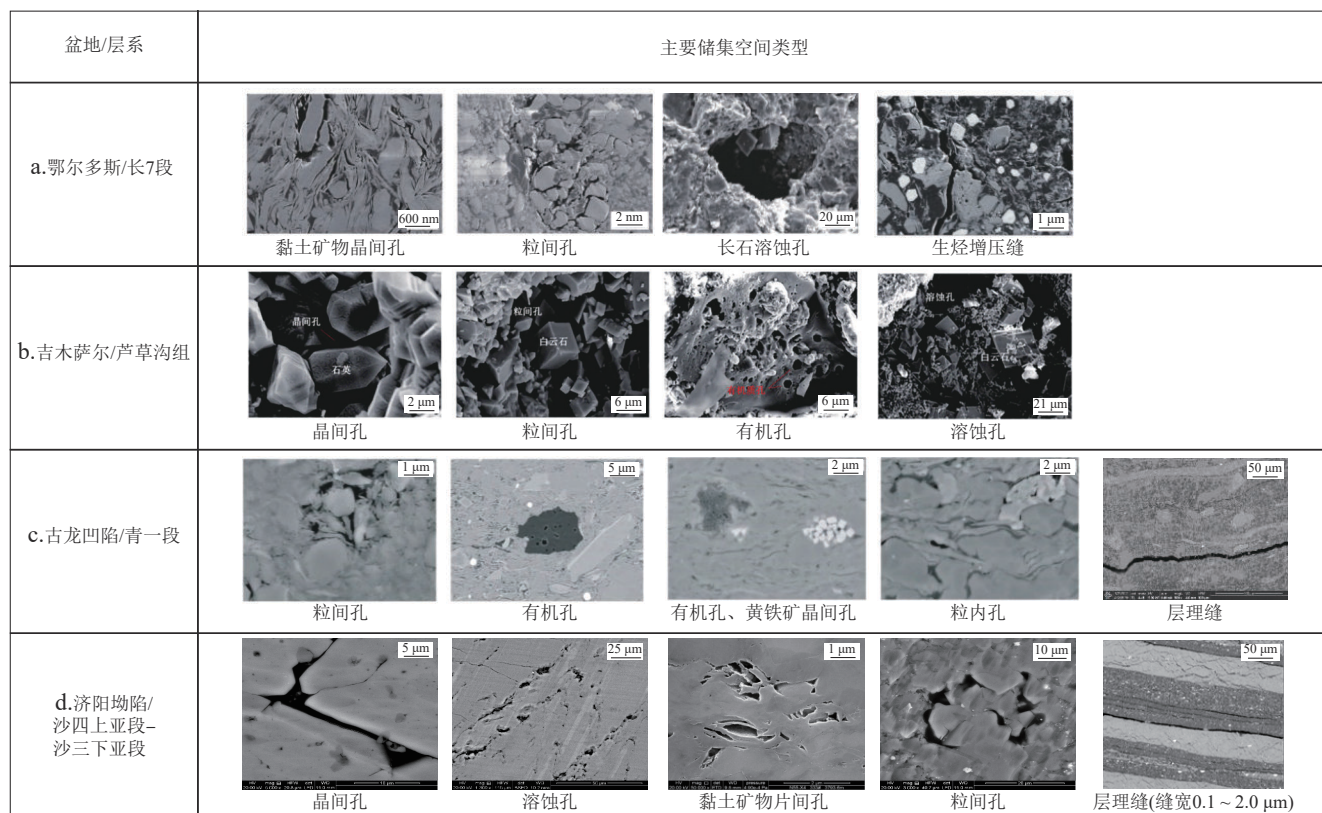


图8 代表性陆相页岩层系的主要储集空间类型(部分资料来源于文献[31,57-58])

Fig. 8 Major types of hydrocarbon storage spaces for the typical lacustrine shale reservoirs in China
(some data from references [31, 57-58])

量分布极不均一的长石和碳酸盐岩粒内溶蚀孔(图8c)。页岩中碳酸盐矿物多为充填原生孔隙的次生胶结物。根据薄片分析、电子显微镜观察及三维CT研究,发现古龙凹陷青山口组页岩油的储集空间具有多样性和多尺度性,从宽10~50 nm的纳米缝到宽数百微米的页理缝,但储层孔径以10~50 nm为主,喉道直径4~7 nm^[59]。

济阳坳陷古近系沙四上亚段-沙三下亚段泥页岩储集空间也具有孔、缝并存的特点,但以无机孔缝为主(占比>95%),有机质孔隙相对不发育(图8d)。这些页岩中碳酸盐矿物和粉砂粒级的长英质矿物共同构成泥页岩的格架支撑,而黏土矿物多作为填隙物或者富有机质纹层形式产出。前期研究表明,济阳坳陷页岩油主要储集空间包括2种主要类型:①碳酸盐纹层中由重结晶作用和溶蚀作用形成的纳米、微米级方解石晶间孔(孔径一般为5~200 nm)、晶间溶孔(孔径一般为200~400 nm);②富陆源碎屑黏土纹层中的不规则纳米级粒间孔(孔径一般为2~100 nm)和黏土矿物片间孔(孔径一般为3~100 nm)。在部分热成熟较高和在陆源碎屑输入较多的地区,也可以分别见到有机质收缩缝和有机质结构孔(孔径一般为1~100 nm)^[5]。

因此,无机孔是中-低成熟页岩油最有利储集空间类型。在以长英质-黏土质岩相组合为主的大型淡水湖盆中,页岩油储层空间在主生油窗以石英粒间孔和长石溶蚀孔等无机矿物基质孔为主,在高-过成熟阶段以富有机质黏土矿物形成的纳米级晶间孔和有机孔为主;与此不同,在陆相断陷半咸水-咸水湖盆中,页岩油储集空间多以碳酸盐矿物晶间孔和溶蚀孔为主。此外,由于受构造活动、生烃增压、成岩和盆地回返作用等影响,陆相页岩层系中微裂缝广泛发育,多级次微裂缝体系既可以形成游离油的储集空间,又可以与无机孔隙构成有效的孔-缝网络系统,进而制约页岩油气的赋存和流动。

3.2 岩相-有机相组合类型影响烃类演化差异性和流体性质

湖泊环境水文地质和水化学性质的变化,形成多种湖相烃源岩沉积样式^[25],而且对沉积有机质组合(即有机相)具有重要影响^[60-61]。前期研究发现,内源沉积的细粒沉积岩相与有机相之间存在着较好的相关性,即富碳酸盐-蒸发盐细粒岩相往往发育富硫有机相,对应于I-S和II-S型干酪根;而富长英质-黏土质

细粒岩相中黏土矿物的存在有利于贫硫干酪根和自生黄铁矿的形成^[24,49]。

如图9所示,在中西部含油气盆地,从玛湖凹陷风城组、吉木萨尔凹陷芦草沟组到鄂尔多斯盆地长7段,富有机质页岩层系形成的水体环境由咸化向淡化环境变化。与此对应,这些页岩有机抽提物中的甾烷和萜烷分布从咸化环境的甾烷优势转变为淡化水体的萜烷优势;咸化环境抽提物中可以见到明显的高伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值,显示出水体分层、主要成烃生物类型以及保存的地球化学环境差异性。岩石薄片分析在风城组页岩中可以见到层状藻质体分布,而长7³亚段页岩中成烃有机质多数以无定形体形式存在,仅能见到结构稳定的紧密堆积的金藻休眠孢囊^[62]。因此,咸化湖盆沉积有机质以选择性保存为主,往往有利于早期微生物硫酸盐还原作用形成富硫干酪根;淡化环境以高生产率为主,富有机质页岩通常以贫硫干酪根和自生黄铁矿富集为特征。

咸化和淡化湖盆成烃有机质含硫量的差异性对有机质大量生烃的窗口具有重要影响。Baskin和Peters(1992)^[63]通过对美国、以色列、苏丹等国家不同地区的烃源岩岩石热解与含硫量之间关系的研究,发现干酪根含硫量直接影响其热演化性能,即富硫干酪根在较低的热成熟度开始生烃^[64-65]。张林晔等(2005)^[66]采用氯仿-甲醇-丙酮-氯仿三元试剂和CS₂/NMP超强混合溶剂开展研究,注意到沙河街组不同层段成烃演化的差异性。通过典型样品全岩热解分析结果的物质平衡计算,发现岩相-有机相组合类型控制陆相富有机质页岩热演化生烃差异性,可以用沙四段含硫干酪根成烃活化能相对较低、在较低的热演化阶段已经转化成烃来解释^[67]。

如图10所示,济阳拗陷富碳酸盐页岩的生烃活化能低于鄂尔多斯盆地长7段黑色页岩和吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩,大量生烃和页岩油富集门限约为 $R_o=0.7\%$,明显早于长英质-黏土质页岩。实际上,在济阳拗陷沙四上

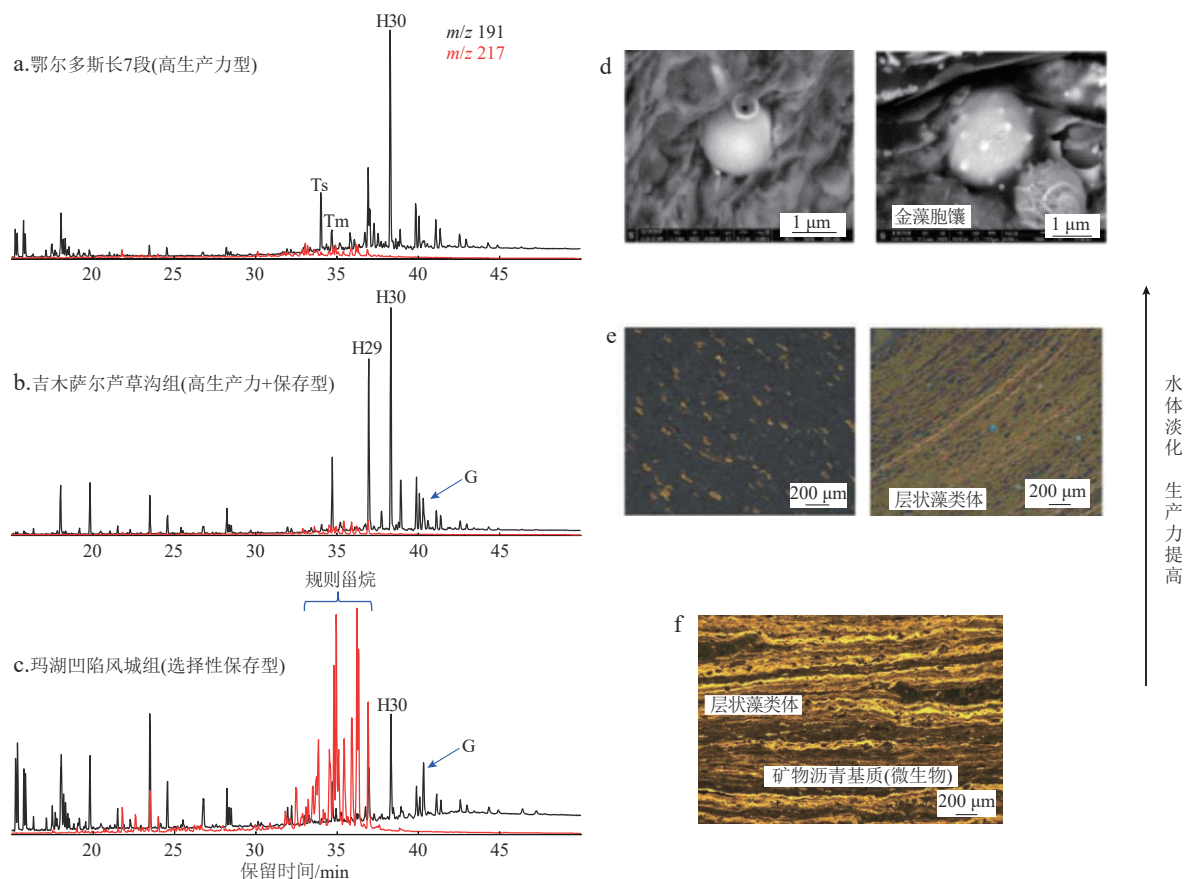


图9 中西部盆地主要富有机质页岩层系沉积水体环境和成烃生物特征差异性的生物标志化合物和有机岩石学证据

Fig. 9 Evidence of biosignatures and organic petrology for the differences in depositional water-body environments and dominant biota in the organic rich shales within basins in central and western China

a—c. 分别为鄂尔多斯长7段、吉木萨尔芦草沟组和玛湖凹陷风城组的 m/z 191和 m/z 217色谱图;d. 鄂尔多斯长7段典型页岩扫描电镜照片,可见金藻孢子囊;e, f. 分别为吉木萨尔芦草沟组和玛湖凹陷风城组典型页岩荧光薄片照片

H_{30} 、 C_{30} 藿烷; H_{29} 、 C_{29} 藿烷;Ts. 18 α (H)-22, 29, 30三降藿烷;Tm. 17 α (H)-22, 29, 30三降藿烷;G. 伽马蜡烷

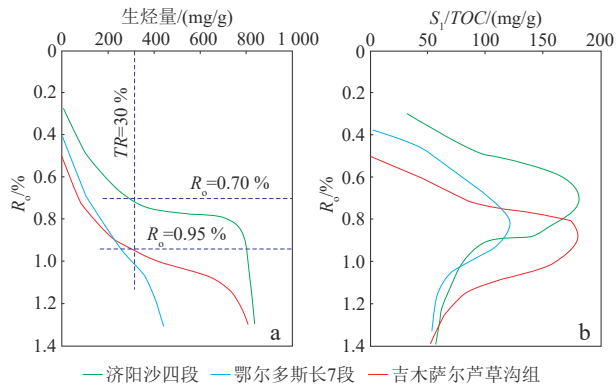


图10 根据物质平衡计算得到的典型陆相富有机质页岩成烃热演化曲线

Fig. 10 Hydrocarbon generation curves with thermal evolution reconstructed based on mass balance calculation for typical lacustrine organic-rich shales

a. 不同成熟阶段烃类产率; b. 不同成熟阶段 S_1/TOC 比值
(不同页岩在干酪根成烃转化率 $TR=30\%$ 时对应的镜质体反射率 R_o 存在显著差异。)

亚段-沙三下亚段页岩沉积时期水体环境为咸水-半咸水,而沙三中亚段及以上层段逐渐过渡为半咸水-微咸水环境,干酪根含硫量也逐渐降低,从而见到下部咸化段大量生烃普遍早于上部相对淡化段的现象^[68]。

如表2所示,中国主要陆相页岩层流体性质具有较大的变化范围。一般而言,热演化程度控制了干酪根结构演化和烃类流体性质,随着热演化程度增加,烃类产物气/油比增大,依次从黑油、挥发性油到凝析油气。然而,通过对比几大盆地中不同页岩岩相特征和岩相组合方式,还可以发现页岩岩相类型对原油物性和气/油比也有明显的控制作用,黑油型的页岩油储层多为碳酸盐岩纹层或粉-细砂岩夹层,而具有规模产量的长英质-黏土质页岩油储层以产挥发性油和凝析油气为主,多具有较高的气/油比。

3.3 以异常压力为标志的自封闭性是页岩油保存的有利条件

非常规页岩油气以连续性聚集和非浮力成藏为特

征^[69-70]。近期研究发现,页岩油气成藏机理的核心是具有纳米-微米级小孔喉半径的富有机质页岩中的油气自封闭作用,其动力是以毛管压力和分子吸附力为主的分子间作用力^[71-72]。

在微观尺度上,松辽盆地齐家-古龙凹陷青山口组页岩油储层纳米孔和纳米缝十分发育,而且多被有机质(固体沥青或干酪根)充填。何文渊(2022)^[73]认为,这些纳米孔缝的成因与有机质-黏土絮凝体密切相关,有利于页岩油气的连续原位聚集。在宏观尺度上,齐家-古龙凹陷青山口组平面上发育西部斜坡带异常低压-常压系统和齐家-古龙凹陷常压-异常高压系统(压力系数 >1.2)^[74]。纵向上,松辽盆地北部青二段上和青三段的地层压力为常压,而青二段下部压力系数为 $1.1 \sim 1.2$,青一段普遍大于 1.2 ^[75]。根据大庆油田的分析数据,古龙凹陷页岩中地层压力系数与全岩热解 S_1 呈正比。因此,以异常压力为标志的自封闭性是页岩油气原位保存的有利条件^[74]。

在济阳坳陷沙四上亚段-沙三下亚段富碳酸盐页岩中具有特征的亮-暗相间“二元”微观纹层结构,碳酸盐纹层由于受富黏土矿物纹层包裹,限制了地层流体压力的大范围传导^[5,76]。宏观尺度上,与古龙凹陷页岩比较,济阳坳陷断陷湖盆泥页岩沉积岩相更为复杂、断裂活动更加发育、空间非均质性更强,地层压力系数一般在 $1.29 \sim 1.99$ ^[77]。平面上和纵向上的沉积相与细粒岩石岩相组合变化为地质流体和压力“封隔箱”的形成创造了有利条件。断裂活动过程中,不同尺度裂缝中黏土矿物涂抹封堵作用也可能形成不同的断控压力单元,有利于页岩油原位富集成藏^[78]。

鄂尔多斯盆地长7段半深湖-深湖环境发育多期次砂质碎屑流与浊流沉积,形成3种页岩油储集类型,即多期叠置砂岩发育型、厚层泥页岩夹薄层粉-细砂岩型和纯页岩型^[31]。由于粉-细砂岩与泥页岩在盆地范围内大面积接触,为长7段泥页岩烃类初次运移提供了有利条件。因此,在相对开放的泥页岩/粉砂岩互层/夹层系统中,受固体有机质和矿物质吸附作用的影

表2 中国陆相代表性页岩油储层基本地质参数

Table 2 Basic geological parameters of typical lacustrine shale oil reservoirs in China

构造/地区	地层	埋藏深度/m	成熟度(R_o)/%	原油密度/(g/cm^3)	气/油比/(m^3/m^3)	地层压力系数
济阳坳陷	沙河街组	3 000 ~ 4 200	0.70 ~ 1.00	0.83 ~ 0.88	60 ~ 1 200	1.20 ~ 1.80
鄂尔多斯盆地	长7段	1 500 ~ 2 900	0.75 ~ 1.20	0.80 ~ 0.86	60 ~ 120	0.77 ~ 0.84
吉木萨尔凹陷	芦草沟组	2 300 ~ 4 500	0.66 ~ 1.63	0.88~0.90 (主产区)	< 200	1.27 (吉171井)
大庆古龙凹陷	青山口组	2 000 ~ 2 700	1.20 ~ 1.70	0.77 ~ 0.83	50 ~ 2 000	1.20 ~ 1.60
四川复兴地区	侏罗系	2 000 ~ 3 000	1.20 ~ 1.70	0.75 ~ 0.79	1 303 ~ 2 124	1.20 ~ 1.90

响,重质烃类主要在富有机质页岩中滞留,而轻质烃类流体在粉-细砂岩夹层中富集。长7段泥页岩地层一般显示出常压或低压特征,地层压力系数一般为0.6~0.8,粉-细砂岩夹层多为低压油藏^[79];同时,黑色页岩中可动油比例较低(S_i/TOC 多数低于50 mg/g)(图4b)。因此,富有机质泥页岩中的多套薄层状粉-细砂岩夹层是长7³页岩油的主要储集类型之一。

3.4 陆相页岩油富集机理与地质模式探讨

大量研究表明,页岩油气富集特征与常规油气存在显著的差异性。页岩油气一般赋存于富有机质细粒沉积岩中,包括高 TOC 的黑色页岩、粉砂质泥页岩和富碳酸盐泥页岩。与致密砂岩和致密灰岩类似,页岩油气储集层一般具有低-特低孔隙度和渗透率。微观尺度上,页岩中纳米-微米级孔隙系统的孔喉半径一般小于1 μm ,与黏土矿物伴随的孔喉系统多数小于30 nm;在富有机质页岩中,与有机质相关的孔缝系统(如干酪根生烃收缩缝、粒间缝、较高成熟阶段形成的有机孔等)较为发育,导致页岩储层中烃类-大分子有机质间的分子吸附作用比致密油气储层更强。因此,以毛管压力为主的油气自封闭作用有利于油气在泥页岩中原位滞留,并在纳米-微米级孔缝系统中聚集^[71]。宏观尺度上,成熟度较高的富有机质页岩一般具有较好的含油气性,大面积连续分布的页岩层系具有较大的页岩油气资源潜力,脆性指数较高的页岩在天然裂缝发育的同时也有利于人工压裂改造,而地层压力高、油质轻则有利于烃类流动和开采。

系统梳理北美主要海相页岩油气盆地的宏观地质背景,可以发现稳定宽缓的构造背景、区域性致密的顶底板、大面积分布的优质烃源岩,以及合适的热演化程度,是控制海相页岩油气在烃源岩层系中大量滞留和大面积连续分布的基本条件;在此基础上,与排烃不畅伴随的欠压实作用和微裂缝形成等因素,则构成地质和工程“甜点”,从而控制页岩油气的局部规模富集^[2,80]。如前所述,中国陆相沉积盆地发育历史与北美海相盆地存在巨大差异,以类型多、分割性和后期活动性强为特点,在陆相淡水湖泊、混积湖泊与咸化湖泊等环境,均形成了各具特色的细粒富有机质岩石沉积体系。因此,必须考虑陆相细粒沉积体系的复杂性,从理解陆相沉积体系强非均质性和储-盖组合多样性等特征着手,探讨陆相页岩油富集机理,建立陆相页岩油富集模式。

前人研究将细粒沉积岩的矿物成分、沉积构造、岩石结构、 TOC 、热成熟度、压力系数、孔隙度和渗透率、含油气性、基底断层和构造复杂性、天然裂缝发育程

度、岩石可压性等,作为评价页岩油气富集的地质参数,但不同研究者在不同地区强调的重点存在明显的差异。通过这些参数的相关性分析,归纳出页岩油富集的3个主控因素:①富有机质细粒沉积岩的岩相,反映了古构造、古气候制约下的古生态系统和古沉积环境协同演化;②热成熟度,反映了埋藏热演化条件下成烃、成岩的化学过程;③富有机质细粒沉积岩所处的物理边界条件,如岩相组合类型、地层接触关系及其与断层-裂缝体系的对接方式等,在很大程度上反映了泥页岩体系的开放/封闭性。因此,沉积岩相决定生-储组合,热成熟度决定烃类性质,边界条件决定成藏类型。据此提出:纹层(夹层)发育段、主力生油窗和异常高压带为陆相页岩油的有利勘探方向。

如图11所示,陆相断陷湖盆和陆相拗陷湖盆形成时的古构造和古地貌环境决定了湖盆内部沉积充填的主导岩相类型和空间展布存在明显的差异性。这种差异性对后续富有机质页岩成烃演化和页岩油富集特征具有重要的影响,从而对页岩油富集模式起决定性作用。

以济阳拗陷沙四上亚段-沙三下亚段为例,其主力富有机质页岩层系为古近纪陆相断陷咸化湖盆沉积,从凹陷边缘到中心,依次发育以外缘粗碎屑为主的沉积体系(图11a中的A1)和内源富碳酸盐为主的沉积体系(图11a中的A2),富碳酸盐-富长英黏土质混源沉积是这类断陷咸化湖盆的显著特征。外缘粗碎屑砂砾岩发育带(A1)是前期常规油气勘探的主要领域。咸化水体形成的富有机质页岩层系(A2)进入生油窗较早,富有机质纹层状岩相具有典型的富有机质-黏土和富碳酸盐纹层“二元”结构,有利于油气原位富集,成为页岩油勘探的首选目标。深洼区(A3)的细粒沉积黏土矿物含量较高、现今埋藏深度较大,是下一步探索中-高熟页岩油气的重要领域。

与此不同,与宽缓的大型陆相拗陷湖盆伴随的高生产力、强还原环境大多有利于富有机质泥页岩的沉积,多级坡折带的发育和频繁的地震火山活动有利于多种深水重力流沉积的发育,造成细粒砂岩与泥页岩在盆地范围内大面积接触(图11b)。例如,鄂尔多斯盆地长7段半深湖-深湖相黑色页岩和暗色泥岩与三角洲前缘砂岩和重力流沉积共生,形成了优越的源-储组合,从而为长7段页岩层系内部油气运移和富集提供了动力。因此,长7¹和长7²亚段中的砂岩夹层或互层在单砂体厚度较大、砂/地比较大的部位成为常规和致密油储层,在单体砂体厚度较薄、砂/地比较低的部位成为鄂尔多斯盆地中-高成熟页岩油富集的主要单元,是目前已经取得勘探突破的优势领域(图11b中

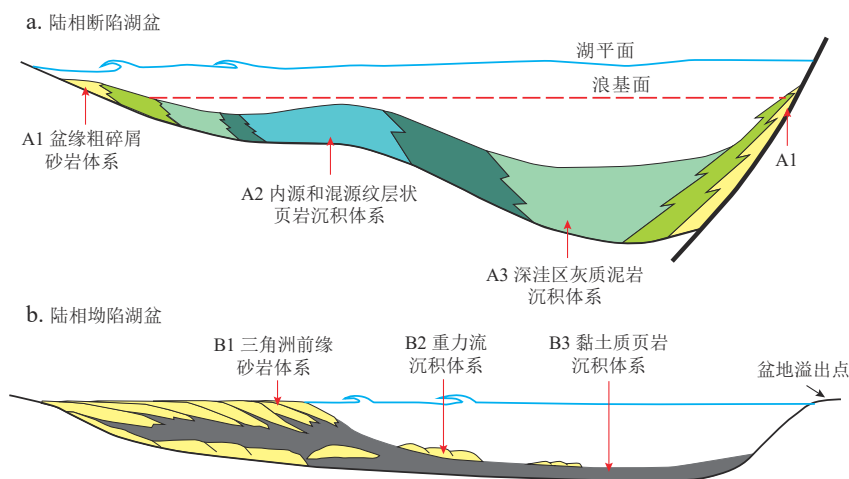


图11 陆相湖盆细粒沉积体系与页岩油富集模式

Fig. 11 Fine-grained sedimentary systems and shale oil enrichment models in lacustrine basins

- a. 陆相断陷湖盆(A1. 盆缘粗碎屑砂岩体系形成常规储层;A2. 内源和混积沉积体系形成源-储一体的纹层状页岩油储层;A3. 深洼区块状灰质泥岩有利于中-高成熟阶段页岩油富集); b. 陆相拗陷湖盆(B1. 三角洲前缘砂体常规和致密储层;B2. 重力流砂体形成薄互层夹层型页岩油储层;B3. 深湖相黑色页岩在中-高成熟阶段有利于轻质油富集)

的B1和B2)。相比之下,经过向临近砂岩夹层的烃类运移,富有机质黑色页岩(B3)中重质烃类和非烃组分相对富集,在主生油窗内烃类流动性较差,在高-过成熟阶段有望形成轻质/凝析油勘探目标。

松辽盆地古龙凹陷青一段与鄂尔多斯盆地长7段均形成于大型拗陷沉积环境,二者的细粒沉积体系和页岩油富集模式既存在共性又有差异性。在陆源碎屑主导的砂体/细粒富有机质页岩层系的空间展布上,二者具有相似的规律性。不同之处在于,古龙凹陷青一段富有机质页岩层系(B3)热成熟度目前已达到高-过成熟阶段($R_o=1.5\% \sim 1.6\%$),页理缝、基质孔和有机孔发育,异常高压为古龙凹陷页岩中轻质油-凝析油气富集高产提供了必要条件。古龙凹陷东北部和北部青一段处于生油高峰期的泥页岩层系既是大庆长垣常规石油的烃源岩,也是下一步粉-细砂岩夹层型页岩油勘探的重要目标。

4 结论

1) 陆相富有机质页岩层系非均质性强,不同湖盆类型陆相页岩发育条件和分布特征存在巨大差异性。

2) 根据岩相组合方式可以将中国陆相页岩层系划分为互层/夹层型、混积页岩型和黏土质页岩型等3种主要类型,分别具有不同的源-储耦合特征。

3) 无机孔是中低成熟页岩油最有利的储集空间类型,长英质-黏土质页岩中以石英粒间孔、长石溶蚀孔和黏土矿物晶间孔为主,混积页岩中以碳酸盐矿物

晶间孔和溶蚀孔为主,在高-过成熟阶段有机孔的比例显著增加。

4) 提出了中国陆相页岩油富集的主控因素是有利的源-储组合、适宜的热演化程度和自封闭性,建立了陆相断陷和拗陷湖盆页岩油富集的地质模式。

5) 需针对各个盆地和页岩层系的地质特点,开展页岩油储集性、含油性、可压性和可动性分析,建立陆相页岩油分类分级评价方法,并在此基础上形成适应性开发工程工艺技术体系。

参 考 文 献

- [1] 郭旭升,黎茂稳,赵梦云. 页岩油开发利用及在能源中的作用[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 38-47.
GUO Xusheng, LI Maowen, ZHAO Mengyun. Shale oil development and utilization and its role in energy industry [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 38-47.
- [2] 黎茂稳,马晓潇,蒋启贵,等. 北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 13-28.
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIANG Qigui, et al. Enlightenment from formation conditions and enrichment characteristics of marine shale oil in North America [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 13-28.
- [3] U. S. Energy Information Administration. Annual energy outlook 2022[EB/OL]. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/electricity_generation.php.
- [4] 宋明水. 济阳拗陷页岩油勘探实践与现状[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 1-12.
SONG Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 1-12.

- [5] 刘惠民. 济阳坳陷古近系页岩油地质特殊性及其勘探实践——以沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段为例[J]. 石油学报, 2022, 43(5): 581–594.
- LIU Huimin. Geological particularity and exploration practice of Paleogene shale oil in Jiyang depression: A case study of the upper submember of member 4 to the lower submember of member 3 of Shahejie Formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(5): 581–594.
- [6] 付锁堂, 付金华, 牛小兵, 等. 庆城油田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2020, 41(7): 777–795.
- FU Suotang, FU Jinhua, NIU Xiaobing, et al. Accumulation conditions and key exploration and development technologies in Qingcheng Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(7): 777–795.
- [7] 付金华, 牛小兵, 李明瑞, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段3亚段页岩油风险勘探突破与意义[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 760–769, 787.
- FU Jinhua, NIU Xiaobing, LI Mingrui, et al. Breakthrough and significance of risk exploration in the 3rd sub-member, 7th member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 760–769, 787.
- [8] 支东明, 唐勇, 杨智峰, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 524–534.
- ZHI Dongming, TANG Yong, YANG Zhifeng, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 524–534.
- [9] 杨智峰, 唐勇, 郭旭光, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩油赋存特征与影响因素[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 784–796.
- YANG Zhifeng, TANG Yong, GUO Xuguang, et al. Occurrence states and potential influencing factors of shale oil in the Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 784–796.
- [10] 何文渊, 柳波, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油地质特征及关键科学问题探索[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 49–62.
- HE Wenyuan, LIU Bo, ZHANG Jinyou, et al. Geological characteristics and key scientific and technological problems of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 49–62.
- [11] 姚红生, 胥灵, 高玉巧, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集高产主控因素与勘探重大突破[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 776–783.
- YAO Hongsheng, ZAN Ling, GAO Yuqiao, et al. Main controlling factors for the enrichment of shale oil and significant discovery in second member of Paleogene Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 776–783.
- [12] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 陆相湖盆页岩层系基本地质特征与页岩油勘探突破——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段一亚段为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 361–372.
- ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Geological characteristics of shale rock system and shale oil exploration in a lacustrine basin: A case study from the Paleogene 1st sub-member of Kong 2 Member in Cangdong sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 361–372.
- [13] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 歧口凹陷歧北次凹沙河街组三段页岩油地质特征与勘探突破[J]. 石油学报, 2020, 41(6): 643–657.
- ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Geological characteristics and exploration breakthrough of shale oil in Member 3 of Shahejie Formation of Qibei subsag, Qikou Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(6): 643–657.
- [14] 蒲秀刚, 时战楠, 韩文中, 等. 陆相湖盆细粒沉积区页岩层系石油地质特征与油气发现——以黄骅坳陷沧东凹陷孔二段为例[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 46–58.
- PU Xiugang, SHI Zhannan, HAN Wenzhong, et al. Petroleum geological characteristics and hydrocarbon discovery of shale system in fine-grained sedimentary area of lacustrine basin: A case study of Kong 2 Member in Cangdong Sag, Huanghua Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 46–58.
- [15] 胡东风, 魏志红, 刘若冰, 等. 湖相页岩油气富集主控因素与勘探潜力——以四川盆地涪陵地区侏罗系为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 113–120.
- HU Dongfeng, WEI Zhihong, LIU Ruobing, et al. Enrichment control factors and exploration potential of lacustrine shale oil and gas: A case study of Jurassic in the Fuling area of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 113–120.
- [16] BREYER J A. Shale reservoirs—giant resources for the 21st century[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012.
- [17] WOOD L J. Shale tectonics[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2011.
- [18] APLIN A C, MACQUAKER J H S. Getting started #20: shales[M]. Tulsa: AAPG/Datapages, 2010.
- [19] CAMP W K, DIAZ E, WAWAK B. Electron microscopy of shale hydrocarbon reservoirs[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2013.
- [20] PITMAN III W C. Relationship between eustacy and stratigraphic sequences of passive margins[J]. GSA Bulletin, 1978, 89(9): 1389–1403.
- [21] TALBOT M R. The origins of lacustrine oil source rocks: evidence from the lakes of tropical Africa[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1988, 40(1): 29–43.
- [22] KATZ B, LIN Fang. Lacustrine basin unconventional resource plays: Key differences[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 56: 255–265.
- [23] 周书欣, 赖特, 普拉特, 等. 湖泊沉积体系与油气[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- ZHOU Shuxin, WRIGHT V P, PRATT N H, et al. Lake sedimentary system and oil & gas[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [24] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合

- 多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 1-25.
- LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 1-25.
- [25] 滕建彬, 刘惠民, 邱隆伟, 等. 东营凹陷古近系湖相细粒混积岩沉积成岩特征[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3808-3826.
- TENG Jianbin, LIU Huimin, QIU Longwei, et al. Sedimentary and diagenetic characteristics of lacustrine fine-grained hybrid rock in paleogene formation in dongying sag [J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3808-3826.
- [26] TYSON R V, PEARSON T H. Modern and ancient continental shelf anoxia: an overview [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1991, 58(1): 1-24.
- [27] 陈安清, 陈洪德, 侯明才, 等. 鄂尔多斯盆地中一晚三叠世事件沉积对印支运动 I 幕的指示[J]. 地质学报, 2011, 85(10): 1681-1690.
- CHEN Anqing, CHEN Hongde, HOU Mingcai, et al. The Middle-Late Triassic event sediments in ordos basin: Indicators for episode I of the indosinian movement [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(10): 1681-1690.
- [28] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1-11.
- YANG Hua, LI Shixiang, LIU Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.
- [29] 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 936-946.
- FU Jinhua, LI Shixiang, XU Liming, et al. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 936-946.
- [30] 刘显阳, 李士祥, 郭芪恒, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长73亚段泥页岩层系岩石类型特征及勘探意义[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1177-1189.
- LIU Xianyang, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Characteristics of rock types and exploration significance of the shale strata in the Chang 73 sub-member of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(8): 1177-1189.
- [31] 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.
- [32] 唐勇, 郑孟林, 王霞田, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组烃源岩沉积古环境[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(5): 677-692.
- TANG Yong, ZHENG Menglin, WANG Xiatian, et al. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(5): 677-692.
- [33] 宋永, 杨智峰, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱湖型页岩油勘探进展[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 60-72.
- SONG Yong, YANG Zhifeng, HE Wenjun, et al. Exploration progress of alkaline lake type shale oil of the Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 60-72.
- [34] 支东明, 宋永, 何文军, 等. 准噶尔盆地中一下二叠统页岩油地质特征、资源潜力及勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(4): 389-401.
- ZHI Dongming, SONG Yong, HE Wenjun, et al. Geological characteristics, resource potential and exploration direction of shale oil in Middle-Lower permian, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(4): 389-401.
- [35] 邵雨, 杨勇强, 万敏, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组沉积特征及沉积相演化[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(6): 635-641.
- SHAO Yu, YANG Yongqiang, WAN Min, et al. Sedimentary characteristic and facies evolution of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(6): 635-641.
- [36] 张元元, 李威, 唐文斌. 玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩发育的构造背景和形成环境[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 48-54.
- ZHANG Yuanyuan, LI Wei, TANG Wenbin. Tectonic setting and environment of alkaline lacustrine source rocks in the Lower Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 48-54.
- [37] 张林晔, 李钜源, 李政, 等. 陆相盆地页岩油气地质研究与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017: 146-154.
- ZHANG Linye, LI Juyuan, LI Zheng, et al. Geological research and practice of shale oil and gas in continental basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017: 146-154.
- [38] 王勇, 刘惠民, 宋国奇, 等. 湖相泥页岩中碳酸盐成因及页岩油气地质意义——以东营凹陷沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段烃源岩为例[J]. 石油学报, 2017, 38(12): 1390-1400.
- WANG Yong, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Carbonate genesis and geological significance of shale hydrocarbon in lacustrine facies mud shale: A case study of source rocks in the upper submember of Member 4 and lower submember of Member 3 of Shahejie Formation, Dongying Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(12): 1390-1400.
- [39] SHEPARD F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1954, 24(3): 151-158.
- [40] FOLK R L. Petrology of sedimentary rocks [M]. Austin: Hemphill Publishing Company, 1980.
- [41] PICKERING K, STOW D, WATSON M, et al. Deep-water facies, processes and models: A review and classification scheme for modern and ancient sediments [J]. Earth-Science Reviews, 1986, 23(2): 75-174.

- [42] FLEMMING B W. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10/11): 1125–1137.
- [43] MACQUAKER J H S, ADAMS A E. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: An inclusive nomenclature for mudstones[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(5): 735–744.
- [44] LOUCKS R G, RUPPEL S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 579–601.
- [45] 刘忠宝, 刘光祥, 胡宗全, 等. 陆相页岩层系岩相类型、组合特征及其油气勘探意义——以四川盆地中下侏罗统为例[J]. *天然气工业*, 2019, 39(12): 10–21.
- LIU Zhongbao, LIU Guangxiang, HU Zongquan, et al. Lithofacies types and assemblage features of continental shale strata and their significance for shale gas exploration: A case study of the Middle and Lower Jurassic strata in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(12): 10–21.
- [46] DONOVAN A D, STAERKER T S, GARDNER R, et al. Findings from the Eagle Ford outcrops of west Texas and implications to the subsurface of South Texas[M]//BREYER J. *The Eagle Ford Shale: A Renaissance in U. S. Oil Production*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2016: 301–336.
- [47] Bureau of Economic Geology. Integrated synthesis of the Permian basin: Data and models for recovering existing and undiscovered oil resources from the largest oil-bearing basin in the United States: DE-FC26-04NT15509[R]. Austin: University of Texas at Austin, 2008.
- [48] POLLASTRO R M, ROBERTS L N R, COOK T A. Geologic model for the assessment of technically recoverable oil in the Devonian-Mississippian Bakken Formation, Williston Basin[M]//BREYER J A. *Shale Reservoirs—Giant Resources for the 21st Century*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 205–257.
- [49] EVENICK J C, MCCLAIN T. Method for characterizing source rock organofacies using bulk rock composition[M]//CHATELLIER J Y, JARVIE D M. *Critical Assessment of Shale Resource Plays*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2013: 71–80.
- [50] ZAGORSKI W A, WRIGHTSTONE G R, BOWMAN D C. The Appalachian Basin Marcellus gas play: Its history of development, geologic controls on production, and future potential as a world-class reservoir[M]//BREYER J A. *Shale Reservoirs—Giant Resources for the 21st Century*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 172–200.
- [51] 付金华, 李士祥, 侯雨庭, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段Ⅱ类页岩油风险勘探突破及其意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(1): 78–92.
- FU Jinhua, LI Shixiang, HOU Yuting, et al. Breakthrough of risk exploration of Class II shale oil in Chang 7 member of Yanchang Formation in the Ordos Basin and its significance[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(1): 78–92.
- [52] 冯子辉, 柳波, 邵红梅, 等. 松辽盆地古龙地区青山口组泥页岩成岩演化与储集性能[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 72–85.
- FENG Zihui, LIU Bo, SHAO Hongmei, et al. The diagenesis evolution and accumulating performance of the mud shale in Qingshankou Formation in Gulong area, Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 72–85.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 王小军, 梁利喜, 赵龙, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组含油页岩岩石力学特性及可压裂性评价[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 661–668.
- WANG Xiaojun, LIANG Lixi, ZHAO Long, et al. Rock mechanics and fracability evaluation of the Lucaogou Formation oil shales in Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 661–668.
- [56] 黄振凯, 郝运轻, 沃玉进, 等. 鄂尔多斯盆地长7段页岩层系储层特征及其页岩油意义[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(3): 1009–1017.
- HUANG Zhenkai, HAO Yunqing, WO Yujin, et al. Reservoir characteristics and shale oil significance of the shale strata in the Chang 7 Member of the Ordos Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(3): 1009–1017.
- [57] 张宸嘉, 曹剑, 王俞策, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油富集规律[J]. *石油学报*, 2022, 43(9): 1253–1268.
- ZHANG Chenjia, CAO Jian, WANG Yuce, et al. Enrichment law of shale oil of Lucaogou Formation in Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(9): 1253–1268.
- [58] 张安达, 王继平, 王永超, 等. 松辽盆地古龙页岩储集空间类型及油赋存状态[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(5): 68–77.
- ZHANG Anda, WANG Jiping, WANG Yongchao, et al. Reservoir space types and oil occurrence of Gulong shale in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(5): 68–77.
- [59] 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(2): 693–741.
- HE Wenyuan, CUI Baowen, WANG Fenglan, et al. Study on reservoir spaces and oil states of the Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin[J]. *Geological Review*, 2022, 68(2): 693–741.
- [60] MUKHOPADHYAY P K, HAGEMANN H W, GORMLY J R. Characterization of kerogens as seen under the aspect of maturation

- and hydrocarbon generation [J]. *Erdoel Und Kohle, Erdgas, Petrochemie Vereinigt Mit Brennstoff-Chemie*, 1985, 38: 7-18.
- [61] MUKHOPADHYAY P K, WADE J A. Organic facies and maturation of sediments from three Scotian Shelf wells [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1990, 38(4): 407-425.
- [62] 张文正, 杨华, 解丽琴, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7优质烃源岩中超微化石的发现及意义[J]. *古生物学报*, 2011, 50(1): 109-117.
- ZHANG Wenzheng, YANG Hua, XIE Liqin, et al. Discovery of micro- and nannofossils in high grade hydrocarbon source rocks of the Triassic Yanchang Formation Chang 7 member in Ordos Basin and its scientific significance [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2011, 50(1): 109-117.
- [63] BASKIN D K, PETERS K E. Early generation characteristics of a sulfur-rich monterey kerogen [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(1): 1-13.
- [64] LEWAN M D, HENRY M E, HIGLEY D K, et al. Abstract: Material-balance approach to petroleum systems: New Albany shale/chesterian of the Illinois Basin [C]//1998 AAPG Annual Convention and Exhibition. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1998: 90937.
- [65] LEWAN M D, RUBLE T E. Comparison of petroleum generation kinetics by isothermal hydrous and nonisothermal open-system pyrolysis [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(12): 1457-1475.
- [66] 张林晔, 宋一涛, 王广利, 等. 济阳拗陷湖相烃源岩有机质化学组成特征及其石油地质意义[J]. *科学通报*, 2005, 50(21): 2392-2402.
- ZHANG Linye, SONG Yitao, WANG Guangli, et al. Chemical composition characteristics of organic matter of lacustrine source rocks in Jiyang Depression and its petroleum geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(21): 2392-2402.
- [67] LI Maowen, CHEN Zhuoheng, MA Xiaoxiao, et al. Shale oil resource potential and oil mobility characteristics of the Eocene-Oligocene Shahejie Formation, Jiyang Super-Depression, Bohai Bay Basin of China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 204: 130-143.
- [68] 王铁冠, 钟宁宁, 侯杰杰, 等. 陆相湖盆生物类脂物早期生烃机制研究[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 1996, 26(6): 518-524.
- WANG Tieguan, ZHONG Ningning, HOU Dujie, et al. Study on early hydrocarbon generation mechanism of biological lipids in continental lake basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 1996, 26(6): 518-524.
- [69] SCHMOKER J. Continuous hydrocarbon reservoirs: Selected issues in the USGS energy resource surveys program [R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1995.
- [70] GAUTIER D L, DOLTON G L, TAKAHASHI K I, et al. 1995 National assessment of United States oil and gas resources: Results, methodology, and supporting data: ds30 [R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1996.
- [71] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 437-452.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 437-452.
- [72] 王江涛, 李育. 沉积盆地异常高压形成机制综述[J]. *石油化工应用*, 2014, 33(1): 5-9, 13.
- WANG Jiangtao, LI Yu. Review on the formation mechanism of abnormal high pressure in sedimentary basins [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2014, 33(1): 5-9, 13.
- [73] 何文渊. 松辽盆地古龙页岩油储层黏土中纳米孔和纳米缝的发现及其意义[J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(3): 1-13.
- HE Wenyuan. Discovery and significance of nano pores and nano fractures of clay in Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(3): 1-13.
- [74] 何文渊, 蒙启安, 张金友. 松辽盆地古龙页岩油富集主控因素及分类评价[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(5): 1-12.
- HE Wenyuan, MENG Qi'an, ZHANG Jinyou. Controlling factors and their classification-evaluation of Gulong shale oil enrichment in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(5): 1-12.
- [75] 向才富, 冯志强, 吴河勇, 等. 松辽盆地异常压力系统及其形成原因探讨[J]. *地质学报*, 2006, 80(11): 1752-1759.
- XIANG Caifu, FENG Zhiqiang, WU Heyong, et al. Three abnormal pressure systems developed in the Songliao Basin, northeast China and their genesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(11): 1752-1759.
- [76] CHAPMAN R E. Clays with abnormal interstitial fluid pressures [J]. *AAPG Bulletin*, 1972, 56(4): 790-795.
- [77] 王勇. 岩性油藏成藏机理及运聚模式——以牛庄洼陷为例[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(3): 18-21, 62.
- WANG Yong. Formation mechanism and accumulation model of lithologic reservoirs: A case study with Niuzhuang subsag [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2012, 19(3): 18-21, 62.
- [78] 王勇, 刘惠民, 宋国奇, 等. 济阳拗陷页岩油富集要素与富集模式研究[J]. *高校地质学报*, 2017, 23(2): 268-276.
- WANG Yong, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Enrichment controls and models of shale oil in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, 23(2): 268-276.
- [79] 杨智, 付金华, 郭秋麟, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组陆相致密油发现、特征及潜力[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(6): 9-15.
- YANG Zhi, FU Jinhua, GUO Qiulin, et al. Discovery, characteristics and resource potential of continental tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(6): 9-15.
- [80] 白国平, 邱海华, 邓舟舟, 等. 美国页岩油资源分布特征与主控因素研究[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(4): 524-532.
- BAI Guoping, QIU Haihua, DENG Zhouzhou, et al. Distribution and main controls for shale oil resources in USA [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2020, 42(4): 524-532.