

文章编号: 0253-2697(2024)11-1565-14 DOI:10.7623/syxb202411001

中国页岩油气源-储耦合类型划分及勘探意义

郭旭升 胡宗全 申宝剑 杜伟 孙川翔 万成祥 王冠平 李敏 王濡岳

(页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室
中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院 北京 102206)

摘要:基于页岩油气源-储耦合思路识别源-储耦合类型及配置是明确页岩油气勘探思路、实现页岩油气高效勘探开发的基础。然而,目前尚无学者将页岩油气纳入统一评价体系进行源-储耦合类型的划分,这在一定程度上制约了页岩油气的勘探开发进程。鉴于此,通过解剖中国典型海相、陆相页岩油气层系的源-储配置特征,将页岩油气的源-储耦合关系划分为3类,明确了不同源-储耦合类型的地质内涵及其控制油气富集的机理,提出了中国页岩油气整体评价的高效勘探思路。研究结果表明:页岩油气的源-储耦合类型可分为源-储分离型、源-储共生型和源-储一体型3类;源-储分离型的烃类运移距离在米级以上,储层近源捕获油气,形成甜点,其代表性层系为四川盆地寒武统筇竹寺组、鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段1亚段+2亚段和准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组;源-储共生型为多源供烃,源-储共存,烃类就近运移至优势储层内,层系整体含油气,其代表性层系为四川盆地二叠系吴家坪组二段、四川盆地侏罗系凉高山组和渤海湾盆地济阳拗陷古近系沙河街组四段;源-储一体型即烃源岩和储层为同层,烃类在层内发生微运移,其代表性层系为四川盆地奥陶系五峰组一志留系龙马溪组和松辽盆地白垩系青山口组;沉积环境、生物硅、热成熟度和生/排烃效率等是影响页岩油气源-储配置关系的核心要素,而源-储配置关系进一步控制了页岩油气的富集。以中国典型页岩油气层系为例,进一步厘清了不同成熟度下纵向上多类型源-储耦合配置关系的勘探层次和勘探思路。研究成果有利于快速识别和优选页岩油气的有利层段,为中国页岩油气的高效勘探开发提供重要科学依据。

关键词:页岩油气;成烃成储;源-储耦合;油气富集;勘探意义

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Classification and exploration significance of source-reservoir coupling types of shale oil and gas in China

Guo Xusheng Hu Zongquan Shen Baojian Du Wei Sun Chuanxiang
Wan Chengxiang Wang Guanping Li Min Wang Ruyue

(State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development; Sinopec Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration & Production Technology; Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China)

Abstract: The types and configurations of source-reservoir coupling can be identified based on the shale oil and gas source-reservoir coupling, which provides a basis for the determination of ideas about shale oil and gas exploration and the efficient exploration and development of shale oil and gas. However, until now, shale oil and gas have not introduced by any scholars into a unified evaluation system for the classification of source-reservoir coupling types, which to some extent restricts the exploration and development process of shale oil and gas. In view of this, based on analyzing the source-reservoir configuration characteristics of typical marine and terrestrial shale oil and gas reservoirs in China, the source-reservoir coupling relationship of shale oil and gas is divided into three categories. Moreover, this study makes clear the geological connotations of different source-reservoir coupling types and their mechanisms controlling oil and gas enrichment, and proposes an efficient exploration approach based on the overall evaluation of shale oil and gas in China. The research results suggest that the source-reservoir coupling types of shale oil and gas can be divided into three categories: source-reservoir separation, source-reservoir coexistence, and source-reservoir integration. Specifically, the migration distance of source-reservoir separation hydrocarbons is above meter scale, and the near-source oil and gas forms sweet spots, represented by the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin, the first and second submembers of Member 7 of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, and the Permian Lucaogou Formation in Jimusar sag of Junggar Basin. The source-reservoir coexistence is characterized with the multi-source supply of hydrocarbons and the coexistence of source and reservoir, of which hydrocarbons are migrated into the nearby advantageous reservoirs to make them oil-bearing as a whole, represented by the Member 2 of Permian Wujiaping Formation in Sichuan Basin, the Jurassic Liangaoshan Formation in Sichuan Basin, and the Member 4 of Paleo-

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 42090022)资助。

第一作者及通信作者:郭旭升,男,1965年4月生,2001年获中国科学院地质与地球物理研究所博士学位,现为中国工程院院士、中国石油学会会士、中国石油化工股份有限公司总地质师、教授级高级工程师,主要从事油气勘探研究与生产管理工作。Email:guoxs@sinopec.com

gene Shahejie Formation in Jiyang depression of Bohai Bay Basin. The source-reservoir integration indicates that the source rock and reservoir are in the same stratum, and hydrocarbons undergo micro migration within the stratum, represented by the Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and the Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin. Sedimentary environment, biogenic silica, thermal maturity, and hydrocarbon generation/expulsion efficiency are the core elements that affect the shale oil and gas source-reservoir configuration and furtherly control the enrichment of shale oil and gas. Taking the typical shale oil and gas reservoirs in China as an example, the paper furtherly clarifies the exploration levels and ideas under the vertical multi-type source-reservoir coupling configuration at different levels of maturity. The research results are beneficial for quickly identifying and optimizing favorable intervals of shale oil and gas, providing an important scientific basis for the efficient exploration and development of shale oil and gas in China.

Key words: shale oil and gas; hydrocarbon generation and accumulation; source-reservoir coupling; hydrocarbon enrichment; exploration significance

引用:郭旭升,胡宗全,申宝剑,杜伟,孙川翔,万成祥,王冠平,李敏,王濡岳.中国页岩油气源-储耦合类型划分及勘探意义[J].石油学报,2024,45(11):1565-1578.

Cite: GUO Xusheng, HU Zongquan, SHEN Baojian, DU Wei, SUN Chuanxiang, WAN Chengxiang, WANG Guanping, LI Min, WANG Ruyue. Classification and exploration significance of source-reservoir coupling types of shale oil and gas in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(11): 1565-1578.

与常规油气不同,页岩油气具有源内滞留和短距离运移的特点,源-储耦合特征决定了页岩油气的富集程度^[1-5]。研究表明,页岩油气的源-储耦合特征十分复杂。页岩油气的源-储耦合关系根据源岩和储层的岩性组合特征,可分为源-储一体型、源-储分异型和纯页岩型^[1];根据源岩与储层的空间配置关系,可分为源-储紧邻型和源-储一体型,前者包括下源上储型、上源下储型和三明治型,后者包括薄互层型和源-储共生型^[2];根据油气赋存空间和储集岩类型,可分为夹层型、裂缝型和纯页岩型^[3];根据有效储层的单层厚度与总厚度占比,可分为储夹层型、源-储互层型、源夹储型和泥页岩型^[4];根据优质储层的岩性特征,可分为致密砂岩型、灰岩夹层型、混合质页岩型和页岩基质型^[5]。张春雨等^[6]在系统梳理源-储间隔夹层的分类方案与成因的基础上提出了泥质隔夹层、含泥质纹层致密砂岩和砂泥岩渐变段 3 类控制陆相致密油的源-储间隔夹层。随着研究不断深入,前人对页岩油气源-储耦合关系的认识逐渐从岩性组合、空间配置等现象聚焦到源-储性质上^[7]。胡宗全等^[8]提出页岩的总有机碳(TOC)含量(C_{TOC})和孔隙度(ϕ)分别反映生烃能力和储集性能,建立了页岩气源-储耦合系数($10\,000C_{\text{TOC}} \times \phi$),是评价页岩层系源-储耦合特征的重要参数。在此基础上,朱彤等^[9]考虑了可压裂性指标——脆性指数(B_i),提出了源-储体系数($10\,000C_{\text{TOC}} \times \phi \times B_i$),以评价页岩油气的源-储特征。综上所述,前人从宏观的源-储配置及源-储耦合关系评价等方面对页岩油气的源-储特征进行了评价,并提出了多种源-储类型划分方案,这在页岩油气的勘探开发中发挥了重要指导作用。然而,以往研究多将页岩油和页岩气分开,利用相对宏观的源-储特征分别建立不同的指标体系并划分油和气的源-

储耦合类型,很少结合微观机理将页岩油气的源-储耦合类型纳入统一的划分体系进行评价。

页岩油气的源-储耦合特征在宏观上表现为 TOC 含量与孔隙度的配置关系,高 TOC 含量和高孔隙度通常代表优越的源-储耦合;在微观上体现为页岩中有机质与孔隙之间的配置关系,例如,固体沥青内部发育有机质孔,有机质充填于矿物粒间孔隙,以及有机质与矿物内部孔隙分隔^[10-11]。研究表明,页岩油气的源-储耦合特征控制着油气的富集程度,优越的源-储耦合关系对于页岩油气富集高产具有重要的控制作用^[10-12]。页岩油气的成烃、成储具有时间与空间同步演化的特征,页岩内部既要经历无机成岩过程,又要经历有机成烃过程,页岩储层的孔隙演化与这两个过程耦合^[11,13-14]。页岩的成岩作用先于成烃作用发生,并晚于成烃作用终止。在早期成岩阶段,无机矿物形成稳定固体格架,原始有机质随后经历成油作用,液态烃在刚性格架内被大量保留,如硅质生物体内的蛋白石转化成石英,形成大量粒间孔隙,为页岩油的充注提供储集空间^[11,15]。随着热演化程度增加,黏土矿物及其转化作用开始影响有机质的富集、生烃及烃类赋存,进而影响页岩油富集和流动^[16-17]。此时,页岩中形成无机质孔,液态烃呈动态富集,具有良好的页岩油源-储耦合条件。当热演化程度继续增加,进入生气阶段,赋存在原生无机质孔隙中的页岩油裂解,形成固体沥青及页岩气,而硅质生物骨屑的成岩多孔性则有利于藻类所生成烃类的原位滞留和后期裂解,有机质孔隙大量发育与保存,此时页岩气的源-储耦合条件处于最佳时期^[15,18-19]。因此,源-储耦合的配置关系对页岩油气的富集至关重要。

目前,诸多学者对源-储耦合进行了探索性总结与

归纳,如源内和源外富集体系、6类“源-位结构”关系、输导层(体)的天然气富集模式、不同局限盆地的页岩油气源-储组合分类等^[19-23]。但多局限于具体地区和层系,尚无学者将页岩油气放到统一的源-储耦合体系下进行思考,进而评价不同类型烃源岩和储层的配置关系,明确其对油气富集的影响。此外,对于差异源-储耦合特征及其对应的源-储耦合类型也缺乏明确定义,尚不明确一体化地质评价和分层次勘探思路^[24-28]。笔者针对中国典型海相和陆相页岩油气层系开展了源-储耦合特征分析,提出了页岩油气源-储耦合类型的统一划分方案,明确了源-储耦合控制页岩油气富集高产的机理,并提出整体评价和分层次勘探实践建议,以期为中国页岩油气高效勘探提供技术支持。

1 源-储耦合类型划分

笔者在前人研究基础上,基于源、储的宏观性质(烃源岩的 TOC 含量和储层的孔隙度)和微观空间配置关

系提出了页岩油气源-储耦合类型的划分方案。页岩油气源-储耦合的基本类型可识别为 3 类(图 1):①源-储分离型,也可称为互层/夹层型,具有源-储分离或近源运移的特点,泥页岩层系中的薄层砂岩或灰岩层为有利储层。由于近源有利于捕获油气,形成甜点,源-储分离的科学内涵强调烃类发生运移,且运移距离在米级以上。②源-储共生型,也可称为混积页岩型,具有多源供烃、源-储共存的特点,其中,页岩层系整体含油气,混积岩自身与相邻页岩向混积岩储层甜点供烃并富集成优质甜点;源-储共生的科学内涵强调烃类就近运移至优势储层内。③源-储一体型,该类型具有源-储一体的特点,即长英质-黏土质黑色页岩整体含油气,高 TOC 含量、高热演化程度、地层超压以及物性甜点共同控制着页岩油气的富集,其科学内涵强调烃类在层内发生微运移。3 类源-储配置划分方案将中国的页岩油和页岩气纳入到统一的源-储耦合体系下,其分类和典型地区、典型层系页岩油气的源-储耦合特征如图 1、图 2 所示。

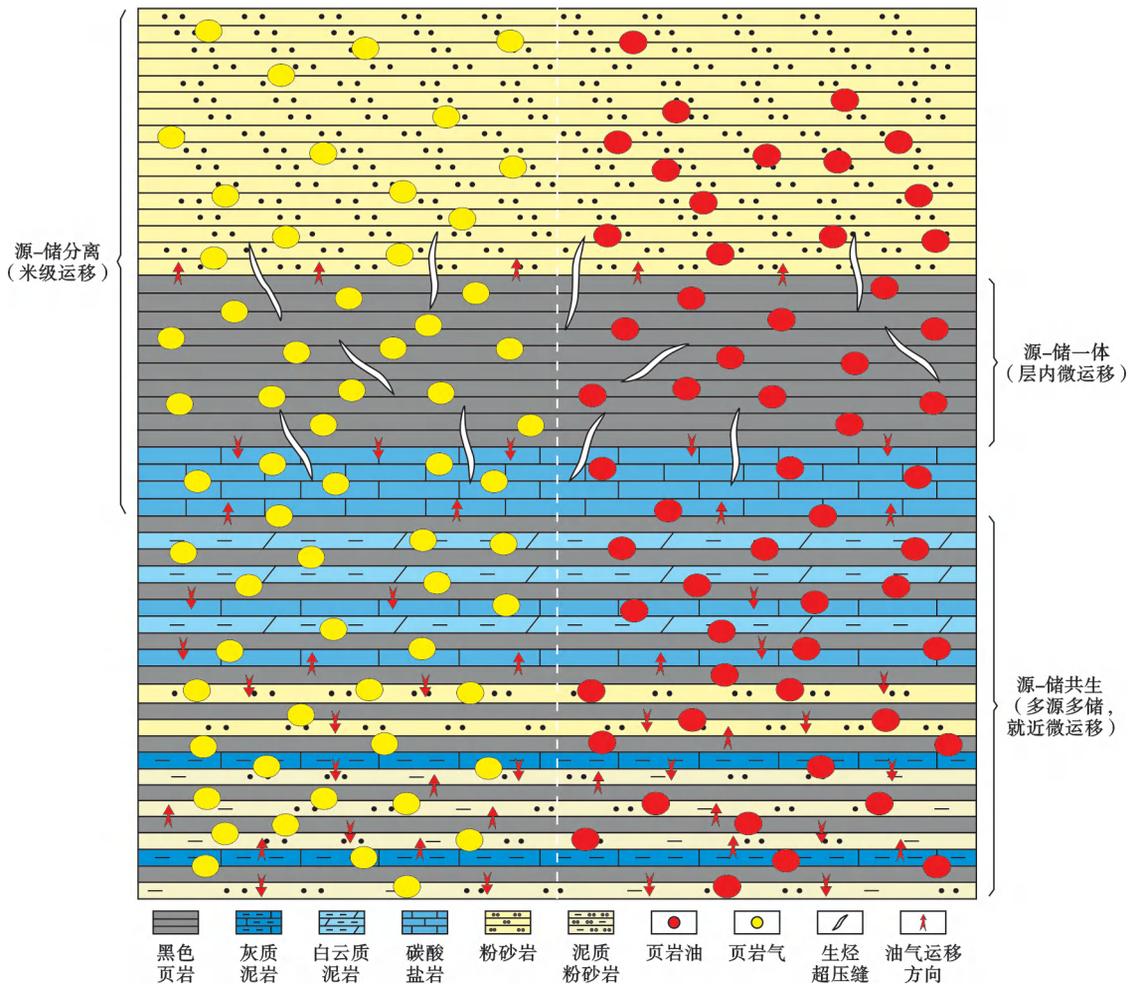
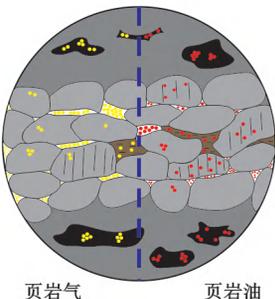
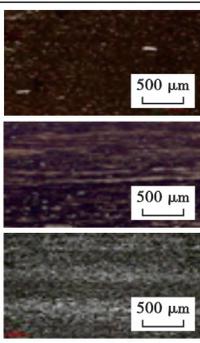
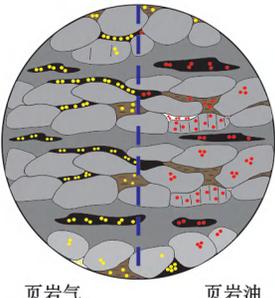
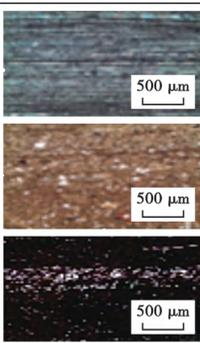
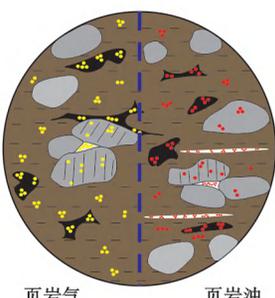
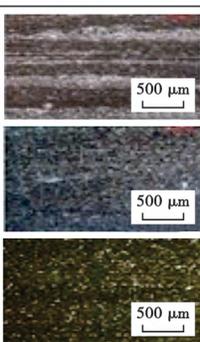


图 1 页岩油气的源-储耦合模式

Fig. 1 Source-reservoir coupling model of shale oil and gas

类型	典型实例	地质特征	源-储配置模式示意	主要岩相
源-储分离型 (互层/夹层型)	四川盆地寒武统筇竹寺组、鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段(长7段)1亚段+2亚段,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组	烃类运移米级以上,源-储分离或近源运移,薄层砂岩或灰岩为有利储层,由于近源利于捕获油气形成甜点		
源-储共生型 (混积页岩型)	四川盆地二叠系吴家坪组、侏罗系凉山组,渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷一沾化凹陷古近系沙河街组三段-沙河街组四段、黄骅坳陷沧东凹陷古近系孔店组二段,苏北盆地古近系阜宁组二段	烃类就近运移至优势储层内,多源供烃,源-储共存,页岩层系整体含油气,混积岩自身与相邻页岩向混积岩储层供烃形成甜点		
源-储一体型 (黏土/硅质/钙质页岩型)	四川盆地寒武统筇竹寺组、奥陶系五峰组-志留系龙马溪组、二叠系大隆组、侏罗系自流井组,松辽盆地中部白垩系青山口组一段,鄂尔多斯盆地三叠系长7段3亚段	烃类在层内发生微运移,源-储一体,长英质-黏土质黑色页岩整体含油气,高TOC含量、高热演化、地层超压、物性甜点控制油气富集		



硅质颗粒 钙质颗粒 烃源岩基质 储层基质 干酪根/沥青 页岩气 页岩油 微裂缝

图2 中国页岩油气源-储耦合类型的划分方案

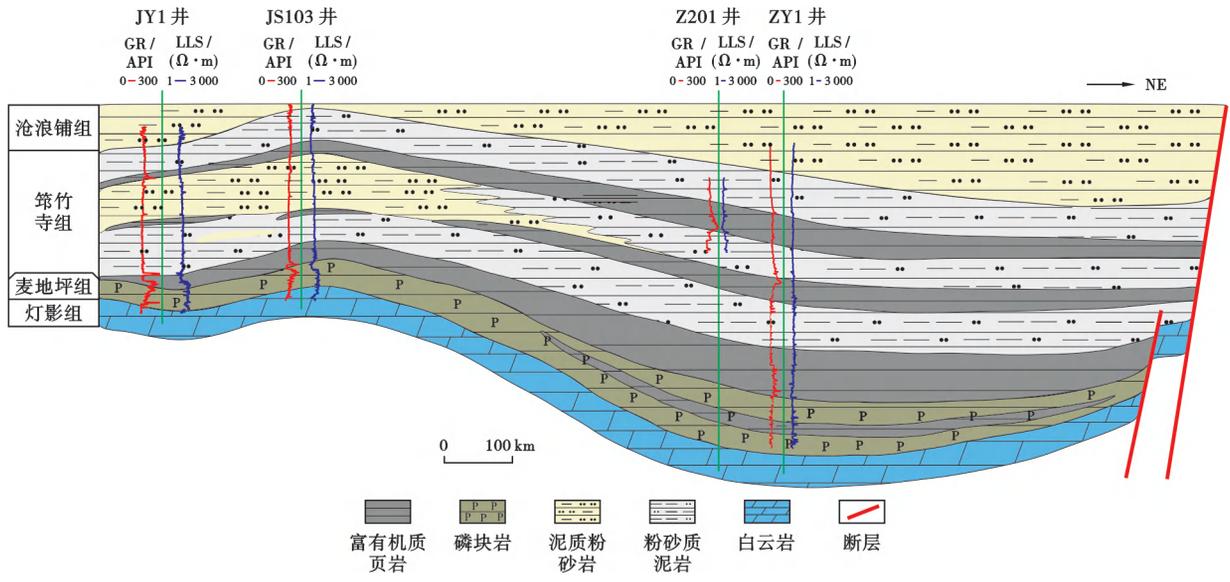
Fig. 2 Classification of source-reservoir coupling types of shale oil and gas in China

2 页岩油气不同类型源-储耦合实例

2.1 源-储分离型

四川盆地寒武统筇竹寺组页岩气为典型的源-储分离型页岩气。筇竹寺组页岩是中国南方早寒武世早期沉积的一套海相黑色泥页岩,具有厚度大、有机碳含量高、热演化程度高、分布范围广的特点^[11]。筇竹寺组的沉积物类型丰富多样,砂质、泥质、灰质及砂泥灰混合沉积均有发育,自下而上由富硅、富磷、富碳页岩演变为砂泥质互层页岩,或砂质、泥质与灰质互层混积页岩,或灰泥质页岩,再到纯碳酸盐岩。筇竹寺组共发育4套富有机质页岩,与之对应的是4套页岩气产层^[29-30](图3)。富有机质页岩的有机碳含量最高,平均为6.3%,最大可达9.5%;孔隙以有机质孔为主,无机矿物质孔不发

育^[29]。整体来说,富有机质页岩具有较高的有机碳含量,而4套富有机质页岩层系中间的泥质粉砂岩具有较高的孔隙度^[29]。筇竹寺组页岩的镜质体反射率(R_o)为2.2%~5.0%,平均为3.5%,大多数处于过成熟阶段晚期。富有机质页岩生烃,所产生的油气聚集到米级差异的泥质粉砂岩以及粉砂岩夹层中,会形成“泥生砂储”的富集模式(图1)。例如,在获得高产稳产工业气流的JS103井,主力产层为泥质粉砂岩,储集空间以无机质孔、有机质-黏土矿物复合孔为主^[11,29-30]。由此可见,具有这种源-储配置特征的四川盆地寒武统筇竹寺组页岩气为源-储分离型页岩气(图1)。需要注意的是,在四川盆地局部地区,4套富有机质页岩内部也发育一些高碳高孔的微观源-储特征,这些区域则是源-储一体型页岩气的有利发育区(图1、图3)。



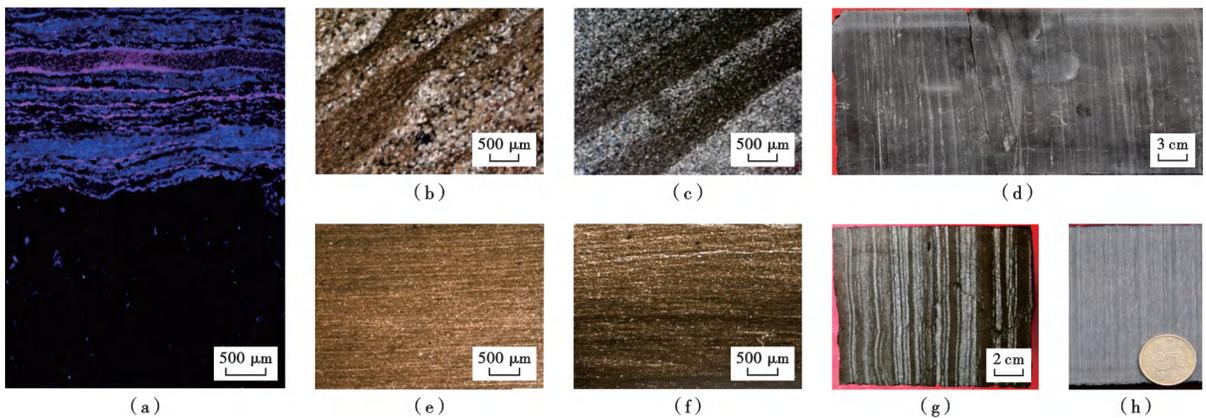
注:GR—自然伽马;LLS—浅侧向电阻率。

图 3 四川盆地寒武系筇竹寺组的沉积相带模式

Fig. 3 Sedimentary model of Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin

鄂尔多斯盆地延长组 7 段(长 7 段)1 亚段 + 2 亚段的页岩油和准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油为典型的源-储分离型页岩油。长 7 段主要发育黑色页岩、细砂岩、粉砂岩、暗色泥岩以及凝灰岩^[31-32][图 4(a)和图 5]。泥页岩储层主要发育黏土矿物孔和刚性矿物支撑的粒间孔,而细砂岩和粉砂岩储层主要发育残余粒间孔、溶蚀孔以及黏土矿物孔,凝灰岩储层则以发育溶蚀孔为主^[31-35]。泥页岩的生/排烃作用强,与粉砂—细砂岩、凝灰岩呈大面积直接接触,

油气的近源高压充注使得重力流砂岩薄夹层的含油饱和度,烃类经过孔缝网络系统在粉砂—细砂岩夹层中富集,形成优质甜点^[31-33,36][图 1、图 4(a)]。有学者提出,在鄂尔多斯盆地长 7 段夹粉砂岩型与纯页岩型的源-储组合中,存在源内容烃层、供烃层和滞烃层 3 类地层单元,构成了源内“页岩油系统”^[37];也有学者提出,黑色富有机质页岩与砂岩的组合是最理想的页岩油甜点^[32]。鄂尔多斯盆地页岩油的主力产层多为长 7 段 1 亚段 + 2 亚段的夹层段(砂岩),

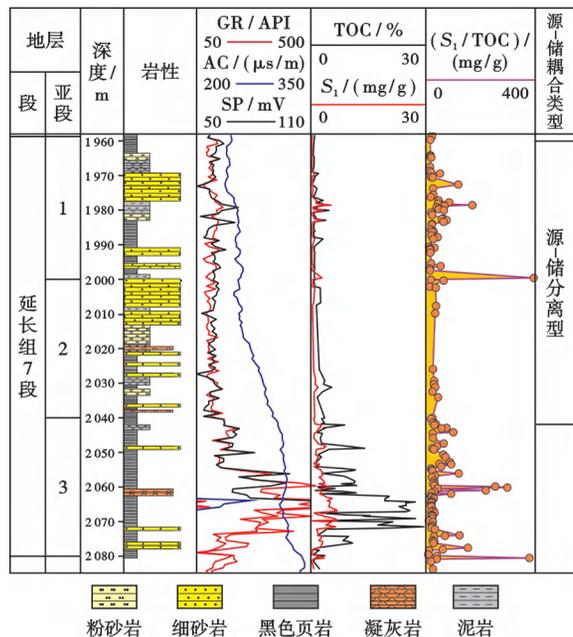


(a)烃类富集在凝灰岩、粉砂岩夹层的微裂缝、粒间孔缝内,鄂尔多斯盆地长 7 段页岩及其夹层,C96 井 2 069.40 m,荧光;(b)凝灰岩,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组,J10025 井 3 549.80 m,单偏光;(c)含碳白云质碎屑粉砂岩,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组,J10025 井 3 698.10 m,单偏光;(d)中碳粉砂纹层型混合质页岩,四川盆地凉高山组,XY1 井 2 617.60~2 618.30 m,岩心;(e)中碳粉砂纹层型混合质页岩,四川盆地凉高山组,XY1 井 2 592.90 m,单偏光;(f)中碳粉砂纹层型混合质页岩,四川盆地凉高山组,XY1 井 2 594.60 m,单偏光;(g)富有机质亮晶纹层灰质泥岩,渤海湾盆地济阳拗陷沙河街组四段(沙四段),FY1 井 3 258.70 m,岩心;(h)富有机质隐晶纹层泥质灰岩,渤海湾盆地济阳拗陷沙四段,FY1 井 3 439.20 m,岩心。

图 4 页岩油气优质甜点的岩石类型

Fig. 4 Rock types of shale oil and gas sweet spot

而长7段3亚段页岩的含油性与有机碳含量不匹配, 烃类多赋存在粉砂岩和凝灰岩夹层中, 因而长7段具有明显“下生上储”、“泥生砂储”的特征(图5)。长7段3亚段页岩的相对排烃效率平均为60%^[36], 烃类在运移过程中受泥页岩层析作用影响, 在砂岩夹层中主要富集油质轻、气油比高、黏度小、流动性好的优质烃类(图1)。长7段3亚段页岩生/排烃, 烃类在长7段1亚段+2亚段形成大规模富集, 具有源-储分离型的配置特征。



注: GR—自然伽马; AC—声波时差; SP—自然电位; TOC—总有机碳含量; S_1 —游离烃含量。

图5 鄂尔多斯盆地三叠系长7段1亚段+2亚段页岩油的典型源-储分离型特征(据文献[15]修改)

Fig. 5 Typical source-reservoir separation characteristics of shale oil in the 1st and 2nd submembers of Member 7 of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组发育一套暗色泥质、白云质、凝灰质多源的咸化湖盆细粒混合沉积, 具有三源混积、薄层叠置、整体含油、局部富集、连续分布的特征^[21, 25, 38]。芦草沟组的岩性主要由粉砂-细砂、泥及碳酸盐组成的混积岩, 且具有薄层状结构^[25]。粉砂岩类是最优质的储层, 具有孔径大、物性好、渗流条件好的特点, 是已建产的芦草沟组甜点的主要岩性^[25]。图6显示, 芦草沟组的TOC含量、游离烃含量(S_1)以及含油性在纵向上的匹配关系错位, 揭示从页岩中生成的烃类经过近源运移, 在粉砂岩和凝灰岩夹层中富集[图4(b)、图4(c)]。多层优质储层与烃源岩呈薄互层状叠置发育, 形成了纵向上的源-储组合甜点(图6)。在生经过

程中, 由于受源-储压差影响, 油气会首先沿着页理面再沿着微裂缝呈脉冲式扩散至相邻的优质储层中, 形成“源生邻储”的富集模式, 是源-储分离型配置的典型代表(图1、图6)。

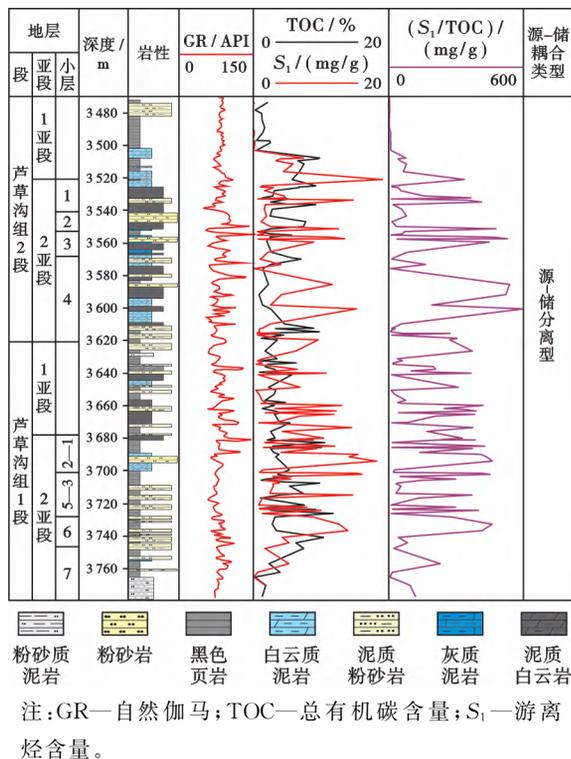


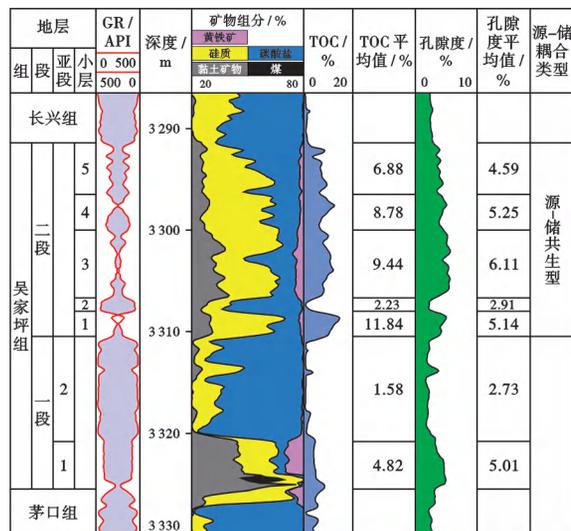
图6 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油的典型源-储分离型特征(据文献[25, 38]修改)

Fig. 6 Typical source-reservoir separation characteristics of shale oil in Permian Lucaogou Formation in Jimsar sag of Junggar Basin

2.2 源-储共生型

四川盆地红星地区二叠系吴家坪组和侏罗系凉山组的页岩气为典型的源-储共生型页岩气。吴家坪组在纵向上可划分为2段, 其中, 吴家坪组二段(吴二段)发育一套富硅富碳页岩储层, 是勘探开发的重点目标层系, 从下到上可进一步划分为①、②、③、④和⑤共5个生产小层^[39], 发育硅质页岩相、灰岩相、硅质灰质页岩相和灰质硅质页岩相多种类型。该套页岩层系的有机碳含量按①→③→④→⑤→②的小层顺序依次降低, 最高可达11.94%, 最低仅为2.23%; 平均孔隙度按③→④→①→⑤→②的小层顺序依次降低, 最高可达6.11%, 最低为2.91%; 含气性按③→④→①→⑤→②的小层顺序依次降低^[39]。整体而言, 在吴二段, 单一孔隙度与含气性以及有机碳含量与含气性并未表现出明显的正相关关系, 而表现为较高有机碳含量与较高孔隙度同时控制了较高的含气性^[39-40], 这说明较好的源-储耦合关系可控制页岩气的富集。吴二段的不同的

层不同岩相形成多源供烃,烃类向邻近的优势储层发生运移(图 7),具有典型的源-储共生型特征(图 1)。与源-储分离型不同,源-储共生型页岩油气具有运移距离较短且油气富集受高有机碳含量和高孔隙度共同控制两个特点(图 7)。

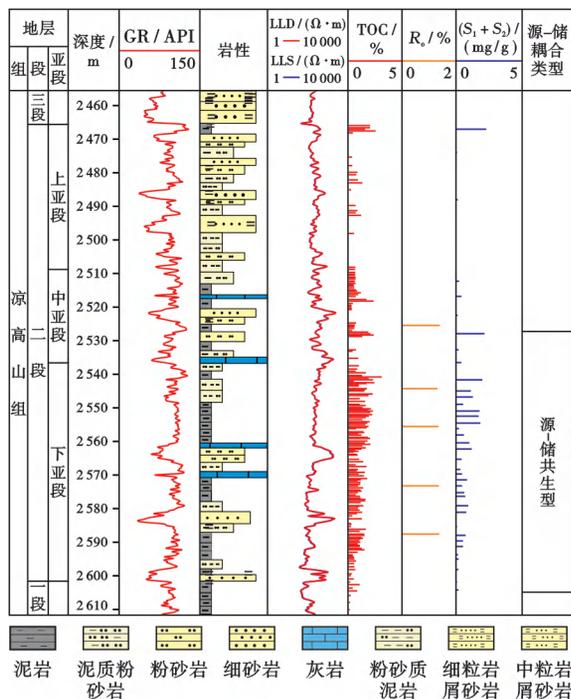


注:GR—自然伽马;TOC—总有机碳含量。

图 7 四川盆地红星地区二叠系吴家坪组页岩气的典型源-储共生型特征

Fig. 7 Typical source-reservoir coexistence characteristics of shale gas in Permian Wujiaping Formation in Hongxing area of Sichuan Basin

四川盆地侏罗系凉高山组自下而上分为 3 段,主要发育一套三角洲—湖泊相沉积体系。凉高山组一段(凉一段)和凉高山组二段(凉二段)中—上部主要为滨/浅湖亚相沉积;凉二段下部主要为半深湖亚相沉积,为页岩油气的突破层系;凉高山组三段(凉三段)主要发育三角洲相沉积^[11,41-42]。凉高山组主要发育低碳块状粉砂岩相、低碳块状砂质泥岩相、低碳粉砂纹层型混合岩相、中碳粉砂纹层型混合页岩相以及高碳粉砂纹层型黏土质页岩相,不同小层发育不同的岩相和岩相组合(图 8),不同岩相具有不同有机碳含量、孔隙度以及含气量,但含气量最高的岩相既不具有最高有机碳含量也不具有最高孔隙度^[28]。纹层型混合页岩相和纹层型黏土质页岩相是有利岩相,其中以中碳粉砂纹层型混合页岩相的品质最优,纹层密度高[图 4(d)、图 3(f)]。整体而言,凉高山组具有多层叠置发育、岩性复杂、中—高有机碳含量、高孔隙度和较好含气性的特征^[41-42]。凉高山组与吴二段具有相同的源-储共生型特征,由多套具有较高有机碳含量的页岩生烃并向储集甜点供烃,层系的含气性由孔隙度和总有机碳共同控制(图 8)。

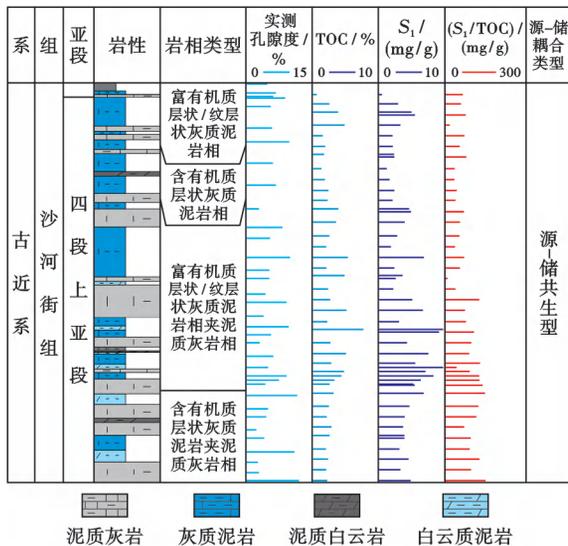


注:GR—自然伽马;LLD—深侧向电阻率;LLS—浅侧向电阻率;TOC—总有机碳含量; R_s —镜质体反射率; S_1 —游离烃含量; S_2 —热解烃含量。

图 8 四川盆地侏罗系凉高山组页岩油气的典型源-储共生型特征

Fig. 8 Typical source-reservoir coexistence characteristics of shale oil and gas in Jurassic Lianggaoshan Formation in Sichuan Basin

渤海湾盆地济阳坳陷古近系沙河街组四段(沙四段)页岩油为典型的源-储共生型页岩油(图 9)。渤海湾盆地济阳坳陷沙四段上亚段发育一套半咸水—咸水的半深湖—深湖亚相沉积,主要发育富有机质纹层状泥质灰岩相、富有机质层状泥质灰岩相、富有机质纹层状灰质泥岩相、富有机质层状灰质泥岩相、含有机质层状灰质泥岩相、含有机质块状灰质泥岩相等多种岩相^[43](图 9)。纹层状岩相的储集性好,孔隙度为 8.72%,发育大量层理缝、碳酸盐晶间孔和溶孔;层状岩相的孔缝连通性下降,孔隙度为 5.23%,主要发育穿层缝、顺层缝和部分粒间孔;块状岩相的孔缝连通性最差,孔隙度为 2.28%,主要发育不规则缝和黏土矿物晶间孔^[26]。在整套层系中,富有机质黏土矿物纹层大量生烃,烃类短距离运移至具有大孔优势、孔缝发育的富碳酸盐储集纹层中^[26,44]。富有机质黏土矿物生烃纹层与较低有机质、较好孔渗性以及富碳酸盐储集纹层呈韵律互层、相互叠置,表现为“泥生灰储”结构模式[图 4(g)、图 4(h)]。



注: TOC—总有机碳含量; S₁—游离烃含量。
 图9 渤海湾盆地济阳坳陷古近系沙四段页岩油的典型源-储共生型特征(据文献[43]修改)

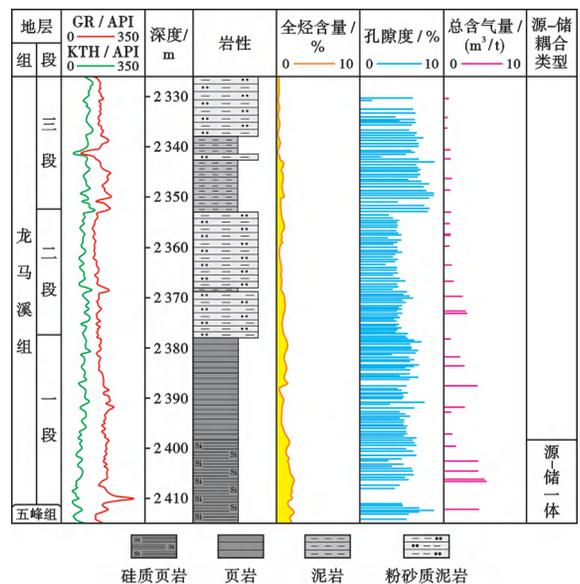
Fig. 9 Typical source-reservoir coexistence characteristics of shale oil in Member 4 of Paleogene Shahejie Formation in Jiyang depression of Bohai Bay Basin

2.3 源-储一体型

四川盆地及其周缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组黑色页岩段的页岩气为典型的源-储一体型页岩气。五峰组—龙马溪组底部的黑色页岩为深水陆棚相沉积,富含放射虫等硅质生物和浮游藻类等,是页岩气生成的物质基础。黑色页岩既是页岩气的主力产层^[45-48],也是良好的页岩气储层。黑色页岩内有机质孔隙发育,常见固体沥青内部有机质孔、藻类体与生物碎屑有机质孔等,是页岩气的重要储集空间^[46-47];而无机矿物孔,如硅质矿物孔隙、黏土矿物孔隙、碳酸盐矿物孔隙和黄铁矿晶间孔隙等,一方面能够直接提供页岩气赋存空间,另一方面通过充填有机质,利用有机质内部的有机质孔间接储集页岩气^[17-18]。从单井综合柱状图(图10)来看,五峰组—龙马溪组黑色页岩具有高TOC含量、高孔隙度和高含气量,表现为源-储一体、整体含气的特征。

松辽盆地白垩系青山口组一段(青一段)是在温暖潮湿气候条件下在半深湖—深湖中沉积的一套厚层富有机质泥页岩^[49-51]。根据岩性、TOC含量和沉积构造等特征,可以将青一段划分为薄片状页岩、块状泥岩、纹层状页岩和层状页岩4种岩相类型^[52]。薄片状页岩和块状泥岩以黏土质和长英质为主,前者页理发育,后者页理不发育。纹层状页岩的岩性主要为页岩和粉砂质泥岩,结构上表现为泥页岩夹砂质纹层。层状页岩的岩性以页岩和粉砂质泥岩为主,其次为粉砂岩,结构上表现为泥页岩与粉砂

岩互层。其中,薄片状页岩和块状页岩中的油气赋存具备典型的源-储一体特征(图11),薄片状页岩为优质烃源岩和优质储层,整体含油;相比而言,块状泥岩表现为差源差储,含油性差。薄片状页岩的TOC含量高,通常大于2.0%,储集空间以黏土矿物晶间孔为主,多为介孔,且页理缝发育,平均孔隙度为6.4%,有机质热解生成的液态烃可以直接储集在相邻的无机矿物孔隙中。薄片状页岩的S₁通常大于2 mg/g,含油性好,与TOC含量和孔隙度也表现出较好的匹配关系。块状页岩与薄片状页岩相比,TOC含量和孔隙度整体较低,含油性也相应较差^[52]。



注: GR—自然伽马; KTH—无铀伽马。
 图10 四川盆地奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气的典型源-储一体型特征

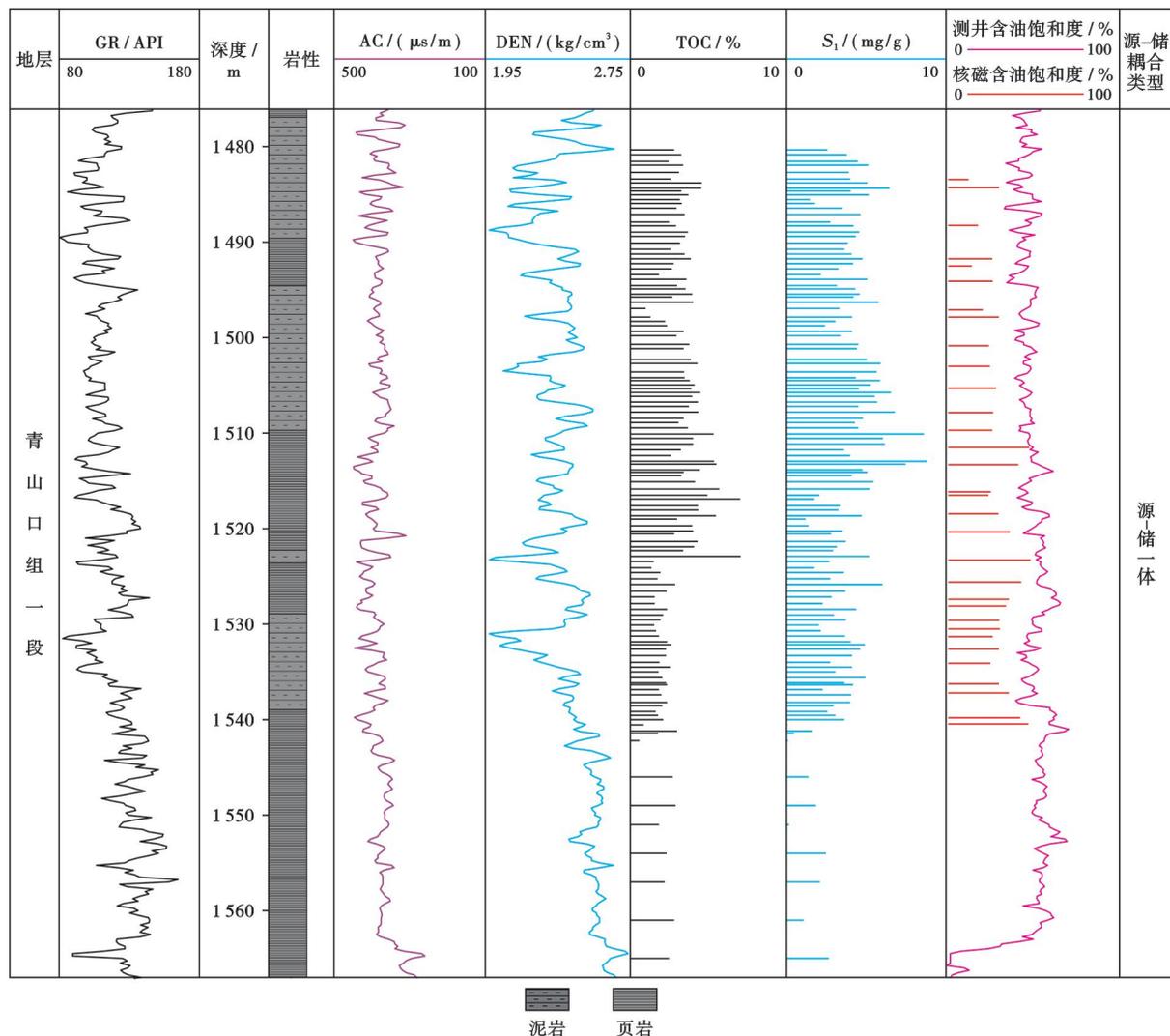
Fig. 10 Typical source-reservoir integration characteristics of shale gas form Ordovician Wufeng Formation to Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin

3 源-储耦合控制油气富集机理

笔者从地质内涵和时空演化角度进一步揭示源-储耦合配置关系对油气分布的控制。

3.1 源-储分离型

对于源-储分离型页岩油气,在有机质大量生成液态烃阶段,由于碎屑颗粒支撑的无机质孔所受到的压实作用较弱,孔缝保存的条件好,干酪根排出的液态烃可以运聚到这些较大的无机质孔缝中。随着生烃增压,连通性较好的无机质孔缝可为赋存于其中的液态烃的远距离运移提供条件,而泥页岩中的层析作用导致烃类黏度更小、油质更轻,更加容易流动,烃类发生米级运移。该类型典型的源-储配置如鄂尔多斯盆地长7段3亚段黑色泥页岩与长7段1亚段+2亚段砂



注:GR—自然伽马;AC—声波时差;DEN—密度;TOC—总有机碳含量; S_1 —游离烃含量。

图 11 松辽盆地南部青一段页岩油的典型源-储一体型特征(据文献[52]修改)

Fig. 11 Typical source-reservoir integration characteristics of shale oil in Qingshankou Formation in southern Songliao Basin

岩之间的耦合关系。赵文智等^[36]提出长 7 段 3 亚段页岩的相对排烃效率平均为 60%，烃类可以在其上覆的长 7 段 1 亚段 + 2 亚段中形成大规模富集。这种生/排烃强的优质页岩与储集性好的砂岩等夹层组成的源-储配置是烃类富集的最佳组合^[32]。由于夹层为泥页岩层系，因此其赋存原油属于页岩油^[53]。在大量生气阶段，烃类在无机质孔隙中进一步热解演化为沥青和天然气，烃类充当气源，而沥青则充当有机质孔的支撑载体^[11]。部分气态烃赋存在有机质孔及附近储集性好的无机质储集空间中，导致原始生烃母质与气态烃在赋存空间上相隔，形成了源-储差异。对于源-储配置中不容易被压实的刚性纹层，其既有利于气态烃运移又有利于在储层改造中形成复杂缝网，从而提高油气井的产量和采收率。刚性纹层(砂质)有利于页岩气富集，增加游离气含量^[33]。例如，四川盆地地下寒

武统筇竹寺组页岩气藏发育“泥生砂储”高产层段，鄂尔多斯盆地延长组页岩发育砂质纹层，这些刚性纹层对页岩层系的储集能力具有明显的改善。

3.2 源-储一体型

源-储一体型页岩油气中强调有机生物和生物成因的硅质在源-储耦合关系中的关键作用。在生油窗期，由于较厚的泥页岩中含有强生油有机生物且保存条件较好，生烃层段在生烃后仍赋存大量烃类，如松辽盆地青山口组页岩厚度较大，页岩中含有微生物改造的浮游藻类，是极具生烃潜力的生烃母质^[54]。笔者强调生物硅质，是由于这种硅质矿物的沉淀发生在早成岩期，此时，蛋白石 A 将快速转化成高硬度石英，同时形成大量粒间孔，从而增强岩石的抗压实能力，使原始有机质在生烃作用下形成的石油在硅质矿物的粒间孔中得以赋存^[18]。生物硅质矿物与有机质具有内在的

沉积成因联系,生物硅质刚性颗粒的粒间易于保存有机质,有机质孔又是页岩气的主要储集空间^[17]。例如,在四川盆地五峰组—龙马溪组高自然伽马层段,富有机质硅质页岩的 R_o 可超过2.2%,热演化程度处于过成熟阶段,天然气以干气为主,有机质经热演化生成的烃类能够原地赋存在周围发育的有机质孔中,而放射虫等硅质生物形成的生物硅可抗压保孔,从而使得页岩油藏表现出良好的源-储一体的特性^[45-48]。生物硅质含量的增多还可以增加页岩的可压裂性,有利于气井高产。富含生物硅质的富有机质页岩具有高TOC含量、高孔、高含气性以及高脆性的特点,是源-储一体型页岩油气藏富集高产的关键^[17-18]。

3.3 源-储共生型

源-储共生型页岩油气藏是处于源-储分离型和源-储一体型之间的类型。无论是在生油还是生气阶段,该类型油气藏是由于在强非均质性的页岩层系中存在多个“源”和多个“储”,岩性为“源-储一体”的混积岩和页岩,整个层系均富含油气,由混积岩自身与相邻页岩向混积岩供烃。胡宗全等^[13]提出四川盆地侏罗统自流井组既存在微观上有机质与有机孔的源-储一体耦合,以及原始有机质与无机质孔和微裂缝之间纳米—微米级油气迁移距离的耦合,又存在页岩与夹层间毫米—厘米级乃至米级油气运移距离的耦合。整个下侏罗统发育的多套页岩与砂岩、页岩与灰岩的不同沉积环境及岩石类型的多期叠置导致自流井组既存在多“源”也存在多“储”。在时间上,成烃过程中不同成熟阶段干酪根裂解生成的原油差异以及生烃增压效应产生的脉冲式有机-无机流体和跨层超压缝网,与成储过程中复杂孔缝体系的发育过程相互作用、协同演化,推动了富有机质泥页岩的成烃与成储条件在时间上形成有效配置,导致源-储耦合性较好的层段具有较高的烃类产量,如济阳拗陷沙四段页岩油的主力产层为纹层状富碳酸盐页岩。总之,良好的源-储耦合特性可促进页岩生烃、储集、渗透和可压裂性能。

值得注意的是,热演化程度和排烃效率是影响源-储配置关系的核心因素,而源-储配置特征则进一步控制页岩油气富集。在页岩成熟阶段早—中期,优质烃源岩的排油效率可达50%以上;在成熟阶段中—晚期,排油量达到高峰;在高成熟阶段,排出的凝析油或轻质油量均随成熟度增加逐渐降低,生/排烃气均随成熟度增加而逐渐增加,气也逐渐变干,残碳沥青逐渐增加^[55];在过成熟阶段,生成/排出的凝析油气量均很低,并随成熟度增加而逐渐接近于零,但排出凝析气的效率均很高,几乎均为干气^[55]。结合源-储配置关系,在页岩的中—晚期成熟阶段,排油效率较高,油经过米

级运移后可富集到优质储层中,从而形成高产源-储分离型页岩油,而几乎未发生大尺度运移的部分则形成源-储一体型页岩油。松辽盆地古龙页岩油就是页岩在中—晚期阶段富集凝析油后形成的典型源-储一体型页岩油。油运移到近源优质储层中,会形成源-储共生型页岩油。结合源-储耦合配置关系,在页岩高过成熟阶段,排出的凝析油或轻质油量均随成熟度增加而逐渐降低,生/排烃均随成熟度的增加而逐渐增加。当气体运移到米级以上优质储层中时,会形成源-储分离型页岩气藏;当气体在层内发生微运移时,会形成源-储一体型页岩气藏;当气运移到近源优质储层中,会形成源-储共生型页岩气藏。

4 对油气勘探的指导意义

不同页岩油气的主力产层段因其源-储配置关系不同,分属于不同的源-储耦合类型,而无论哪种源-储耦合类型,都具有油气富集高产潜力,在横向上不存在可对比性。近年来,中国页岩油气勘探实践表明,同一页岩油气层系,由于在纵向上有埋深和沉积相带的变化,烃源岩成熟度、储层物性和生/排烃能力存在差异,导致同一地区发育多种页岩油气源-储耦合类型^[7-9,11-14,25-28]。值得注意的是,页岩气和页岩油的评价标准不一样,需要根据侧重点提炼影响勘探的最关键参数。因此,基于不同类型页岩油气的源-储耦合特征及其在不同热演化阶段的控油气富集作用,提出了中国页岩油气高效勘探建议。

对于中—低成熟页岩层系,源-储共生型层段为最有利层段。中—低成熟热演化阶段的排烃效率相对较低,生烃母质大量生油,原油运移至邻近的优质储层中,形成优质的源-储共生型页岩油。在渤海湾盆地济阳拗陷古近系沙河街组,页岩油的富集高产层段可以是富有机质纹层与富碳酸盐纹层形成的微观源-储组合,也可以是富有机质页岩与粉砂型页岩岩相的宏观源-储组合。碳酸盐纹层和粉砂岩纹层既有利于液态烃渗流又有利于压后破碎形成缝网,从而沟通更多的储集空间。这是由于差异化纹层结构不仅优化了矿物排列,而且有机-无机相互作用还改良了孔隙结构,提高了层间裂缝的发育程度^[23]。以富有机质纹层与富碳酸盐纹层形成的微观源-储组合为例:前者与后者呈韵律互层、相互叠置;前者为咸化湖盆沉积,具有早生烃、早富集以及在中等演化程度下即可大量生烃的成烃特色,而后者具有无机质孔缝并存、大孔优势的成储规律,这使得富有机质泥页岩的成烃、成储条件在空间上形成有效配置,有利于页岩油富集^[15,26]。

对于中—高成熟页岩层系,源-储分离型层段为最

有利层段,源-储一体型层段次之,若研究区裂缝发育,则常规-非常规一体勘探更有利于提高效率。在中—高成熟热演化阶段,页岩具有更高的生烃能力,大量生油的同时,排烃效率更高,不仅能够形成源-储一体型页岩油,而且由于高品质轻质油发生了米级运移,因而能够形成富集高产潜力更大的源-储分离型页岩油。在鄂尔多斯盆地长 7 段,上覆长 7 段 1 亚段+2 亚段为页岩油最有利层段,源-储配置为源-储分离型,其中,液态烃来自长 7 段 3 亚段,该段富集大量干酪根,具有较强的液态烃吸附能力。前人的研究表明,长 7 段 3 亚段中仍有 40% 的滞留烃,主要赋存在储集性较好的基质孔隙—页理缝的孔缝网络中^[36]。长 7 段 3 亚段具有一定的超压现象,在具有较高有机质的同时也具有较高的含油性,因此,下部源-储一体型页岩油为较有利勘探层段,未来也可动用。此外,当高角度裂缝发育时,含油气层系的上部会形成常规油气藏。例如,在准噶尔盆地二叠系风城组勘探中取得了常规油—致密油—页岩油有序成藏的全油气系统^[21]的认识,其中,风城组中构造发育的裂缝带或溶蚀孔发育带具有良好的油气显示,形成了常规油气藏,而页岩油具有“生烃增压、微缝输导、源生邻储”特征。目前,准噶尔盆地风城组已获得常规-非常规油气藏突破,因此针对这类型油气藏,可进一步拓展思路,挖掘常规-非常规一体化勘探潜力。

对于高成熟—过成熟页岩层系,在顶、底板条件良好的前提下,层系整体含油气,适用于多层系立体勘探开发。高成熟—过成熟演化阶段以生气为主,页岩的生烃效率达到最高,且气态烃的运移效率远远高于液态烃。在顶、底板条件良好时,高排烃效率使得大量优质烃类在整个层系中运移富集,并受高 TOC 含量、高热演化程度、地层超压以及物性甜点协同控制,形成优质的源-储一体型页岩油气。在四川盆地五峰组—龙马溪组,高自然伽马页岩层段中生物硅质和浮游藻类共生,硅质生物骨屑的成岩多孔性有利于藻类所生成烃类的原位滞留和后期裂解,有机质孔大量发育与保存,同时强顶、底板封堵与较弱的后期构造运动共同控制了页岩气的富集^[18,47]。微观上,有机质与有机/无机孔隙具有良好的源-储耦合特征。有机质与有机质孔具有成因联系,且在微米—纳米空间范围内两者是一体的,表现出优越的源-储一体耦合特征。在四川盆地五峰组—龙马溪组页岩的建产区,较高的耦合系数指示页岩气的富集程度高,单井产量高^[11],立体勘探开发是页岩气高效动用的关键。

当面对同一地区、同一层系中存在多种页岩油气源-储耦合类型时,研究者可基于笔者提出的理论认

识,快速厘清哪种类型是最有利层段、较有利层段和相对有利层段,这对于开展整体评价、分清勘探层次、明确不同阶段勘探目标意义重大。

5 结 论

(1) 中国页岩油气的源-储耦合类型可分为源-储分离型、源-储共生型和源-储一体型。三者之间的差异为烃类运移距离。烃类运移距离在米以上,为源-储分离型;烃类就近运移至优势储层内,为源-储共生型;层内发生微运移,为源-储一体型。源-储分离型的代表性层系包括四川盆地寒武统筇竹寺组、鄂尔多斯三叠系长 7 段 1 亚段+2 亚段和准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组;源-储共生型的代表性层系为四川盆地二叠系吴二段、四川盆地侏罗系凉高山组和渤海湾盆地济阳拗陷古近系沙四段;源-储一体型的代表性层系有四川盆地五峰组—龙马溪组和松辽盆地青山口组。

(2) 不同源-储耦合类型控制油气富集的微观机理分析进一步揭示:源-储分离型强调有机质生烃和以无机质孔作为有利储集空间,同时刚性纹层有利于储层改造;源-储一体型强调有机生物和生物成因硅在源-储耦合关系中起到关键作用,有利于大量成烃、成孔和抗压保孔;源-储共生型处于二者之间。热演化程度对页岩油气的源-储耦合配置关系具有关键影响,通过控制生/排烃效率影响源-储配置关系,进而决定页岩油气富集高产层段的空间分布。

(3) 页岩油气源-储配置的类型划分和综合评价对页岩油气纵向勘探潜力整体评价和有利层段快速识别优选具有重要意义。对于中—低成熟页岩层系,页岩的生/排烃效率较低,源-储共生型的含油气层段为最有利勘探层段,如济阳拗陷页岩油;对于中—高成熟页岩层系,页岩的生/排烃效率较高,源-储分离型的含油气层段为最有利层段,源-储一体型次之,如鄂尔多斯盆地长 7 段 1 亚段+2 亚段和长 7 段 3 亚段;对于高成熟—过成熟页岩层系,页岩进入生气阶段,其生/排烃效率最高,当顶、底板条件优越时,层系整体含气,立体勘探开发有利于实现整体动用,典型代表为四川盆地五峰组—龙马溪组。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 宋岩,李卓,姜振学,等. 非常规油气地质研究进展与发展趋势

- [J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 638-648.
- SONG Yan, LI Zhuo, JIANG Zhenxue, et al. Progress and development trend of unconventional oil and gas geological research[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(4): 638-648.
- [3] 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.
- [4] 杨光庆. 吉木萨尔凹陷页岩油的源储结构特征和成藏机理[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- YANG Guangqing. The source-reservoir assemblage of shale oil in Jimusar Sag and its charging mechanism[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2022.
- [5] 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.
- [6] 张春雨, 陈世加, 朱星丞, 等. 源-储间隔夹层的分类、特征及其对陆相致密储层油气富集的控制作用[J]. 石油学报, 2024, 45(2): 358-373.
- ZHANG Chunyu, CHEN Shijia, ZHU Xingcheng, et al. Classification and characteristics of source-reservoir interlayer and its controlling effect on oil-gas enrichment in continental tight reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(2): 358-373.
- [7] 金之钧, 王冠平, 刘光祥, 等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. 石油学报, 2021, 42(7): 821-835.
- JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(7): 821-835.
- [8] 胡宗全, 杜伟, 彭勇民, 等. 页岩微观孔隙特征及源-储关系——以川东南地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 1001-1008.
- HU Zongquan, DU Wei, PENG Yongmin, et al. Microscopic pore characteristics and the source-reservoir relationship of shale—A case study from the Wufeng and Longmaxi Formations in Southeast Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 1001-1008.
- [9] 朱彤, 胡宗全, 刘忠宝, 等. 四川盆地湖相页岩气源-储配置类型及评价[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1146-1153.
- ZHU Tong, HU Zongquan, LIU Zhongbao, et al. Types and evaluation of the source-reservoir configuration of lacustrine shale gas in the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6): 1146-1153.
- [10] 郭旭升. 涪陵页岩气田焦石坝区块富集机理与勘探技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- GUO Xusheng. Enrichment mechanism and exploration technology of Jiaoshiba area in Fuling shale gas field[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [11] 胡宗全, 杜伟, 刘忠宝. 页岩气源储耦合机理及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- HU Zongquan, DU Wei, LIU Zhongbao. Source reservoir coupling mechanism of shale gas and its application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.
- [12] 刘忠宝, 李倩文, 刘光祥, 等. 川北地区大安寨段页岩油气源、储特征及富集层段优选[J]. 地质学报, 2023, 97(10): 3421-3437.
- LIU Zhongbao, LI Qianwen, LIU Guangxiang, et al. Source and reservoir characteristics as well as optimization of favorable shale oil and gas enrichment intervals of the Da'anzhai Member in northern Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(10): 3421-3437.
- [13] 胡宗全, 王濡岳, 刘忠宝, 等. 四川盆地侏罗统陆相页岩气源储特征及耦合评价[J]. 地质前缘, 2021, 28(1): 261-272.
- HU Zongquan, WANG Ruyue, LIU Zhongbao, et al. Source-reservoir characteristics and coupling evaluations for the Lower Jurassic lacustrine shale gas reservoir in the Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 261-272.
- [14] 胡宗全, 王濡岳, 路菁, 等. 陆相页岩及其夹层储集特征对比与差异演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1393-1404.
- HU Zongquan, WANG Ruyue, LU Jing, et al. Storage characteristic comparison of pores between lacustrine shales and their interbeds and differential evolutionary patterns[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1393-1404.
- [15] 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1333-1349.
- GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1333-1349.
- [16] WANG Guanping, JIN Zhijun, ZHANG Qiang, et al. Effects of clay minerals and organic matter on pore evolution of the early mature lacustrine shale in the Ordos Basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 246: 105516.
- [17] JIN Zhijun, NIE Haikuan, LIU Quanyou, et al. Coevolutionary dynamics of organic-inorganic interactions, hydrocarbon generation, and shale gas reservoir preservation: a case study from the Upper Ordovician Wufeng and Lower Silurian Longmaxi formations, Fuling shale gas field, eastern Sichuan Basin[J]. *Geofluids*, 2020, 2020: 6672386.
- [18] 郭旭升, 李宇平, 腾格尔, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组深水陆棚相页岩生储机理探讨[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 193-201.
- GUO Xusheng, LI Yuping, BORJIGEN Tenger, et al. Hydrocarbon generation and storage mechanisms of deep-water shelf shales of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 193-201.
- [19] 郭旭升, 魏志红, 魏祥峰, 等. 四川盆地侏罗系陆相页岩油气富集条件及勘探方向[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 14-27.
- GUO Xusheng, WEI Zhihong, WEI Xiangfeng, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Jurassic continental shale oil and gas in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 14-27.
- [20] 金之钧, 张金川, 唐玄. 非常规天然气成藏体系[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 58-68.
- JIN Zhijun, ZHANG Jinchuan, TANG Xuan. Unconventional natural gas accumulation system[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 58-68.
- [21] 唐勇, 何文军, 姜懿洋, 等. 准噶尔盆地二叠系威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.
- [22] 祝海华, 朱光仪, 章海燕, 等. 川东北下侏罗统大安寨段岩相特征

- 及页岩油源储评价——以铁山金窝及梁平福禄镇剖面为例[J/OL]. 沉积学报. (2023-09-18). <http://www.cjxb.ac.cn/cn/article/doi/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.063>.
- ZHU Haihua, ZHU Guangyi, ZHANG Haiyan, et al. Lithofacies characteristics and evaluation of shale oil source and reservoir in Da'anzhai member of Lower Jurassic in northeast Sichuan; case study from section of Tieshan Jinwo and Liangping Fuluzhen[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica. (2023-09-18). <http://www.cjxb.ac.cn/cn/article/doi/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.063>.
- [23] 张培先, 聂海宽, 何希鹏, 等. 渝东南地区古生界天然气成藏体系及立体勘探[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 206-222.
- ZHANG Peixian, NIE Haikuan, HE Xipeng, et al. Paleozoic gas accumulation system and stereoscopic exploration in southeastern Chongqing[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 206-222.
- [24] 王香增, 乔向阳, 张磊, 等. 鄂尔多斯盆地东南部致密砂岩气勘探开发关键技术创新及规模实践[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 102-113.
- WANG Xiangzeng, QIAO Xiangyang, ZHANG Lei, et al. Innovation and scale practice of key technologies for the exploration and development of tight sandstone gas reservoirs in Yan'an gas field of southeastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 102-113.
- [25] 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.
- [26] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳拗陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 225-235.
- SONG Mingshui, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 225-235.
- [27] 王小军, 崔宝文, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩微-纳米孔隙油气原位形成与富集机制[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1105-1115.
- WANG Xiaojun, CUI Baowen, FENG Zihui, et al. In-situ hydrocarbon formation and accumulation mechanisms of micro- and nano-scale pore-fracture in Gulong shale, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1105-1115.
- [28] 刘忠宝, 胡宗全, 刘光祥, 等. 陆相页岩源-储耦合特征及发育模式——以四川盆地侏罗系自流井组为例[J]. 海相油气地质, 2022, 27(3): 271-280.
- LIU Zhongbao, HU Zongquan, LIU Guangxiang, et al. Source-reservoir coupling characteristics and development model of continental shale; taking the Jurassic Ziliujing Formation in Sichuan Basin as an example[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2022, 27(3): 271-280.
- [29] 高波, 刘忠宝, 舒志国, 等. 中上扬子地区下寒武统页岩气储层特征及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 284-294.
- GAO Bo, LIU Zhongbao, SHU Zhiguo, et al. Reservoir characteristics and exploration of the Lower Cambrian shale gas in the Middle-Upper Yangtze area[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 284-294.
- [30] 梁峰, 姜巍, 戴赞, 等. 四川盆地威远—资阳地区筇竹寺组页岩气富集规律及勘探开发潜力[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(2): 755-763.
- LIANG Feng, JIANG Wei, DAI Yun, et al. Enrichment law and resource potential of shale gas of Qiongzhusi Formation in Weiyuan-Ziyang areas, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(2): 755-763.
- [31] 赵文智, 朱如凯, 胡素云, 等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1079-1089.
- ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, HU Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1079-1089.
- [32] WANG Guanping, JIN Zhijun, LIU Guangxiang, et al. Pore system of the multiple lithofacies reservoirs in unconventional lacustrine shale oil Formation[J]. International Journal of Coal Geology, 2023, 273: 104270.
- [33] 王香增. 鄂尔多斯盆地延长探区低渗致密油气成藏理论进展及勘探实践[J]. 地质前缘, 2023, 30(1): 143-155.
- WANG Xiangzeng. Low permeability tight oil and gas in Yanchang area, Ordos Basin; advances in accumulation theory and exploration practice[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 143-155.
- [34] 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.
- [35] WANG Guanping, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Geological controls on the pore system of lacustrine unconventional shale reservoirs; the Triassic Chang 7 member in the Ordos Basin, China[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 221: 111139.
- [36] 赵文智, 卞从胜, 李永新, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 73 亚段页岩有机质转化率、排烃效率与页岩油主富集类型[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 12-23.
- ZHAO Wenzhi, BIAN Congsheng, LI Yongxin, et al. Organic matter transformation ratio, hydrocarbon expulsion efficiency and shale oil enrichment type in Chang 73 shale of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 12-23.
- [37] 潘松圻, 郭秋雷, 邹才能, 等. 页岩型与粉砂岩型“页岩油系统”甜点段判识——以鄂尔多斯盆地长 7 段为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(7): 1663-1678.
- PAN Songqi, GUO Qiulei, ZOU Caineng, et al. Identification of sweet spots in shale-type and siltstone-type “shale oil systems”: a case study of the Chang 7 Member in Ordos Basin[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(7): 1647-1663.
- [38] WEI Ren, ZHANG Rui, LI Mingsong, et al. Obliquity forcing of lake-level changes and organic carbon burial during the Late Paleozoic Ice Age[J]. Global and Planetary Change, 2023, 223: 104092.
- [39] 郑爱维, 孟志勇, 李凯, 等. 川东红星地区二叠系吴家坪组页岩储层纵向非均质性特征及其发育主控因素[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(9): 1500-1514.
- ZHENG Aiwei, MENG Zhiyong, LI Kai, et al. Vertical heterogeneity characteristics and main controlling factors of the Permian Wujiaping Formation shale reservoir in Hongxing area, eastern Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(9): 1500-1514.
- [40] 包汉勇, 赵帅, 梁榜, 等. 川东红星地区二叠系吴家坪组页岩气富集

- 高产主控因素与勘探启示[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 71-82.
- BAO Hanyong, ZHAO Shuai, LIANG Bang, et al. Enrichment and high yield of shale gas in the Permian Wujiaping Formation in Hongxing area of eastern Sichuan and its exploration implications[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 71-82.
- [41] 王鹏威, 刘忠宝, 张殿伟, 等. 四川盆地复兴地区中侏罗统凉高山组页岩油富集条件及勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(7): 1237-1246.
- WANG Pengwei, LIU Zhongbao, ZHANG Dianwei, et al. Shale oil enrichment conditions and exploration potential of Middle Jurassic Lianggaoshan Formation in Fuxing area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(7): 1237-1246.
- [42] 何文渊, 何海清, 王玉华, 等. 川东北地区平安 1 井侏罗系凉高山组页岩油重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 40-49.
- HE Wenyuan, HE Haiqing, WANG Yuhua, et al. Major breakthrough and significance of shale oil of the Jurassic Lianggaoshan Formation in Well Ping'an 1 in northeastern Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 40-49.
- [43] 刘惠民, 李军亮, 刘鹏, 等. 济阳坳陷古近系页岩油富集条件与勘探战略方向[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1717-1729.
- LIU Huimin, LI Junliang, LIU Peng, et al. Enrichment conditions and strategic exploration direction of Paleogene shale oil in Jiyang depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1717-1729.
- [44] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 湖相页岩滞留烃形成条件与富集模式——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 856-869.
- ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Formation conditions and enrichment model of retained petroleum in lacustrine shale: a case study of the Paleogene in Huanghua depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 856-869.
- [45] WANG Guanping, JIN Zhijun, HU Zongquan, et al. Sedimentary evolution characteristics of fine-grained lithofacies under the high-resolution isochronous shelf system: insights from the Wufeng-Longmaxi shales in the Sichuan Basin [J]. Lithosphere, 2021, 2021 (S1): 6628867.
- [46] 王濡岳, 胡宗全, 龙胜祥, 等. 四川盆地上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 353-364.
- WANG Ruyue, HU Zongquan, LONG Shengxiang, et al. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 353-364.
- [47] 郭旭升, 赵永强, 申宝剑, 等. 中国南方海相页岩气勘探理论: 回顾与展望[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 172-182.
- GUO Xusheng, ZHAO Yongqiang, SHEN Baojian, et al. Marine shale gas exploration theory in southern China: review and prospects [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 172-182.
- [48] 王冠平, 朱彤, 王红亮, 等. 海相页岩综合层序地层划分及垂向分布特征——以川东南地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 沉积学报, 2019, 37(2): 330-344.
- WANG Guanping, ZHU Tong, WANG Hongliang, et al. Integrated sequence stratigraphic division and vertical distribution characteristics of marine shale: a case study of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in southeastern Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(2): 330-344.
- [49] 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.
- [50] 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.
- ZHANG Shuichang, ZHANG Bin, WANG Xiaomei, et al. Gulong shale oil enrichment mechanism and orderly distribution of conventional-unconventional oils in the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 911-923.
- [51] 孙龙德, 崔宝文, 朱如凯, 等. 古龙页岩油富集因素评价与生产规律研究[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 441-454.
- SUN Longde, CUI Baowen, ZHU Rukai, et al. Shale oil enrichment evaluation and production law in Gulong sag, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 441-454.
- [52] 柳波, 孙嘉慧, 张永清, 等. 松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段页岩油储集空间类型与富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 521-535.
- LIU Bo, SUN Jiahui, ZHANG Yongqing, et al. Reservoir space and enrichment model of shale oil in the first Member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling sag, southern Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 521-535.
- [53] 付锁堂, 金之钧, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 561-569.
- FU Suotang, JIN Zhijun, FU Jinhua, et al. Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the Member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(5): 561-569.
- [54] 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 1-13.
- SUN Longde, ZHAO Wenzhi, LIU He, et al. Concept and application of “sweet spot” in shale oil [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 1-13.
- [55] 秦建中, 申宝剑, 腾格尔, 等. 不同类型优质烃源岩生排油气模式[J]. 石油实验地质, 2013, 35(2): 179-186.
- QIN Jianzhong, SHEN Baojian, TENGGER, et al. Hydrocarbon generation and expulsion pattern of different types of excellent source rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(2): 179-186.

(收稿日期 2024-02-28 改回日期 2024-07-17 编辑 雷永良)