

中国陆相页岩油勘探理论与技术进展

赵文智¹, 朱如凯^{1,2*}, 刘伟^{1,3}, 白斌¹, 吴松涛^{1,2}, 卞从胜^{1,3}, 张婧雅¹, 刘畅¹, 李永新^{1,3}, 卢明辉¹, 刘忠华¹, 董劲^{1,3}

1 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2 中国石油油气储层重点实验室, 北京 100083

3 中国石油勘探开发研究院赵文智院士工作室, 北京 100083

* 通信作者, zrk@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-05-28

国家自然科学基金项目(U22B6004)、国家自然科学基金重大项目(42090020) 联合资助

摘要 陆相页岩油是一个全新领域, 近期的勘探实践已在鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地等不同页岩层系取得了重要进展, 截止 2022 年底, 页岩油探明、控制、预测三级地质储量达 44 亿 t, 2022 年产量达 318 万 t。页岩油勘探理论和技术也取得了一系列进展, 创新了有机母质类型分析与有机质生排烃实验、储层表征技术、页岩油赋存状态与含油性分析、保压取心与现场测试等页岩实验测试分析技术, 基本上能满足页岩油相关实验测试要求; 在细粒沉积与有机质富集机理、陆相页岩纹层结构与组合类型、储层孔缝结构与储集性、页岩油富集机理取得了一系列新的认识, 指导了重点地区选区选带评价研究。研发了烃源岩品质测井评价、储层品质测井评价、工程品质测井评价、岩石物理敏感参数分析和定量预测、多任务学习储层参数预测、各向异性地应力预测、水平井地震地质导向评价、富集层(甜点)综合评价等技术, 并推广应用, 在页岩油储量提交、甜点区优选、水平井部署、随钻导向预警和钻完井工程改造方面提供了重要且面向全周期的技术支撑。但陆相页岩油规模勘探与效益开发目前还面临诸多挑战, 必须建立全新的研究内容与研究重点, 特别需要把研究精度升级并要加强微观研究, 加强固/液/气多相多场耦合流动机理研究, 加强多学科交叉研究等, 以建立页岩油成藏新学科。

关键词 陆相页岩油; 生排烃效率; 储层表征; 含油性; 富集机理

Advances in theory and technology of non-marine shale oil exploration in China

ZHAO Wenzhi¹, ZHU Rukai^{1,2}, LIU Wei^{1,3}, BAI Bin¹, WU Songtao^{1,2}, BIAN Congsheng^{1,3}, ZHANG Jingya¹, LIU Chang¹, LI Yongxin^{1,3}, LU Minghui¹, LIU Zhonghua¹, DONG Jin^{1,3}

1 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Petroleum and Gas Reservoirs, PetroChina, Beijing 100083, China

3 Zhao Wenzhi Academician's work station, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

引用格式: 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 白斌, 吴松涛, 卞从胜, 张婧雅, 刘畅, 李永新, 卢明辉, 刘忠华, 董劲. 中国陆相页岩油勘探理论与技术进展. 石油科学通报, 2023, 04: 373-390
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, LIU Wei, BAI Bin, WU Songtao, BIAN Congsheng, ZHANG Jingya, LIU Chang, LI Yongxin, LU Minghui, LIU Zhonghua, DONG Jin. Advances in theory and technology of non-marine shale oil exploration in China. Petroleum Science Bulletin, 2023, 04: 373-390. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.029

Abstract Non-marine shale oil is a new frontier. Recent exploration practices have made significant progress in different shale formations including in the Ordos Basin, Songliao Basin, Bohai Bay Basin, Junggar Basin, and Qaidam Basin. At the end of 2022, the geological reserves of shale oil, including the proven, controlled, and predicted reserves, reached 44×10^8 t, and the production in 2022 was 318×10^4 t. The exploration theory and technology of shale oil have also made a series of advances, such as innovating shale experimental testing and analysis technologies including organic matter type analysis and organic matter generation and expulsion experiments, reservoir characterization technology, shale oil occurrence state and oil content analysis, and pressure maintaining coring and on-site testing. These technologies can basically meet the requirements of shale oil related experimental testing. A series of new understandings has been obtained in the aspects of fine-grained sedimentation and organic matter enrichment mechanisms, terrestrial shale laminated structure and combination types, pore and fracture structure and storage capacity in reservoirs, and shale oil enrichment mechanisms, which guided the research on evaluation of selected areas and zones in the key areas of shale oil. Technologies such as logging evaluation of hydrocarbon source rock quality, reservoir quality, and engineering quality, analysis and quantitative prediction of rock physical sensitive parameters, multi-task learning of reservoir parameter prediction, anisotropic stress prediction, seismic geological orientation evaluation of horizontal wells, and comprehensive evaluation of enrichment layers ("sweet spots") have been developed and promoted. This provides important and all-cycle technical support for shale oil reserves submission, sweet spot area selection, horizontal well deployment, and directional drilling warning and engineering retrofit after drilling completion. However, large-scale exploration and efficient development of non-marine shale oil still face many challenges. It is necessary to establish new research content and priorities, especially to upgrade research precision and strengthen microscopic research, solid/liquid/gas multiphase and multi-field coupling flow mechanism research, and interdisciplinary research, in order to establish a new discipline of shale oil accumulation.

Keywords non-marine shale oil; hydrocarbon generation and expulsion efficiency; reservoir characterization; oil-bearing property; enrichment mechanism

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.029

0 引言

历经六十余年持续攻关探索,美国海相页岩油勘探开发在本世纪初实现了跨越式发展,自2000年至2022年,美国页岩油总产量达32亿t,在原油产量中占比从2009年的11.8%增长至2022年的70%,页岩油已成为美国最重要的支柱能源^[1],实现了由能源净进口国向能源净出口国的重大转变,大大改变了全球能源供给版图和地缘政治格局。

借鉴北美海相页岩油勘探开发的成功经验,我国学界和勘探界对陆相页岩油的资源潜力与勘探地位越来越高度重视,国内各大石油公司围绕陆相页岩油从突破出油关、获得工业产量与在现有技术和成本条件下实现效益开发等关键问题,已开展了较多探索和实践,相继在准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组、渤海湾盆地黄骅坳陷沧东凹陷古近系孔店组二段、松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一、二段与济阳坳陷博兴、牛庄和渤南等凹陷的第三系沙河街组三、四段等陆相富有机质页岩层系获得一批重要突破,展示了陆相页岩油良好的发展前景^[2-7]。截止2022年底,中国陆相页岩油已探明地质储量13.06亿t,控制储量1.28亿t,预测储量29.74亿t。2022年陆相页岩油生产原油约318万t,陆相页岩油已成为我国原油稳产的重要支撑。

陆相页岩油是一个全新领域,国内众多学者从细粒沉积岩有机质富集机理、储集空间类型与储集性、纹层类型及组合关系、裂缝类型及发育机制、页岩油赋存状态与含油性、页岩油资源评价、页岩油形成条件与富集主控因素、页岩油流动机理、甜点段/区评价等相关基础研究工作,形成了多项理论认识与技术创新成果^[2,8],有力支撑了页岩油选区评价与勘探开发部署。但大部分研究成果均基于地区性资料的分析总结,特别是我国陆相盆地发育淡水、咸化、碱湖等不同沉积盆地类型,物源输入与火山活动、盆底热液作用发育程度差异大,沉积非均质性强,黏土矿物含量高;同时由于不同盆地热演化史差异大,导致我国陆相页岩油总体成熟度偏低,原油黏度大,流动性较差,规模勘探与效益开发仍面临诸多难题。本文从页岩实验分析技术、页岩油形成与分布及地球物理评价技术等方面总结了近年来相关研究进展,在此基础上,提出了相应的研究建议,以期对推动我国陆相页岩油勘探开发有借鉴意义。

1 实验分析技术进展

1.1 有机母质类型分析与有机质生排烃实验

页岩中有机质是形成油气的物质基础,其中,母质类型决定了有机质向油气转化的方向。有机母质

类型可以由通过干酪根和可溶有机质的组成特征来反映,干酪根元素分析、有机显微组分鉴定、岩石热解(Rock-Eval)分析、可溶有机质有机地球化学分析是常用的有机质类型鉴别方法,如对成熟度较低的烃源岩而言,氢指数HI能较好地反映有机质生烃能力的高低,可作为良好的有机质类型判识指标,HI-T_{max}、HI-OI图版^[9]都是评价有机质类型的有力工具。陆相湖盆富有机质页岩主要形成于半深湖-深湖环境,水生生物是有机母质主要来源,因而陆相页岩有机质主要是I型和II₁型,即主要以倾油型母质为主^[10],少量为II₂型。总体上,有机质类型与有机质丰度正相关,低有机质丰度泥岩主要发育于浅-半深湖环境,陆源有机质输入较多,以II₂和III型干酪根为主;高有机质丰度页岩多形成于半深-深湖环境,有机质以I型和II₁型为主。不同湖泊环境形成的原始母质类型和结构有所差异,有机质生烃难易度与转化烃的数量也不同,淡水湖相烃源岩以II₁型为主,含少量I型和II₂型;而咸化湖相烃源岩则以I型和II₁型为主,HI值最高可达800 mg/g(HC/TOC)以上,表现出极高的生烃潜力^[2]。沉积有机物质主要以颗粒成分的形式存在于沉积岩中,可用显微镜进行鉴别,这是确定成烃原始母质和烃源岩有机质类型最直观的方法^[11-12]。藻类体、无定形体(又称沥青质体)和类脂碎屑体是页岩中常见的生油型组分^[13-14],如松辽盆地青一段、青二段沉积期浮游藻类勃发,有机质以层状藻类体为主,有机质类型主要为I型;三塘湖盆地二叠系芦苇沟组咸化湖盆烃源岩显微组分主要由以藻类和小孢子体为主的腐泥组组成,

母质类型为I-II₁型^[15]。泌阳凹陷核桃园组页岩中也发现I型有机质相比II₁型有机质具有更丰富的藻类生源^[16]。烃源岩中可溶有机质也可以反映有机母质的特征,常用氯仿沥青“A”经色层分析获得的族组分组成与饱和烃生物标志化合物来表征,如长7段烃源岩具有伽马蜡烷、三环萜烷、升藿烷尤其是C₃₄-C₃₅藿烷等含量低,而藿烷、重排藿烷、重排甾烷含量高等淡水环境有机质生物标志化合物特征,指示有机质主要来源于水生浮游藻类但经历了强烈的黏土矿物酸性催化作用,形成了II₁型有机质^[2]。

随着热成熟度不同与母质类型的差异,处在不同热成熟状态的有机质产生液态烃与气态烃的比例、烃物质构成与多组分烃物质混相以后所表现出的流动状态会有很大不同,这会直接影响页岩油的单井产量和单井累计产出量,因而,有机质生排烃过程研究便尤为重要,黄金管生烃动力学模拟^[17-18]、开放体系热压生排烃模拟^[19]与半开放体系热压生排烃模拟^[20-21]是近年来常用的模拟方法。实验结果揭示,不同类型页岩生成的烃类组分有较大差异,I型有机质随生烃转化率增大油气比增高的幅度有限,在生油窗阶段几乎一致保持在100 m³/m³以下。II型有机质随转化率增高油气比缓慢增高,在转化率为70%、90%时对应的气油比分别达到200 m³/m³和300 m³/m³。III型有机质则具有更高的油气比,生油窗内即已获得较高的油气比,当转化率为70%、90%时对应的气油比分别达到250 m³/m³和550 m³/m³(图1)。

湖相烃源岩的生烃演化总体符合Tissot等^[22]提出

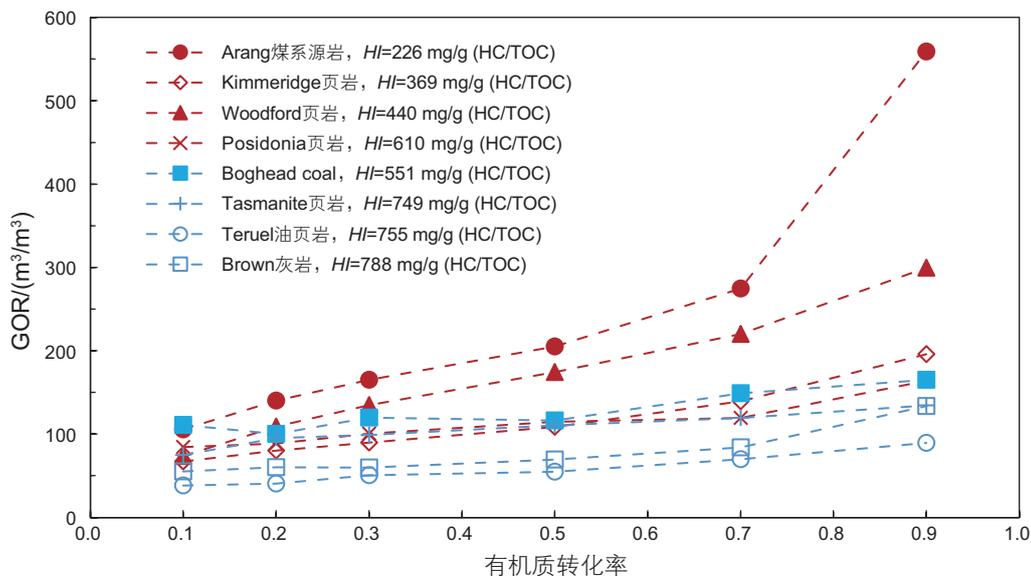


图1 开放体系不同类型页岩形成的气油比与有机质转化率关系^[3]

Fig. 1 Correlation between gas-oil ratio and organic matter conversion of different types of shale in the open system^[3]

的经典生烃模式,然而从页岩油富集成矿的角度来说,依据Tissot模式划分的4个阶段对页岩油的评价尤其是中高熟页岩油评价并不完全适用。赵文智等^[23]综合前人已有成果并结合多年研究,提出不同演化阶段源内滞留烃类型与数量的差异性,分为4个阶段:(1) R_o 小于0.5%为有机质固态分布段,也是油页岩油主分布段。(2) R_o 为0.5%~0.9%时是滞留液态烃、多类沥青物和未转化有机质共存段,也就是中低熟页岩油分布段。该阶段液态烃在页岩中的数量因页岩厚度及与围岩储集(输导)层段的组合关系不同而有较大变化,滞留烃数量最大可达40%~60%,未转化和高分子半固相有机物含量可达40%~80%。(3) R_o 为0.9%~1.6%时是较高相对分子质量液态烃大量裂解形成较低相对分子质量化合物(含天然气)的主要阶段,也就是中高熟页岩油分布段。一般油质较轻,气油比较高。(4) R_o 大于1.6%是液态烃大量裂解和天然气大量生成阶段,是页岩气主分布段。结合中国陆相页岩油勘探开发实践,那些与较高成熟度匹配的探井,页岩油都展示了良好的可动性,如准噶尔盆地二叠系风城组热演化程度高于芦草沟组,原油密度为0.85~0.87 g/cm³,低于芦草沟组的0.90~0.92 g/cm³,黏度也大大降低,流体可动性大为改善。因此,较高热演化程度可以有效改善油品质量,增加气油比,对原油地下流动性有改善作用。由此可见,中高熟页岩油开发主要依靠水平井和体积压裂技术,需要较高的成熟度以保持油质较轻、可动油比例较高。所以, R_o 大于0.9%是个重要门限,以1.0%~1.3%为最佳。

1.2 储层表征技术

微纳米级孔缝系统是页岩油富集的主要空间,其系统表征与精细刻画是实现页岩油有效评价的前提。微纳米级孔缝系统特别是纳米级孔缝系统的发育是非常规储层与常规储层最大的差异。目前微纳米级孔缝系统的研究方法主要包括图像精细表征与流体定量评价两大类,前者根据表征维度可分为二维表征与三维表征,后者主要包括气体吸附、高压压汞、核磁共振与氦气孔隙度等。在二维表征方面,氩离子抛光与场发射扫描电镜联用是目前的主要手段,特别是高精度图像的大面积拼接技术,在解决分辨率的前提下,又可提高表征范围,有效降低非均质性对实验结果的影响^[2,8]。在三维表征方面,微纳米CT、FIB-SEM和同步辐射装置应用较多。微纳米CT和同步辐射通过X射线无损成像,实现了孔隙结构的精细表征;FIB-SEM通过离子束切割与高分辨率成像的完美结合,实

现了孔隙结构的三维成像;与微纳米CT相比,FIB-SEM三维表征分辨率更高,但整体表征范围相对较小(10~20 μm)且对样品具有破坏性。氮气吸附、氦气孔隙度与核磁共振广泛应用于有效储集空间评价,三者评价结果具有较好的一致性;需要说明的是,CO₂吸附与高压压汞在进行页岩油储层孔隙结构评价,特别是评价黏土矿物含量较高、微裂缝易发育样品,需特别注意结果的准确性。

除了静态的孔缝系统精细表征与评价,孔缝系统的演化,特别是有机质孔的演化研究已成为目前页岩油储层孔缝系统研究的重要内容。已有研究可分为两类:(1)选择研究区不同成熟度的页岩样品,通过场发射扫描电镜、CT扫描或氮气吸附分析,研究不同成熟度下页岩孔隙演化差异,寻找主控因素^[24];(2)选择研究区相对低成熟度的样品,通过地质条件约束的高温高压模拟实验,人工熟化获得不同成熟度的样品,进而对比孔隙结构差异并分析主控因素^[25-26]。特别是,伴随技术的进步,从三维到四维表征成为页岩储层孔隙表征技术的重要发展方向。通过对不同演化阶段同一位置、同一孔隙进行连续的场发射扫描电镜与纳米CT成像表征,获得更为精准的孔隙与裂缝对比图像,进而建立孔隙-裂缝随热演化阶段变化的四维模型和孔隙度定量评价数据^[27-28]。相关模型的建立可为预测页岩储集空间演化和优选高成熟度区页岩油“甜点区”提供重要依据。

1.3 页岩油赋存状态与含油性

页岩油的含油性与赋存状态对于研究页岩油赋存机理和可动性具有重要意义,也是页岩油地质资源量评价的关键参数。一般说来,页岩油可分为游离态、吸附态、溶解态和溶胀态^[29],基于目前的技术条件,天然弹性能量开采方式下页岩油产能的主要贡献者为游离油,而吸附-溶解态页岩油相对难以开采,溶胀态页岩油分子被干酪根分子“包围”,最难流动,更是无法开发^[30-32]。因此,页岩油的赋存状态和可动性评价是当前科学研究和生产实践中的一个关键问题。

目前不同学者关于页岩中石油的可动性评价使用了多种方法和手段,基于勘探开发经验提出的含油饱和度指数法(OSI= $S_1/TOC \times 100$)是一种基于石油超越效应从而反映潜在富油层段的经验型地球化学指标^[29],OSI大于100 mg/g(HC/TOC)的层段可以作为页岩层系中具有商业开发潜力的甜点体。但值得注意的是,由于不同盆地有机质丰度、类型、热成熟度、矿物组成和页岩孔隙结构等方面均有一定的差异,故而

OSI的下限值应当灵活选择;此外,当 S_1 和TOC均较低时,OSI也可超过100 mg/g(HC/TOC),但这并不意味着页岩油具有良好的可动性。

核磁共振评价储层流体可流动性常与离心实验相结合,通过页岩岩心离心/驱替前后的核磁共振结果,利用 T_2 谱截止值或 T_1-T_2 谱定量表征可动流体特征^[33-36];也有学者根据实验室测试和标定,将吸附油、游离油和干酪根在核磁共振二维谱上的弛豫时间响应特征区分开来,从而直接计算出不同赋存状态的页岩油含量^[37-38]。

分步热解法是基于不同赋存状态页岩油的不同分子热挥发能力进行页岩油赋存状态的区分^[39]。赋存于裂缝及大孔隙内的游离油相对于矿物、干酪根表面以及微孔隙内壁的吸附油而言分子量更小,从而更容易热释出来。国内外众多学者已经通过设置不同的加热温阶对不同赋存状态的页岩油进行区分和定量^[40-43]。例如,蒋启贵^[40]在常规热解的基础上进行了改进,认为在小于200℃,200~350℃,350~450℃以及450~600℃温度区间分别对应非极性游离态化合物(S_{1-1})、极性游离态化合物(S_{1-2})、重烃和极性较强的胶质沥青质吸附态物质(S_{2-1})以及干酪根热解生烃组分(S_{2-2})。需要注意的是,在岩心保存和样品制备过程中会导致轻烃的大量散失,使得游离油的测定结果偏小。

溶剂分步抽提法是利用不同赋存状态的页岩油的烃类分子极性差异从而对页岩油的赋存状态进行分离。与吸附态页岩油相比,游离态页岩油由于赋存孔径较大,分子极性较弱,相对容易被萃取出来,因此可以采用不同极性溶剂分别对不同粒度的粉末样品进行萃取,获取游离/吸附态页岩油含量^[44]。长期以来,不同学者针对该项研究做了大量工作,目前还没有形成规范的实验标准。由于采取的溶剂组合类型(四氢呋喃/丙酮/甲醇,氯仿,二氯甲烷/甲醇,二氯甲烷,正己烷,盐酸和氢氟酸)、抽提的颗粒粒径(2 cm, 0.5~0.1 cm, 20~40目, 60~80目, 120~150目)以及萃取

方式(超声震荡、冷抽提、索式抽提)均有所差异^[45-46],因此实验结果的对比性较差。

分子动力学模拟法是基于牛顿运动定律构建分子动力学模型,模拟页岩体系内烃类分子的运动,通过对不同状态下系统内部烃类密度、润湿性和吸附特征等性质的计算,有效模拟不同温压条件下页岩油在不同孔缝类型和矿物表面的赋存状态^[47-48]。通过分子动力学模拟,可分析油藏条件下有机质孔缝内烷烃赋存的基本特征,从而探讨页岩油的组分类型、孔隙壁面的性质、温度、孔缝宽度、有机质热成熟度、烷烃碳链长度以及同分异构体对烷烃赋存状态的影响。

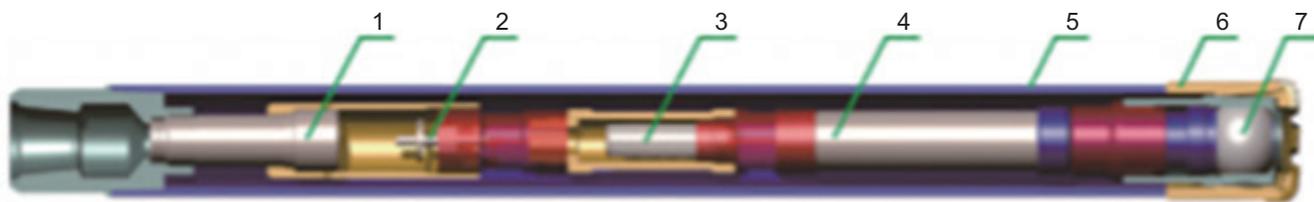
除此之外,毛细凝聚理论法、自由烃差值法、溶胀法、排烃阈值法以及孔隙油饱和度法也较为广泛地应用于不同赋存状态页岩油的定量表征及可动性评价的研究中^[49-50]。

1.4 保压取心与现场测试

通过保压取心技术获取的岩心,只要保压岩心筒没有被打开,就可以始终保持原始地层压力状态,最大限度的减少岩心中油气组分的散失,对于计算页岩油地层条件下压力和油气水含量具有重要作用^[51-53]。

(1) 保压取心原理及参数

以GW-CP194-80A型起钻式保压取心工具为例^[54],其结构如图2所示,工作原理为保压内筒的下端连接球阀密封装置,上部依次连接测量总成、上部密封机构和液压差动总成。取心钻进时,球阀处于打开状态,岩心通过球阀进入保压内筒。钻取完岩心后,差动总成可在液压作用下进行差动,并带动内筒相对外筒做反向抬升运动,在此过程中,上部密封机构和球阀密封装置同时被关闭,完成内筒的保压密封。测量总成可以对内筒中的温度和压力进行连续测量和存储,通过细小的趋势变化可以更加详细地了解岩心样本在起钻过程中油气成分的挥发分解过程。在实现保压的同时,为避免岩心受到钻井液的侵入和污染,获得更准确的原始油水饱和度,会将内筒上部密封机构



1. 液压差动总成 2. 上部密封机构 3. 测量总成 4. 保压内筒总成 5. 内筒 6. 取心钻头 7. 球阀密封装置

图2 GW-CP194-80A型保压取心工具结构图

Fig. 2 Structure diagram of GW-CP194-80A pressure maintaining coring tool

回压阀关闭,在下部采用密闭头将球阀中孔密封,密闭头首先在钻压作用下被顶进内筒,随着后续岩心的进入,密闭液被等体积置换排出,并及时在岩心表面形成保护膜,密闭液可采用蓖麻油或氯化石蜡,具有良好的热稳定性、流动性及附着性能^[55-57]。该装置所取岩心直径为 80 mm,保压能力可达 60 MPa,平均取心收获率为 87.5%,保压成功率达 92.6%。

(2) 保压取心现场测试

在装有处于高压状态岩心的保压取心工具到达地表后,要取出岩心而不会造成岩心中的油气水等发生散失,必须使用-196℃的液氮对未开封的保压内筒进行浸泡,在超低温条件下实现岩心中流体的固化^[58],此时从保压内筒中取出的岩心不会发生油气水的散失。

对此时的岩心进行快速取样,并做好深度标记装入液氮筒中进行保存。针对选好的岩心样品主要进行解析气、密闭破碎热解和核磁测试来准确测定页岩油的原始含油气性。其中解析气主要对 20~30 cm 长的全直径岩心进行测试,测定页岩油中的含气量,并对采出气体的成分进行测定。密闭破碎热解是将 5 g 左右样品置于密闭破碎容器中进行粉碎至 80~100 目,不加热恒定 3 min,测定气态烃(C_1-C_5)含量(S_g),以 50℃升温速率升至 90℃,恒定 5 min,测定轻烃(C_6-C_{10})含量(S_0),再以 50℃升温速率升至 300℃,恒定 12 min,测定($C_{11}-C_{32}$)含量(S_1)。以四川盆地侏罗系自流井组大安寨段页岩油岩心为实验对象,分别进行密闭破碎热解和常规热解,结果显示密闭破碎热解测得的 S_0 比常规热解提高了 1~2 个数量级,极大的恢复了常规方法中没有测到的轻烃资源量,密闭破碎热解测得的 S_1 也要比常规热解的 S_1 略高^[59]。

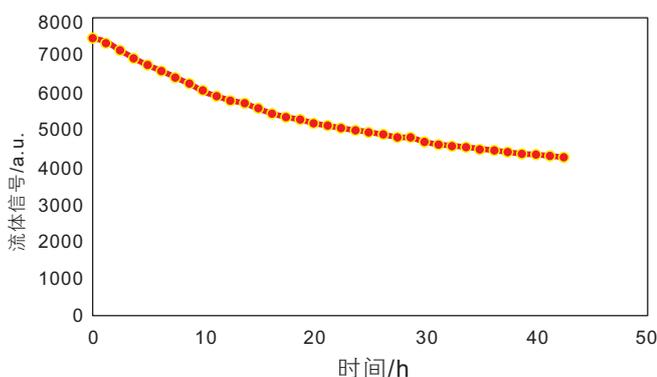
对保压岩心的及时核磁测试也可准确分析页岩油

储层中的烃类分布,以英雄岭下干柴沟组页岩油储层为例,随着放置时间的不断增加,样品总流体信号量自 7457.115 降低至 43 h 后的 4242.722,表明有 43% 的流体发生了散失。从一维核磁曲线上可以看到样品流体信号的主峰不断向小弛豫时间偏移,大弛豫时间的信号量不断减少,表明页岩油中大孔隙在原始地层中含有大量流体,但随着放置时间的增加,大孔中的流体优先发生散失,而小孔中的流体相对散失较弱(图 3)。如果没有现成保压岩心的及时测量而使用放置时间较长的岩心,可能会严重低估页岩油储层中的大孔含油气性,不利于资源评价和后期开发方案的制定。

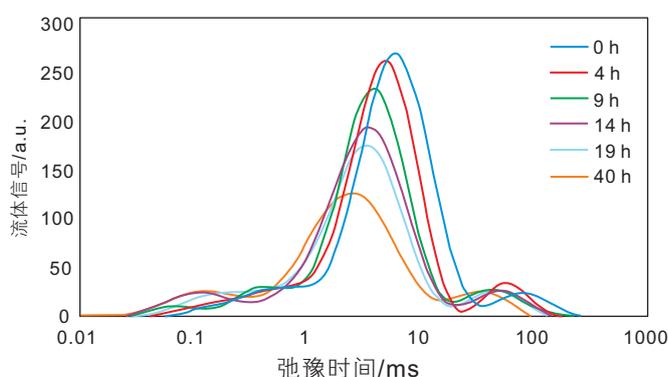
2 页岩油形成与分布研究进展

2.1 细粒沉积与有机质富集机理

细粒沉积物在岩石学上指代粒级小于 62 μm 的颗粒含量大于 50% 的碎屑沉积岩,主要由黏土矿物和粉砂等陆源碎屑颗粒组成,也包含少量湖盆内生碳酸盐、生物(自生)硅质、磷酸盐等颗粒^[60-63]。富有机质细粒沉积岩的形成需要具备两个重要条件:一是生物的高生产力,二是保存条件好。研究发现火山灰和热液注入导致的“施肥效应”与放射性物质促进生物超量超速生长均可导致水体的高生产力。火山灰表面附着有易溶的硫化物和卤化物的薄盐层,热液流体中富含大量 P、Fe、Cu 等营养元素,两者进入水体后,提高了水体中营养物质浓度,有利于生物繁盛^[2]。原始沉积地层中放射性物质的超量赋存导致生物的超量超速生长,在切尔诺贝利和日本福岛核事故现场,都观察到动物和植物的超异常生长,部分真菌类生物可以通过黑色素细胞吸收辐射能并转化为自身利用的化学能^[64]。室内实验也已证明,放射性物质的存在能够促



(a) 流体总信号量随放置时间的变化



(b) 不同放置时间的一维核磁曲线

图 3 英雄岭下干柴沟组页岩油储层样品随地表常温常压放置时间流体信号变化

Fig.3 Fluid signal changes of shale oil reservoir samples from the lower Ganचाigou Formation in Yingxiongling Sag with surface temperature and atmospheric pressure in different storage time

进蓝细菌的超量生长并提高生产力^[65]。以鄂尔多斯长7段为例，露头 and 岩心观察中，发现富有机质层多与凝灰岩伴生，且发现多数富有机质页岩在沉凝灰岩形成之后出现，凝灰岩在一定厚度区间，与上覆TOC呈正相关性，凝灰岩含量为5%~7%时，页岩TOC值最高(超过20%)，因此适量的火山灰沉积，可促进生物勃发和繁盛^[2]。但当凝灰岩厚度继续增加，上覆TOC逐渐下降，这是因为表层水体中火山灰负荷过重会导致有毒金属含量过高，使水体PH值过低，反而会抑制生物生长^[66]。

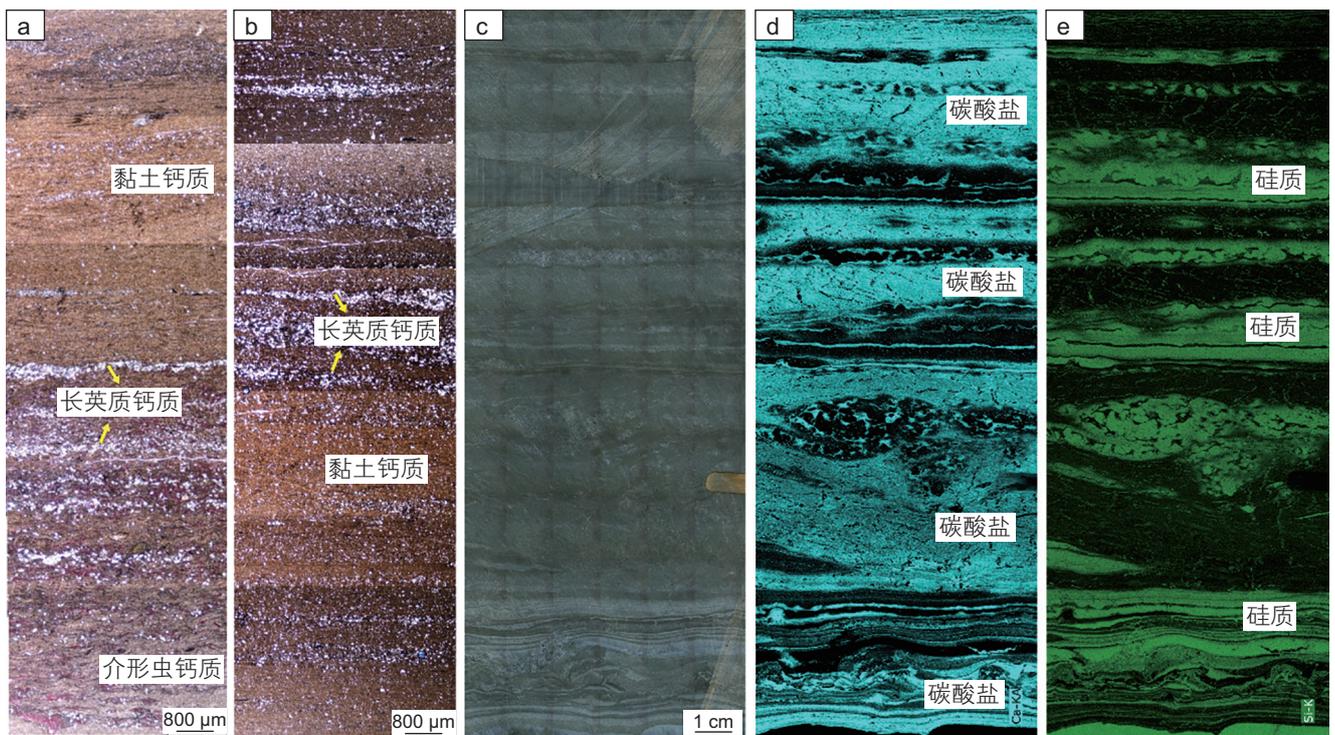
咸化水体、底水缺氧环境与低沉积速率三种条件均有利于有机质保存富集。咸化水体可以促进有机质絮凝，进而提升有机质捕获效率^[67]。海侵作用和咸化湖盆产生水体分层、超高生产力的生物勃发对氧气的消耗、强生物硫还原作用均可导致底水缺氧环境，为沉积有机质提供了良好的保存条件^[2,68]。低沉积速率和低陆源碎屑供给速度，可有效降低有机质稀释作用，进而增强有机质的保存效率^[67]。以准噶尔盆地芦苇沟组为例，其发育于咸化湖盆，物理模拟实验表明，当盐度从1%增加到3%时，有机质捕获效率提高300%；当沉积物浓度从2%上升至4%时，有机质捕获效率提高100%，咸化水体中有机质絮凝是造成有机质富集

的重要因素^[2]。同时咸水湖盆水体在重力作用下形成长久的分层现象，底层水体不与表层发生交换，游离氧在微生物呼吸作用下耗尽，形成了稳定的缺氧环境，准噶尔盆地吉32井下甜点段中高TOC段V/Cr、Mo、(Cu+Mo)/Zn值均较高，说明水体还原性强，保存条件比低TOC段明显要好。

2.2 陆相页岩纹层结构与组合类型

陆相页岩发育典型的纹层结构，目前研究的关注点主要集中在纹层类型划分方案与纹层结构品质评价。纹层类型划分是纹层结构评价的基础，已有的划分方案主要是基于物质成分，多将纹层划分为黏土质纹层，长英质纹层，碳酸盐质纹层，有机质纹层、凝灰质纹层等，在准噶尔盆地风城组还发育特殊的碱性矿物纹层。同时，按照纹层厚度、形态或产状对纹层结构进行划分也是重要的研究方向^[69]。关于不同纹层的品质评价，已有研究更多关注了纹层结构对储集性、含油性和可压性的影响。

不同盆地纹层组合具有差异。例如，在松辽盆地古龙凹陷青山口组，主要发育黏土矿物—长英质—介形虫钙质纹层组合、黏土矿物—长英质纹层组合(图4-a, b)；在准噶尔盆地西北缘风城组，主要发育碳酸



a-b为松辽盆地青山口组，井号GY2HC，长英质页岩，分别发育黏土矿物—长英质—介形虫钙质纹层组合、黏土矿物—长英质纹层组合；c-e系列为准噶尔盆地风城组，井号MY1H，混积岩，主要发育碳酸盐—硅质纹层组合

图4 中国典型陆相页岩油纹层结构图版

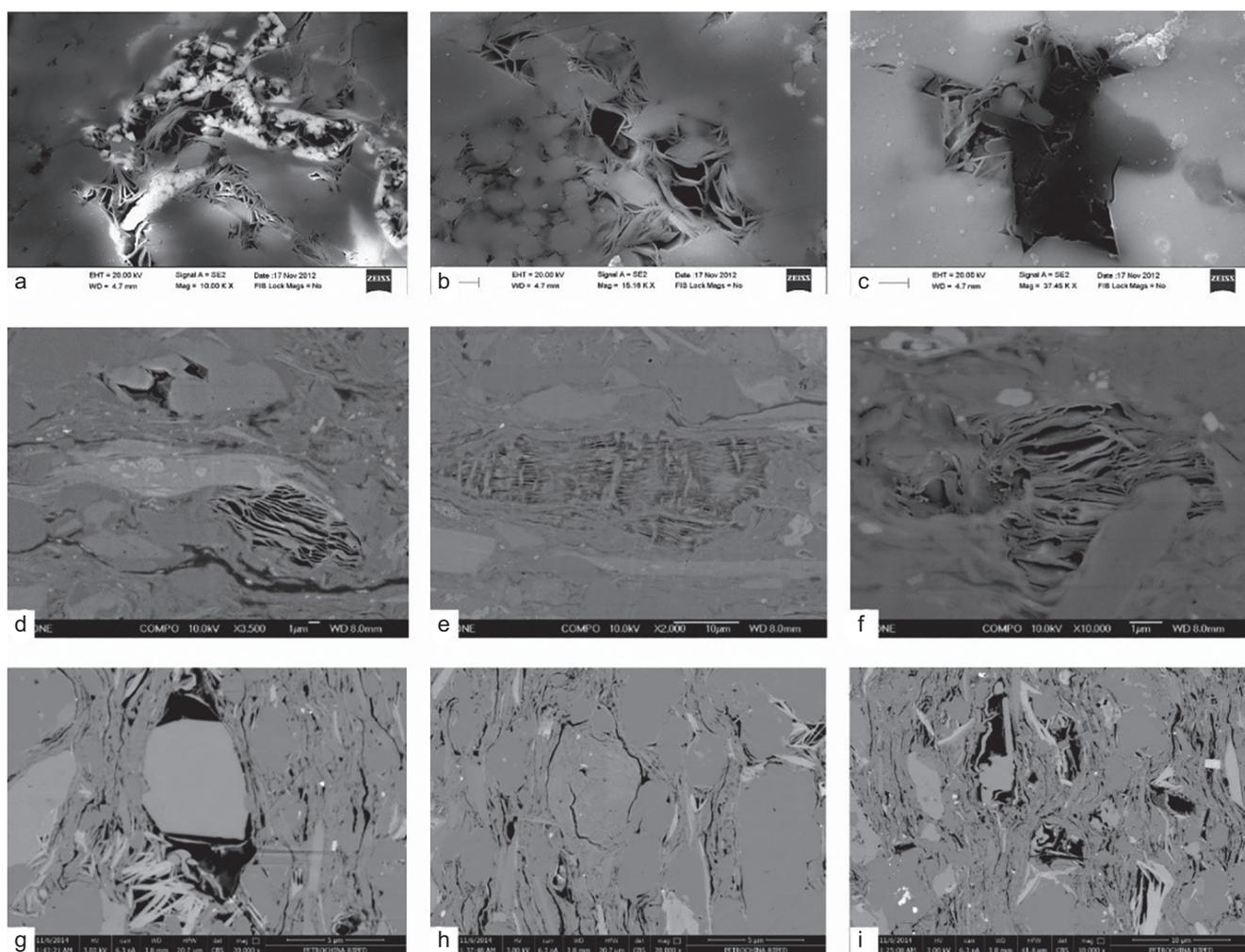
Fig. 4 Laminated structure of the representative terrestrial shale oil in China

盐—硅质纹层组合(图4-c, d, e)。不同纹层组合受物源控制和水体盐度影响较大, 总体来看, 随着盐度的增大, 内源碳酸盐供应比例增大, 碳酸盐纹层发育的规模、厚度均会增大。反之, 在松辽盆地、鄂尔多斯盆地等盐度相对较低的湖盆, 陆源碎屑供应为主, 纹层主要以长英质和黏土矿物为主。

2.3 储层孔缝结构与储集性

页岩层系储集层物性相对较差, 孔隙度多小于12%, 主体在6%~8%, 空气渗透率主体小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 大部分基质覆压渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙以粒间孔、溶蚀孔为主, 亚微米级孔隙与纳米级孔隙占主体, 整

体连通性中等—较差。其中, 陆相页岩沉积粒度普遍小于0.0625 mm, 基质孔隙度与渗透率均偏低, 基质孔隙度多数小于5%, 渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔喉直径小于100 nm, 孔隙类型以多种矿物颗粒粒间孔、溶蚀孔、晶间孔和有机质孔为主(图5)。从物性看, 松辽盆地北部青山口组页岩, 粒径普遍小于0.0625 mm, 孔隙度介于4%~8%, 孔隙直径小于100 nm。从储集空间类型看, 以黏土颗粒、细碎屑及碳酸盐岩矿物搭建的粒间孔为主体, 此外部分有机质降解转化与碎屑矿物颗粒溶蚀形成的次生孔也占有一定空间, 页理缝或裂缝更是页岩的储集特色。所以, 讨论页岩层系储集层分布特征, 除了要关注储集层的品质之外, 还需关注



(a)吉174井, 3132.5 m, 准噶尔盆地芦苇沟组灰质泥岩, 绿泥石粒内孔, 内部发育黄铁矿晶体; (b)吉174井, 3132.5 m, 准噶尔盆地芦苇沟组灰质泥岩, 绿泥石粒内孔; (c)吉174井, 3132.5 m, 准噶尔盆地芦苇沟组灰质泥岩, 有机质孔; (d)张2井, 960 m, 鄂尔多斯盆地长7₃页岩, 有机质孔与绿泥石粒内孔; (e)张2井, 960 m, 鄂尔多斯盆地长7₃页岩, 伊蒙混层粒内孔; (f)张2井, 960 m, 鄂尔多斯盆地长7₃页岩, 有机质孔与伊蒙混层粒内孔; (g)H14井, 2079.5 m, 松辽盆地青山口组黑色页岩, 黏土矿物缝; (h)H14井, 2079.5 m, 松辽盆地青山口组黑色页岩, 粒间孔; (i)H14井, 2079.5 m, 松辽盆地青山口组黑色页岩, 粒内孔

图5 陆相重点盆地页岩储层微观结构特征

Fig. 5 Microstructure characteristics of shale reservoirs in the key continental basins

与之共生的烃源岩品质、热演化状态与保存条件，宜从多角度综合看问题。页岩储集性能也受自身微观结构、黏土矿物成岩作用、热演化程度、有机质丰度与有机质类型等多因素影响。

同时，页岩储层以松辽盆地古龙凹陷青山口一、二段和嫩江组最典型，鄂尔多斯盆地延长组长7₃段页岩也很有代表性，常发育页理缝和生烃增压型微裂缝，可提升页岩储集空间与渗透性。松辽古龙凹陷青山口一段页岩储集空间类型以黏土颗粒间孔、晶间孔、页理缝和有机质孔为主。页理缝宽度可达300 nm，水平方向覆压渗透率在 $0.011 \times 10^{-3} \sim 1.62 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，孔隙直径一般在1 μm以下。虽然这些孔隙小、连通性较差，但是孔隙数量多，有效孔隙度一般在2%~8%，平均3.4%。

2.4 页岩油富集机理

页岩油能否富集成藏并具备有效开发的潜力，受多个因素控制，一是滞留烃中可动烃的数量；二是滞留烃的组分与品质以及流动性，页岩油在地下呈组分流动特征，轻组分越多，就可以和更多的重组分形成混相流动，页岩油的流动量和产量就会越高；三是页岩油赋存的地层中孔隙体积和结构，以及黏土矿物的含量与成分等。因此，页岩油的富集和形成机理也是受上述3个方面的条件所控制^[2-3,10]。

2.4.1 稳定且有规模和适宜热成熟度的富有机质页岩是重要物质基础

富有机质优质烃源岩的存在是页岩油形成富集的

地质基础。这里说的优质包括有机质丰度要高、母质类型要好和连续稳定分布范围有规模。统计发现，要形成经济性偏好的页岩油，以TOC含量>2%，最佳为3%~4%、母质类型I和II₁型为主且R_o>0.9%（咸化环境大于0.6%）或更高为页岩油富集段选择标准（图6），同时富有机质页岩分布面积要大，具备一定的工业规模，如鄂尔多斯盆地长7段页岩分布面积可达 $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。从滞留烃数量和可动油指数(OSI)看，TOC>2%时，S_i>2%且OSI>100 mg/g的频率明显增加，以S_i>4 mg/g，OSI>150 mg/g为最佳层段，此时页岩油单井产量显著增加。此外，页岩油富集也需要足够大的储集空间，以保持足够多的滞留烃数量。从页岩油主产区统计看，有效孔隙度需超过3%，最佳超过6%。不同探区因热成熟度不同，对储集层孔隙度的要求也不尽一致。较高成熟度页岩油具有较低原油密度和黏度，轻烃组分含量高，滞留烃具有较好的流动性，对孔隙度下限的要求可以低一点，如松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩，有效孔隙度取值范围在3.5%~6.9%。

2.4.2 有一定容积规模的微纳米孔隙且具脆性的多类储层是重要条件

页岩油是不是富集或者说能不能有经济可采性，除了滞留烃数量和品质外，作为页岩油赋存环境的页岩层系中是否有足够大的微纳米级储集空间也是决定页岩油富集程度与经济性的重要条件。致密砂岩型页岩油储层如鄂尔多斯盆地长7₁₋₂，孔隙度大于6%，以8%~10%为主区间，渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。过

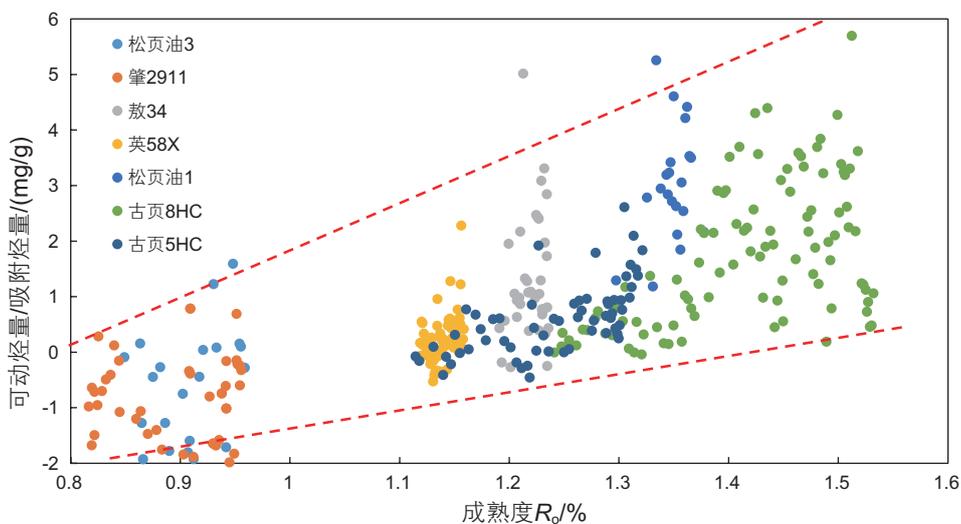


图6 松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩油可动烃含量与成熟度关系图(引自文献[10])

Fig. 6 Relationship between movable hydrocarbon content and the maturity of shale oil in the Qingshankou Formation, Gulong Sag, Songliao Basin (referred to [10])

渡型页岩油储层物性变化较大,如准噶尔盆地吉木萨尔芦草沟组为例,上下甜点孔隙度平均11%,储集物性较好。页岩的矿物组合不仅影响压裂改造效果,而且对烃类吸附数量与流动性也有重要影响,应该更加关注纯页岩与混积岩储层的矿物组成。对于纯页岩来说,黏土矿物含量高对页岩油的流动性和采出量都不利,黏土矿物含量须小于40%,且以伊利石和绿泥石为主。对于致密砂岩型和过渡型页岩油来说,黏土矿物含量宜偏低为好,应小于20%。此外,页岩的纹层和页理发育,易剥性较好,可为页岩油富集提供空间,也为页岩油流出地层提供优势通道,如松辽盆地古龙凹陷青山口组一段,当页理缝密度超过1500条/m时,页岩孔隙度大于12%。页岩岩相以纹层状长英质页岩和纹层状亮(隐)晶泥灰质页岩的储集空间大、基质孔隙发育,是最有利的储集岩相类型,可作为中高熟页岩油可动烃富集的优势岩相。

2.4.3 顶底板具封闭性保持超压且多留滞轻—中组分烃物质是重要保证

页岩油的流动性决定了资源的可动性与勘探现实性,是决定单井产量和累计采油量能否有经济性的的重要因素。保持页岩层中滞留烃有最大流动性和流动量的因素有3个方面,一是页岩层顶底板封闭性要好,可保证有最大数量可动烃留在页岩层内,这就要求页岩油富集段的顶底板盖层既要稳定且连续分布,又没有大的开启断层。以大庆古龙页岩油为例,产量较高的页岩油富集段盖层厚度下限为2~5 m,突破压力大于10 MPa,最佳大于15 MPa,且顶底板无明显开启断层。二是地层能量大,具有较高的压力系数,从目前试生产资料看,页岩油富集段能形成较高初始产量和较大EUR值的井通常都具有超压,压力系数至少大于1.2,以1.3~1.5更好,压力太高也难免出现更大工程风险。古龙页岩油目前获得较高产量和EUR值的井都位于压力系数大于1.2的轻质油带范围,又以大于1.4的区域EUR值更高。三是滞留烃中轻、中组分烃占比较大,重烃和非烃组分占比较小,以增加可动烃数量。这里包括了气油比,原油密度和烃组分构成等指标。气油比是反映地下可动烃数量占比高低的指标,从现有试生产资料看,陆相页岩油可动烃富集区/段GOR门限为 $80 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最佳区间为 $150\sim 300 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。原油密度是决定微纳米储集空间页岩油流动性好坏和流动量大小的重要指标,较低的原油密度代表着轻、中组分烃含量较高,而重烃和重质组分占比较少。其中纯正型页岩油的原油密度上限为 $0.85 \text{ g}/\text{cm}^3$,密度越小越好,最佳小于 $0.82 \text{ g}/\text{cm}^3$;过渡型页岩油形

成液态烃的时间偏早,烃的流动性偏差,原油密度下限可放宽至 $0.89\sim 0.90 \text{ g}/\text{cm}^3$;烃组分构成是反映页岩油轻重组分占比高低的指标,对于 $R_o > 0.9\%$ 的中高熟页岩油,族组分可用饱和烃含量或饱和烃和芳香烃含量来表示,正构烷烃组成可用 C_{1-14}/C_{15+} 表示。从统计看,中高熟页岩油的饱和烃含量大于80%,或饱和烃和芳香烃总量大于90%, C_{1-14}/C_{15+} 值大于0.8。对于 R_o 值为 $0.6\%\sim 0.9\%$ 的中低熟页岩油,可用 C_{1-21}/C_{22+} 值来描述流动性,并作为评价参数,其中饱和烃含量下限为55%,或饱和烃和芳香烃总量大于75%, C_{1-21}/C_{22+} 大于1.0(图7)。

3 页岩油地球物理评价技术进展

3.1 测井评价技术

页岩油测井评价技术包括烃源岩品质测井评价技术、储层品质测井评价技术、工程品质测井评价技术及甜点发育段测井评价技术等。

(1) 烃源岩品质测井评价方法

TOC是衡量烃源岩品质的关键参数,也是页岩油形成的物质基础。根据烃源岩有机质的特点和物理性质,测井技术人员研发了多种应用地球物理测井信息估算TOC的方法,包括基于常规测井及元素全谱测井两大类计算方法。电阻率-孔隙度曲线叠加法是一种基于常规测井资料对地层总有机碳含量进行定量评价的常用方法。元素全谱测井技术可通过测量获得不同元素的含量,从中计算出总碳含量及总无机碳含量,二者相减可得到总有机碳含量。

(2) 储层品质测井评价方法

岩性识别、矿物组分计算、储层孔隙结构与含油性评价是页岩油储层品质测井评价的核心内容。通过对常规测井岩性指示曲线或元素全谱测井资料的分析可实现对岩性的定性识别及复杂矿物组分的定量计算。通过从核磁共振测井 T_2 谱中提取不同大小孔隙组分在总孔隙中的百分含量,利用其相对大小关系来评价储层孔隙结构优劣。针对岩性复杂地层,基于一维核磁共振测井 T_2 谱截止值方法或二维核磁共振测井 T_1-T_2 交汇图法实现含油饱和度的定量评价;针对岩性相对简单硅质含量高的地层,可基于三孔隙度测井曲线及电阻率曲线,采用阿尔奇公式方法定量计算含油饱和度。

(3) 工程品质测井评价方法

页岩油工程品质测井评价内容主要包括脆性指数与地应力评价等。利用测井资料准确获取相关参数对

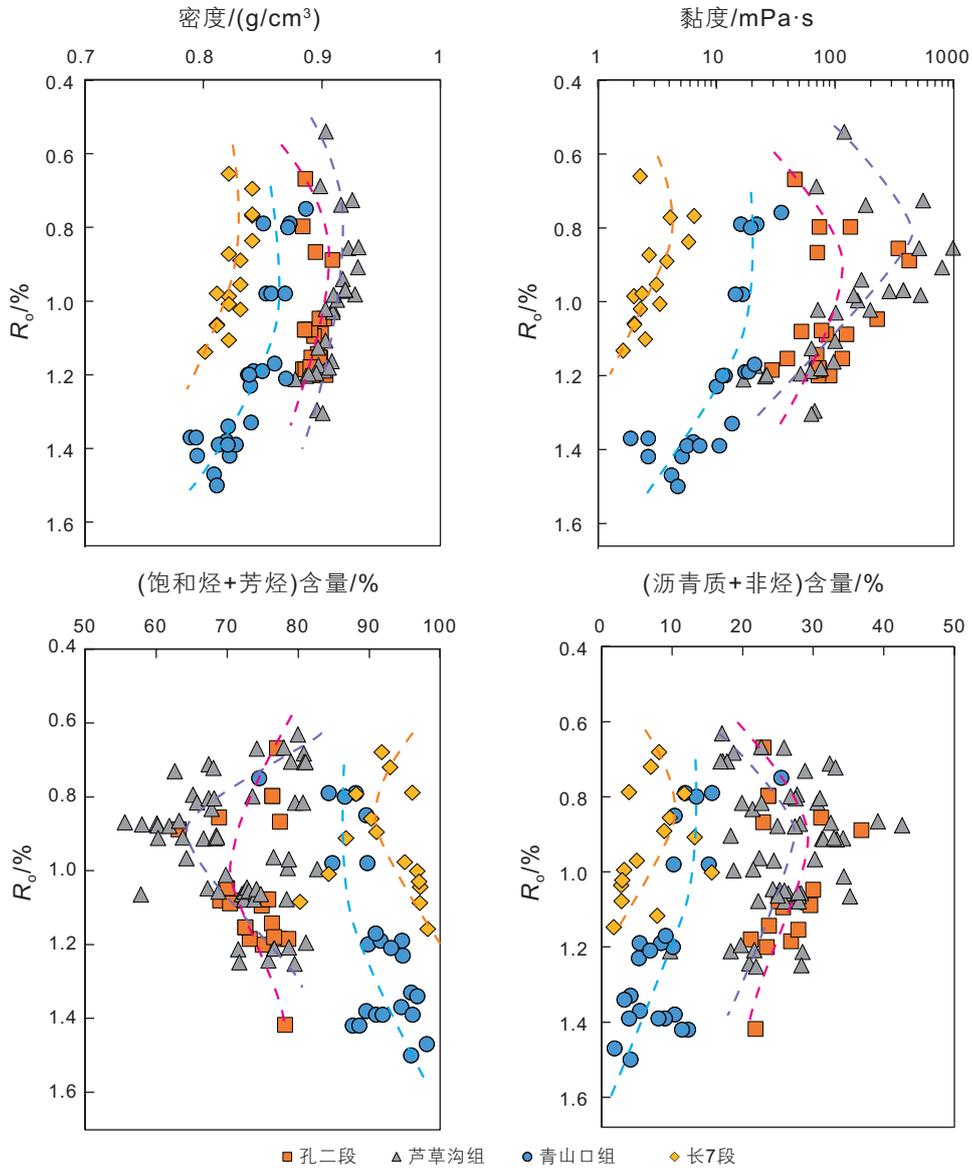


图 7 不同陆相页岩液态窗阶段原油物性变化趋势 (引自文献 [10])

Fig. 7 Variation trend of the crude oil physical properties in the liquid window stage of different terrestrial shales (referred to [10])

于准确评价地层可压性、优选压裂试油层段、提高试油成功率等都具有重要意义。常用的脆性指数评价方法包括动态弹性参数法及速度径向剖面法等方法。针对陆相页岩油地层薄互层发育、具有明显弹性各向异性的特点，研发了基于各向异性模型全剖面评价快慢地层水平主应力的方法。

(4) 页岩油“甜点”测井评价技术

利用测井资料对页岩油甜点段进行垂向分布与分级评价，是页岩油甜点评价的重要内容。结合压裂试油、储层品质及工程品质测井评价结果，综合优选关键参数，建立综合考虑储层品质与工程品质的页岩油甜点发育段测井评价方法。当储层品质和工程品质都好时，甜点段压裂后能获得较高产量，可评价为一类

产层；当储层品质好、工程品质差或者当储层品质差、工程品质好时，压裂后产能相对较低，可为二类产层；当储层品质差、工程品质也差时，压裂后一般无工业产能。

图 8 为鄂尔多斯盆地长 7 页岩层系一个压裂试油井段的甜点测井评价成果图。根据储层品质及工程品质评价结果，优选了储层品质及工程品质俱佳的压裂试油层段，使其主要集中在孔隙结构好、地应力相对较小、脆性指数较高的有利层段，最终压裂试油获得高产，日产油 25.25 t。

3.2 地球物理评价技术

我国陆相页岩油储层岩性复杂、纹层页理和微裂

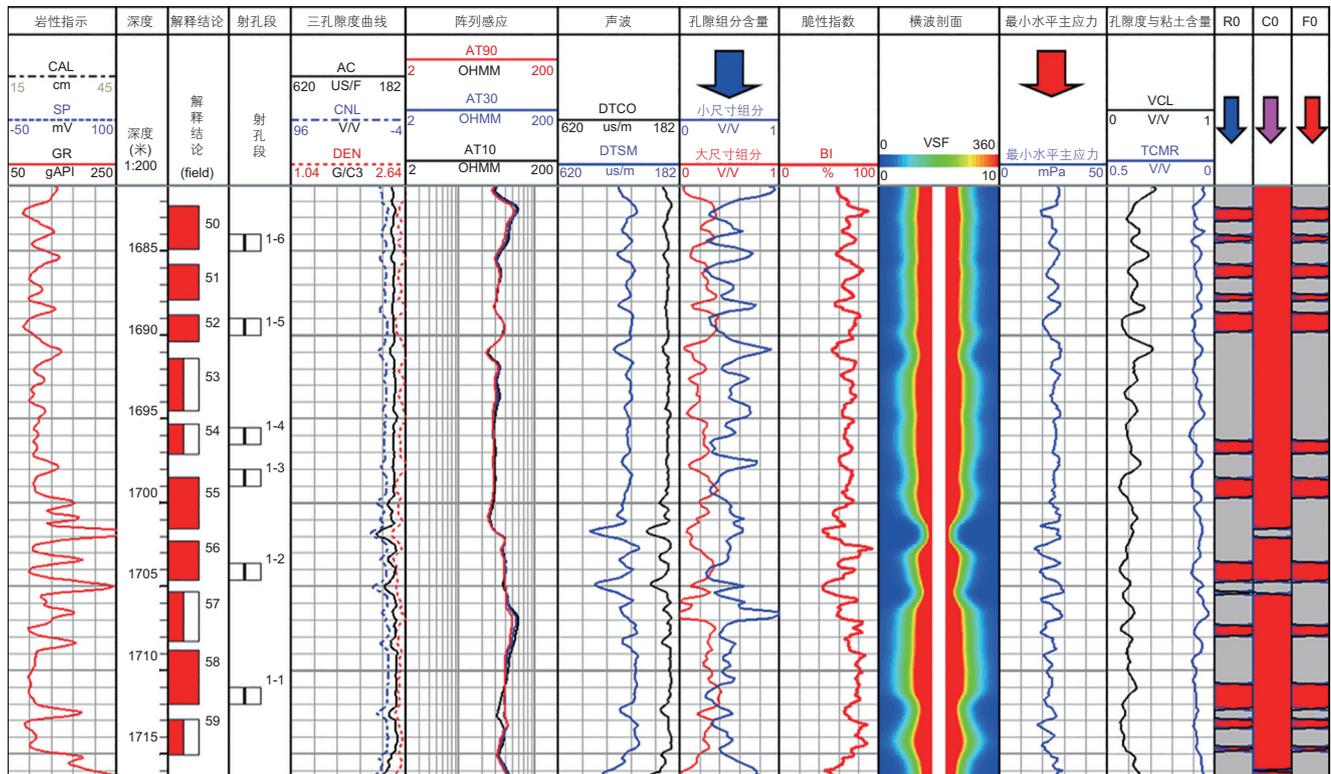


图8 页岩油甜点测井评价成果图

Fig. 8 Shale oil sweet spot logging evaluation result chart

缝发育、油气赋存状态复杂等特点给页岩油“甜点”地球物理评价技术带来了非常大的挑战。近年来，随着“两宽一高”、黄土塬区“井震混采”、小面元高覆盖、单点高灵敏度检波器接收等地震采集技术的实施^[70]，微测井约束的三维变网格层析静校正技术、层控网格层析速度建模技术、全地层Q吸收补偿及Q叠前深度偏移技术、黏弹性叠前时间偏移技术、OVT域宽频叠前保真处理技术^[71-73]以及岩石物理敏感参数分析和定量预测模板技术、地质统计学反演、波形指示和Z反演、多任务学习储层参数预测、各向异性地应力预测、水平井地震地质导向技术等一批面向页岩油甜点“六性”预测的地震解释技术的推广应用^[74-76]，页岩油勘探开发已在鄂尔多斯、准噶尔、松辽、渤海湾和三塘湖等盆地相继取得重要突破^[77-79]，地震资料和处理解释技术在页岩油储量提交、甜点区优选、水平井部署、随钻导向预警和钻完钻工程改造方面提供了日益重要且面向全周期的技术支撑。

十四五期间，我国陆相页岩油勘探开发全面进入新发展阶段，走向新层系、新领域，在地球物理基础理论认识和关键技术研发方面仍面临3个关键问题：①陆相页岩油储层的油气赋存状态与干酪根成熟度、纹层页理和微裂缝的发育程度密切相关，其岩石物理

性质和地震响应特征尚未明确，含油饱和度定量预测的理论依据不充分；②多数页岩油气区断层发育，如果断层归位不准确，构造深度不落实，容易在钻井过程中造成严重误差，因此地震资料处理过程中对微幅度构造和小断层精确成像的要求高；③页岩油气目的层一般非均质强，纵横向变化快，单个储层薄，纵向上多种岩性交互叠置，地质甜点和工程甜点关键参数的预测精度要求高。鉴于此，下一步页岩油甜点地球物理研究将围绕探清机理、定准储层、提高参数预测精度三方面持续开展工作：①页岩储层纹层、页理、微裂缝发育，地下油气赋存状态复杂，地震上反映的是多因素耦合的宏观尺度特征，而造成储层和非储层差异的因素需要从微观尺度上逐一厘清，页岩油气的地球物理响应机理仍需深入研究；②储层水平井钻遇率对构造和储层预测的精度要求高，需要继续探索高精度的构造和储层内幕成像处理技术、提高深度域处理解释能力，保障水平井高钻遇率；③页岩层段储层厚度、总有机碳含量、孔隙度、含油气性、地层压力、地应力、脆性、裂缝密度等参数的空间展布的高精度预测对储量提交和水平井工程施工至关重要，需要进一步探索页岩甜点关键参数从定性到量化的预测技术。

3.3 富集层(甜点)综合评价技术

选准页岩油甜点是获得突破发现并顺利进入工业开发的先决条件。页岩油甜点,是指页岩层系内部滞留烃含量最高、流动性最好,在目前技术条件下可以实现经济开发的最佳层段,包括垂向富集段和平面富集区两方面。

陆相页岩油具有两个基本特征:一是大面积连续分布,但资源丰度总体偏低;二是无自然工业产能,需要经过“人工”改造产油。因此,页岩油甜点的评价包括寻找“高丰度资源区/段”和易于形成“人工渗透率区/段”两方面内容。高丰度资源区/段具有“两大三高一保”的特点。“两大”是指页岩油富集区分布面积大和富集段厚度较大;“三高”是指有机质丰度高、热成熟度较高与滞留烃含量高;“一保”是指页岩油甜点的顶底板保存条件好^[3,10],这是页岩油甜点评价的地质内涵。人工渗透率区/段具有“三高两低一发育”的特点,“三高”是指脆性矿物含量要较高、微纳米孔隙度较高和纯页岩段成岩阶段较高,“两低”是指黏土矿物含量较低与地应力场的水平应力差较低;“一发育”是指天然裂缝(包括生烃增压缝、成岩缝和构造缝)发育,有利于通过人工改造形成较好的缝网,这是页岩油甜点评价的工程内涵。

页岩油甜点综合评价需要在地质评价基础上,利用测井和地震资料,对页岩油富集区/段进行三维空间评价。地质甜点评价应按照前述章节基于现阶段勘探试采总结提出的有机质含量、滞留烃含量等参数,严格筛选。在勘探初期,特别是对页岩油富集因素与经济可采性尚不明确前提下,执行标准宜从严不宜从宽。例如,有机质丰度指标一定要在TOC大于2%甚至大于2.5%的层段选择靶体,从而保证有足够多滞留烃数量。还要利用测井资料对甜点段进行垂向分布和分级评价,同时结合压裂试油、储层品质及工程品质测井评价结果,综合优选关键参数。在以上工作基础上,利用地震资料开展页岩油甜点平面分布预测,以实现甜点三维空间分布评价,为钻探井位确定提供支撑。

除“地质甜点”外,页岩油评价还涉及“工程甜点”和“经济甜点”^[80-81]。“工程甜点”关注岩石可压裂性、地应力各向异性等方面,“经济甜点”关注资源丰度、资源规模、原油品质、埋深等内容。根据在页岩油甜点评价中的重要程度,对主要参数给予不同的权重,地质、工程和经济分别赋予0.5、0.3和0.2权重,在此基础上开展三类甜点综合评价,落实页岩油最佳富集区。

4 研究展望

页岩油是已形成油气在烃源岩内部的留滞,亦可称为残留,能否具有经济开发价值取决于多个因素,首先是滞留烃数量,这是决定单井产量和累计采出油量的基础;二是滞留烃成分构成与品质,显然轻组分越多,流动性就越好,单井产量和单井累计采出量就会越高;三是页岩油赋存地层中的黏土矿物成分、含量与孔喉体积和结构。尽管我国陆相页岩勘探开发在多个盆地取得了突破,试油试采也取得了较好的成效,国家也相继建立了吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区、大庆油田古龙陆相页岩油国家级示范区、胜利油田济阳陆相断陷湖盆页岩油国家级示范区,但陆相页岩油规模勘探与效益开发目前还面临诸多挑战,特别是我国陆相页岩油大部分是中低成熟度页岩油资源,必须改变思路,建立全新的研究内容与研究重点,特别需要把研究精度升级并要加强微观研究,加强固/液/气多相多场耦合流动机理研究,加强多学科交叉研究等,以建立页岩油成藏新学科。重点需加强以下方面的研究。

(1)富有机质页岩形成环境与有机质超量富集(TOC>6%)关系不清、页岩岩性组合及岩石组构与烃滞留数量关系不清、有机质类型及丰度与烃吸附数量的关系尚不清楚,以及地层能量、滞留烃品质和烃组分混相流出的人工干预与页岩油单井累计采出量的关系也尚未建立等,致使对页岩油资源潜力与经济评价都存在较大不确定性,对有利勘探靶区与开发试采富集区选择还有较大盲目性。研究需要关注页岩和泥岩的沉积动力学差异及与有机质富集和贫化的关系、页岩层系中页理、纹层与沉积韵律的形成机制及在压裂过程中易剥开性的差异,以及页岩层系储层表征、页岩油富集控制因素和多学科融合的“富集区/段”评价方法和评价标准等,以解决页岩油有利富集区/段客观优选问题。

(2)强非均质页岩储层渗流机理、体积改造裂缝形成机理、产量递减规律、多富集(甜点)层段开发模式尚未建立,致使页岩油效益开发面临巨大挑战,需要探索形成“以改造缝网模拟和技术优化为核心、以多富集(甜点)段协同开发方式优化为支点、以实现高效开发为目标”的页岩油开发技术与对策,解决中高熟页岩油效益开发、稳产与提高采收率面临的技术难题。

(3)中低熟页岩油面临有机质超量富集主控因素、原位转化动力学、不同岩石组构的传热与多相多场烃

物质耦合流动机制尚未完全建立的挑战,需要关注陆相富有机质页岩沉积环境、沉积动力与外物质作用,这是页岩油原位转化选区评价急需解决的关键基础问题;关注不同沉积环境有机质显微组分构成与数量差异对原位转化动力学与转化效率的作用,这是原位转化最佳升温窗口设计和实现有效开发的基础;关注不同黏土矿物与不同有机质构成环境的蓄热与热传导动力、关注固/液/气多相有机质相态转化诱发的地层能量场动力学,解决地下最佳升温速率设计以及井下工具选择面临的基础问题。通过研究攻关,逐步形成陆相中低熟页岩油原位转化配套技术,以推动陆相页岩革命的发生和目标实现。

5 结论

(1)陆相页岩有机质主要是I型和II₁型,即主要以倾油型母质为主,少量为II₂型,较高热演化程度可以有效改善油品质量,增加气油比,对原油地下流动性有改善作用。微纳米级孔缝系统的研究方法主要包括图像精细表征与流体定量评价2大类,保压岩心的及时核磁测试可准确分析页岩油储层中的烃类分布。

(2)火山灰和热液注入与放射性物质促进生物超量超速生长均可导致水体的高生产力,咸化水体、底

水缺氧环境与低沉积速率三种条件均有利于有机质保存富集。页岩层系储集层孔隙度多小于12%,主体在6%~8%,空气渗透率主体小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,大部分基质覆压渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙以粒间孔、溶蚀孔为主,亚微米级孔隙与纳米级孔隙占主体,整体连通性中等-较差。稳定且有规模和适宜热成熟度的富有机质页岩是重要物质基础,有一定容积规模的微纳米孔隙且具脆性的多类储层是重要条件,顶底板具封闭性保持超压且多留滞轻一中组分烃物质是重要保证。

(3)基于常规测井及元素全谱测井两大类计算方法可估算TOC,储层品质测井评价包括岩性识别、矿物组分计算、储层孔隙结构与含油性评价,工程品质测井评价内容主要包括脆性指数与地应力评价等;地震资料和处理解释技术在页岩油储量提交、甜点区优选、水平井部署、随钻导向预警和钻完井工程改造方面提供了日益重要且面向全周期的技术支撑。

(4)陆相页岩油规模勘探与效益开发目前还面临诸多挑战,必须改变思路,建立全新的研究内容与研究重点,特别需要把研究精度升级并要加强微观研究,加强固/液/气多相多场耦合流动机理研究,加强多学科交叉研究等,以建立页岩油成藏新学科。

参考文献

- [1] US Energy Information Administration. Annual energy outlook 2019 with projections to 2050[R]. Washington: US Energy Information Administration, 2022.
- [2] 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 W Z, HU S Y, ZHU R K, et al. Formation and distribution of nonmarine shale oil in China[M]. Petroleum Industry press, 2022.]
- [3] 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. 地学前缘, 2023,30(1): 116-127. [ZHAO W Z, ZHU R K, LIU W, et al. Enrichment conditions and occurrence features of lacustrine mid-high matured shale oil in onshore China. Earth Science Frontiers, 2022, 30(1): 116-127.]
- [4] 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 L D, LIU H, HE W Y, 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.]
- [5] 邹才能,朱如凯,董大忠,等. 页岩油气科技进步、发展战略及政策建议[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1-12. [ZOU C N, ZHU R K, DONG D Z, et al. Shale oil and gas technology progress, development strategy and policy suggestion[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1-12]
- [6] 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 F Z, ZOU C N, YANG Z. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1067-1078.]
- [7] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 2022, 96(01): 155-171. [MA Y S, CAI X Y, ZHAO P R, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(01): 155-171.]
- [8] 朱如凯,张婧雅,李梦莹,等. 陆相页岩油富集基础研究进展与关键问题[J]. 地质学报, 2023, doi: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2023204. [ZHU R K, ZHANG J Y, LI MY, et al. Advances and key issues in the basic research of non-marine shale oil enrichment[J].

- Acta Geologica Sinica, 2023.]
- [9] PETER K E, CASSA M R. Applied source rock geochemistry [D]. In: The Petroleum System—From Source to Trap. AAPG Memoir 60, AAPG, Tulsa, 1994: 93–120.
- [10] 赵文智, 卞从胜, 李永新, 等. 陆相页岩油可动烃富集因素与古龙页岩油勘探潜力评价, 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 1–13. [ZHAO W Z, BIAN C S, LI Y X, et al. Enrichment factors of movable hydrocarbons in lacustrine shale oil and exploration potential of shale oil in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration & Development, 2023, 50(3): 1–13.]
- [11] 程克明, 王铁冠, 钟宁宁, 等. 烃源岩地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1995. [CHENG K M, WANG T G, ZHONG N N, et al. Geochemistry of oil source rock[M]. Beijing: Science Press, 1995.]
- [12] A C COOK, et al. Classification of oil shales, coals and other organic-rich rocks [J]. Organic Geochemistry, 1991, 17: 211–222.
- [13] LIU B, SCHIEBER J, MASTALERZ M. Petrographic and micro-FTIR study of organic matter in the Upper Devonian New Albany shale during thermal maturation: Implications for kerogen transformation. In: mudstone diagenesis: Research perspectives for shale hydrocarbon reservoirs, seals, and source rocks. AAPG Memoir 120, AAPG, Tulsa, 2019: 165–188.
- [14] LIU B, MASTALERZ M, SCHIEBER J. SEM petrography of dispersed organic matter in black shales: A review. Earth-Science Reviews, 2022, 224: 103874.
- [15] 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 S Y, BAI B, TAO S Z, 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.]
- [16] 何涛华, 李文浩, 谭昭昭, 等. 南襄盆地泌阳凹陷核桃园组页岩油富集机制 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1259–1269. [HE T H, LI W H, TAN Z Z, et al. Mechanism of shale oil accumulation in the Hetaoyuan Formation from the Biyang Depression, Nanxiang Basin[J]. OIL & GAS GEOLOGY, 2019, 40(6): 1259–1269.]
- [17] D Y SHAO, T W ZHANG, LUCY T, et al. Experimental investigation of oil generation, retention, and expulsion within Type II kerogen-dominated marine shales: Insights from gold-tube nonhydrous pyrolysis of Barnett and Woodford Shales using miniature core plugs[J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 217: 103337.
- [18] 张斌, 于聪, 崔景伟, 等. 生烃动力学模拟在页岩油原位转化中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1212–1219. [ZHANG B, YU C, CUI J W, et al. Kinetic simulation of hydrocarbon generation and its application to in-situ conversion of shale oil[J]. Petroleum Exploration & Development, 2019, 46(6): 1212–1219.]
- [19] 马中良, 王强, 郑伦举, 等. 页岩油原位开采温度—时间—转化率判识方法及应用 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(2): 394–399. [MA Z L, WANG Q, ZHENG L J, et al. Identification method & application of temperature and heating time and hydrocarbon conversion rate of oil shale in-situ mining[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(2): 394–399.]
- [20] STOCKHAUSEN M, GALIMBERTI R, ELIAS R, et al. The Expulsinator versus conventional pyrolysis: The differences of oil/gas generation and expulsion simulation under near-natural conditions[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 117(1).
- [21] MA W, HOU L, LUO X, et al. Role of bitumen and NSOs during the decomposition process of a lacustrine type-II kerogen in semi-open pyrolysis system[J]. Fuel, 2020, 259: 116211.
- [22] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence[D]. 2nd ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1984.
- [23] 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 W Z, HU S Y, HOU L H, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. Petroleum Exploration & Development, 2020, 47(1): 1–10.]
- [24] CURTIS M E, AMBROSE R J, SONDERGELD C H, et al. Investigation of the relationship between organic porosity and thermal maturity in the Marcellus Shale[J]. SPE 144370, 2011.
- [25] 崔景伟, 朱如凯, 崔京钢. 页岩孔隙演化及其与残留烃量的关系: 来自地质过程约束下模拟实验的证据 [J]. 地质学报, 2013, 87(5): 730–736. [CUI J W, ZHU R K, CUI J G. Relationship of porous evolution and residual hydrocarbon: Evidence from modeling experiment with geological constration[J]. ACTA GEOLOGICA SINICA, 2013, 87(5): 730–736.]
- [26] 胡海燕. 富有机质 Woodford 页岩孔隙演化的热模拟实验 [J]. 石油学报, 2013, 34(5): 820–825. [HU H Y. Porosity evolution of the organic-rich shale with thermal maturity increasing[J]. ACTA PETROLEI SINICA, 2013, 34(5): 820–825.]
- [27] WU S T, YANG Z, ZHAI X F, et al. An experimental study of organic matter, minerals and porosity evolution in shales within high-temperature and high-pressure constraints[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 102: 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.12.014>.
- [28] JIANG X H, WU S T, HOU L H, et al. Porosity evolution In lacustrine organic-matter-rich shales with high clay minerals content, Frontiers in Earth Science[J].2021, 9: 7660936.
- [29] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: part 2: Shale-oil resource systems. Shale reservoirs-giant resources for the 21st century[J]. AAPG Mem. 2012, 97: 89–119.
- [30] LARTER S R, HUANG H P, SNOWDON L, et al. What we do not know about self-sourced oil reservoirs: Challenges and potential

- solutions[J]. In: SPE 162777, 2012: 1~4.
- [31] 卢双舫, 薛海涛, 王敏, 等. 页岩油评价中的若干关键问题及研究趋势[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1309–1322. [LU S F, XUE H T, WANG M, et al. Several key issues and research trends in evaluation of shale oil [J]. ACTA PETROLEI SINICA, 2016, 37(10): 1309–1322.]
- [32] 张辉, 王志章, 杨亮, 等. 松南上白垩统青山口组一段不同赋存状态页岩油定量评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 315–327. [ZHANG H, WANG Z Z, YANG L, et al. Quantitative evaluation of shale oil in different occurrence states in the first member of Qingshankou Formation of Upper Cretaceous in south of Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 315–327.]
- [33] 周尚文, 刘洪林, 闫刚, 等. 中国南方海相页岩储层可动流体及 T_2 截止值核磁共振研究[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(04): 612–616. [ZHOU S W, LIU H L, YAN G, et al. NMR research of movable fluid and T_2 cutoff of marine shale in South China [J]. Oil & gas geology, 2016, 37(04): 612–616.]
- [34] 吴海科, 曹凯, 赵方方. 低渗沉积岩可动流体饱和度核磁共振实验[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(3): 457–463. [WU H K, CAO K, ZHAO F F. NMR experimental study of movable fluid saturation in low permeability sedimentary rocks[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(3): 457–463.]
- [35] KARIMI S, SAIDIAN M, PRASAD M, et al. Reservoir rock characterization using centrifuge and nuclear magnetic resonance: A laboratory study of middle bakken cores[J]. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [36] DANG S T, SONDERGELD C H, RAI C S. Interpretation of nuclear-magnetic resonance response to hydrocarbons: application to miscible enhanced-oil-recovery experiments in shales[J]. SPE Res Eval & Eng, 2018, SPE–191144–PA.
- [37] LI, J B, HUANG, W B, LU, S F, et al. Nuclear magnetic resonance T_1 – T_2 map division method for hydrogen-bearing components in continental shale [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(9): 9043–9054.
- [38] KHATIBI S. NMR relaxometry a new approach to detect geochemical properties of organic matter in tight shales[J]. Fuel, 2019, 235: 167–177.
- [39] MAENDE A, PEPPER A, JARVIE D M, et al. Advanced pyrolysis data and interpretation methods to identify unconventional reservoir sweet spots in fluid phase saturation and fluid properties (API Gravity) from drill cuttings and cores[J]. AAPG Search and Discovery Article 80596.
- [40] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6): 842–849. [JIANG Q G, LI M W, QIAN M H, et al. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence states and its application[J]. Petroleum Geology & Experiment 2016, 38(6): 842–849.]
- [41] 王民, 马睿, 李进步, 等. 济阳坳陷古近系沙河街组湖相页岩油赋存机理[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 789–802. [WANG M, MA R, LI J B, et al. Occurrence mechanism of lacustrine shale oil in the Paleogene Shahejie Formation of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 789–802.]
- [42] ABRAMS M A, GONG C, GARNIE C, et al. A new thermal extraction protocol to evaluate liquid rich unconventional oil in place and in-situ fluid chemistry [J]. Mar. Pet. Geol., 2017, 88: 659–675.
- [43] ROMERO-SARMIENTO M F. A quick analytical approach to estimate both free versus sorbed hydrocarbon contents in liquid-rich source rocks [J]. AAPG Bull., 2019, 103: 2031–2043.
- [44] 钱门辉, 蒋启贵, 黎茂稳, 等. 湖相页岩不同赋存状态的可溶有机质定量表征[J]. 石油实验地质, 2017, 39(2): 278–286. [QIAN M H, JIANG Q G, LI M W, et al. Quantitative characterization of extractable organic matter in lacustrine shale with different occurrences[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(2): 278–286.]
- [45] ZHANG H, HUANG H P, LI Z, et al. Oil physical status in lacustrine shale reservoirs – A case study on Eocene Shahejie Formation shales, Dongying Depression, East China [J]. Fuel, 2019, 257: 116027.
- [46] 皇甫玉慧, 张金友, 张水昌, 等. 松辽盆地北部白垩统青山口组不同赋存状态页岩油特征[J]. 地质学报, 2023, 97(2): 1–16. [HUANGFU Y Y, ZHANG J Y, ZHANG S C, et al. Characteristics of shale oil in different occurrence states of the Cretaceous Qingshankou Formation in the northern Songliao Basin [J]. ACTA GEOLOGICA SINICA, 2023, 97(2): 1–16.]
- [47] 王森, 冯其红, 查明, 等. 页岩有机质孔隙内液态烷烃赋存状态分子动力学模拟[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 772–778. [WANG S, FENG Q H, ZHANG M, et al. Molecular dynamics simulation of liquid alkane occurrence state in pores and fractures of shale organic matter [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 772–778.]
- [48] TIAN S S, XUE H T, LU S F. Molecular simulation of oil mixture adsorption character in shale system [J]. J. Nanosci. Nanotechnol, 2017, 17(9): 6198–6209.
- [49] 李俊乾, 卢双舫, 张婕, 等. 页岩油吸附与游离定量评价模型及微观赋存机制[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 583–592. [LI J Q, LU S F, ZHANG J, et al. Quantitative evaluation models of adsorbed and free shale oil and its microscopic occurrence mechanism [J]. Oil & gas geology, 2019, 40(3): 583–592.]

- [50] HU T, PANG X, JIANG F, et al. Movable oil content evaluation of lacustrine organic-rich shales: Methods and a novel quantitative evaluation model[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 214: 103545.
- [51] 马力宁, 李江涛, 华锐湘, 等. 保压取心储层流体饱和度分析方法——以柴达木盆地台南气田第四系生物成因气藏为例[J]. *天然气工业*, 2016, 36(1): 76–80. [MA L N, LI J T, HUA R X, et al. An analysis method for reservoir fluid saturation by pressure coring: A case study from Quaternary biogenetic gas reservoirs in the Tainan Gas Field, Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(1): 76–80.]
- [52] 袭杰, 王晓舟, 杨永祥, 等. 保压取心技术在吐哈油田陵检 14–241 井的应用[J]. *石油钻探技术*, 2003, 31(3): 19–21. [XI J, WANG X Z, YANG Y X, et al. Application of coring technology with keeping pressure in Lingjian 14–241 Well in Tuha Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2003, 31(3): 19–21.]
- [53] 张斌成, 谢治国, 刘英, 等. 吐哈保压密闭取心饱和度应用及水淹识别方法[J]. *吐哈油气*, 2005, 10(2): 152–155. [ZHANG B C, XIE Z G, LIU Y, et al. Saturation application of pressure coring and identification method of water out in Tuha Oilfield[J]. *Tuha Oil and Gas*, 2005, 10(2): 152–155.]
- [54] 杨立文, 苏洋, 罗军, 等. GW-CP194–80A 型保压取心工具的研制[J]. *天然气工业*, 2020, 40(04): 91–96. [YANG L W, SU Y, LUO J, et al. Development and application of GW-CP194–80A pressure-maintaining coring tool[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(4): 91–96.]
- [55] 乔东宇, 宋朝晖, 黄治中, 等. 高性能取心密闭液的研究与应用[J]. *钻井液与完井液*, 2010, 27(5): 28–30. [QIAO D Y, SONG Z H, HUANG Z Z, et al. Research and application of high performance sealed coring fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2010, 27(5): 28–30.]
- [56] 马桂清, 薛玉志, 何兴贵, 等. 合成基密闭液的研制与应用[J]. *石油钻探技术*, 2006, 34(4): 50–51. [MA G Q, XUE Y Z, HE X G, et al. Development and application of a synthetic-based sealing fluid[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006, 34(4): 50–51.]
- [57] 路峰. 连续密闭取心技术在牛页 1 井的应用[J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(3): 108–110. [LU F. Application of continuous sealing core drilling technique on Well Niuye 1[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(3): 108–110.]
- [58] 罗军. 保压密闭取心技术在延页 27 井的应用[J]. *钻采工艺*, 2015, 38(5): 113–114. [LUO J. Application of pressure retaining sealed coring technique in Yanye 27 Well[J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(5): 113–114.]
- [59] 罗超, 张焕旭, 张纪智, 等. 岩石密闭热释方法评价页岩含油性特征——以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(4): 712–719. [LUO C, ZHANG H X, ZHANG J Z, et al. Evaluation of oil content in shale by sealed thermal desorption: A case study of Jurassic Da'anzhai Member, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(4): 712–719.]
- [60] PICARD M D. Classification of fine-grained sedimentary rocks[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1971, 41(1): 179–195.
- [61] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1031–1039. [JIANG Z X, LIANG C, WU J, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1031–1039.]
- [62] 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 等. 细粒沉积学研究进展与发展方向[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(02): 251–264. [ZHU R K, LI M Y, YINAG J R, et al. Advances and trends of fine-grained sedimentology[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(02): 251–264.]
- [63] 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 B, DAI C C, HOU X L, et al. Authigenic silica in continental lacustrine shale and its hydrocarbon significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(5): 896–907.]
- [64] ZHDANOVA N N, ZAKHARCHENKO V A, VEMBER V V, et al. Fungi from chernobyl: Mycobiota of the inner regions of the containment structures of the damaged nuclear reactor[J]. *Mycological Research*, 2000, 104(12): 1421–1426.
- [65] 马奎, 胡素云, 王铜山. 生烃母质繁盛条件实验研究及其油气地质意义[J]. *微体古生物学报*, 2018, 35(3): 4. [MA K, HU S Y, WANG T S. Experimental study on the prosperous condition of the hydrocarbon generation and its significance on oil-gas geology[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2018, 35(3): 4.]
- [66] DEBORAH W, MORGAN T J, MALCOLM B H et al. Explosive volcanism as a cause for mass mortality of pteropods[J]. *Marine Geology*, 2011, 282: 231–229.
- [67] 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(06): 1079–1089. [ZHAO W Z, ZHU R K, HU S Y, 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(06): 1079–1089.]
- [68] LIU Q Y, LI P, JIN Z J, et al. Preservation of organic matter in shale linked to bacterial sulfate reduction (BSR) and volcanic activity under marine and lacustrine depositional environments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, (1365): 104950.
- [69] HUA GANLIN, WU SONGTAO, ZHANG JINGYOU, et al. Laminar structure and reservoir quality of shales with high clay mineral content in the qingshankou formation, songliao basin. *Energies*. 2022, 15: 6132.
- [70] 付锁堂, 王大兴, 姚宗惠. 鄂尔多斯盆地黄土塬三维地震技术突破及勘探开发效果[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(01): 67–77. [FU S T, WANG D X, YAO Z H. Progress of 3D seismic exploration technologies and oil and gas exploration and development performance in

- the loess tableland area of the Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(01): 67–77.]
- [71] 高秦, 陈超群, 等. 多方法静校正融合技术在鄂尔多斯盆地黄土塬区中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(S2): 38–44. [GAO Q, CHEN C Q, et al. Multiple statics fusion in loess tablelands, Ordos Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(Supplement 2): 38–44.]
- [72] 包燧, 陈志德, 等. 松辽盆地古龙页岩油保真宽频宽方位各向异性地震处理技术[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(5): 106–120. [BAO Y, CHEN Z D, et al. Seismic processing technology of fidelity broadband wide-azimuth anisotropy for Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(5): 106–120.]
- [73] 撒利明, 曹宏, 等. 中国陆相油藏开发地震技术与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2023. [SA L M, CAO H, et al. Seismic technology and practice for continental reservoir development in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023.]
- [74] 陈树民, 韩德华, 等. 松辽盆地古龙页岩油地震岩石物理特征及甜点预测技术[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(03): 107–116. [CHEN S M, HAN D H, et al. Seismic petrophysical characteristics and predicting technique of the sweet spots in Gulong shale oil reservoirs of Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(03): 107–116.]
- [75] MINGHUI LU, HONG CAO, et al. Quantitative prediction of seismic rock physics of hybrid tight oil reservoirs of the Permian Lucaogou Formation, Junggar Basin, Northwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 178: 216–223.
- [76] 郭旭光, 何文军, 等. 准噶尔盆地页岩油“甜点区”评价与关键技术应用—以吉木萨尔凹陷二叠系芦苇沟组为例[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(8): 1168–1179. [GUO X G, HE W J, et al. Evaluation and application of key technologies of “sweet area” of shale oil in Junggar Basin: Case study of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(8): 1168–1179.]
- [77] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段源内油藏地质特征与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 1–14. [FU J H, LI S X, NIU X B, et al. Geological characteristics and exploration practice of the self-sourced reservoir in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 1–14.]
- [78] 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 Y, YANG Z F, HE W J, 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.]
- [79] 赵贤正, 周立宏, 等. 陆相页岩油工业化开发突破与实践—以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 589–600. [ZHAO X Z, ZHOU L H, et al. Breakthrough and practice of industrial development on continental shale oil: A case study on Kong-2 Member in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 589–600.]
- [80] 于江龙, 陈刚, 吴俊军, 等. 玛湖凹陷风城组页岩油地质工程甜点地震预测方法及应用[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(06): 757–766. [YU J L, CHEN G, WU J J, et al. Seismic Prediction Method of Geological and Engineering Shale Oil Sweet Spots and Its Application in Fengcheng Formation of Mahu Sag[J]. *XINJIANG PETROLEUM GEOLOGY*, 2022, 43(06): 757–766.]
- [81] 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(04): 524–532. [BAI G P, QIU H H, DENG Z Z, Distribution and main controls for shale oil resources in USA[J]. *PETROLEUM GEOLOGY & EXPERIMENT*, 2020, 42(04): 524–532.]

(编辑 付娟娟)