

引用: 付金华, 刘显阳, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段页岩油勘探发现与资源潜力[J]. 中国石油勘探, 2021,26(5):1-11.

Fu Jinhua, Liu Xianyang, Li Shixiang, et al. Discovery and resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(5):1-11.

鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段页岩油 勘探发现与资源潜力

付金华^{1,2} 刘显阳^{1,2} 李士祥^{1,3} 郭芪恒^{1,3} 周新平^{1,3} 杨伟伟^{1,3}

(1 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室; 2 中国石油长庆油田公司; 3 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院)

摘要: 在梳理总结“十三五”期间鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段页岩油勘探成果、理论技术进展的基础上, 分析长7段页岩油的资源潜力, 提出了“十四五”页岩油发展方向。鄂尔多斯盆地发育重力流夹层型、三角洲前缘夹层型、纹层页岩型、页理页岩型4类页岩油, 其中在湖盆中部发现10亿吨级庆城大油田, 在湖盆周边初步落实 5×10^8 t规模储量; 纹层页岩型页岩油风险勘探展现出新苗头。研究表明, 优质烃源岩为页岩油富集提供了大量富烃优质流体, 多类型的储集空间和源内生烃增压形成的持续高压充注是长7段页岩油规模成藏、甜点高产的核心, 深水广泛发育的砂质沉积构成了页岩油的勘探甜点; 攻关形成的地质工程甜点综合评价技术、丛式水平井防塌优快钻完井技术和水平井“超前蓄能、细分切割”体积压裂技术等配套勘探技术系列是发现页岩油规模储量的重要保障。“十三五”期间丰硕的勘探成果, 更加坚定了在湖盆中部扩大重力流夹层型页岩油规模含油富集区, 以及在湖盆周边开拓三角洲前缘夹层型页岩油勘探新领域的信心, 同时积极探索页岩型页岩油新类型技术攻关试验, 为长庆油田页岩油高质量快速发展提供雄厚的资源基础。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 页岩油; 延长组长7段; 勘探发现; 资源潜力

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.05.001

Discovery and resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin

Fu Jinhua^{1,2}, Liu Xianyang^{1,2}, Li Shixiang^{1,3}, Guo Qiheng^{1,3}, Zhou Xinping^{1,3}, Yang Weiwei^{1,3}

(1 National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil and Gas Fields; 2 PetroChina Changqing Oilfield Company; 3 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Changqing Oilfield Company)

Abstract: The exploration results, theoretical and technical progress of shale oil in Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation are summarized during the 13th Five-Year Plan period, resource potential is analyzed, and the exploration targets proposed during the 14th Five-Year Plan period. There are four types of shale oil in Ordos Basin, including gravity flow interlayered type, delta front interlayered type, laminar shale type and laminated shale type. Among them, a one-billion-ton-level Qingcheng Oilfield has been discovered in the central lake basin, and large-scale reserves of 5×10^8 t been preliminarily identified in the peripheral lake basin; In addition, new signs have been observed in the risk exploration of laminar shale type shale oil. The study results show that high-quality source rocks supply a large amount of hydrocarbon

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05050); 国家重点基础研究发展计划(973项目)“淡水湖盆细粒沉积与富有机质页岩形成机理”(2014CB239003)。

第一作者简介: 付金华(1963—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 2004年毕业于西北大学, 教授级高级工程师, 现从事油气勘探开发研究和管理。地址: 陕西省西安市未央区未央路151号长庆油田分公司, 邮政编码: 710018。E-mail: fjh_cq@petrochina.com.cn

通信作者简介: 李士祥(1981—), 男, 湖北钟祥人, 博士, 2017年毕业于成都理工大学, 教授级高级工程师, 现从事页岩油勘探开发及综合研究工作。地址: 陕西省西安市未央区未央路151号长庆油田分公司勘探开发研究院, 邮政编码: 710018。E-mail: sxlee1981_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-03-10; 修改日期: 2021-08-01

fluids for shale oil enrichment. Multiple types of reservoir space and continuous high-pressure charging caused by hydrocarbon generation pressurization inside the source rock are the key to large-scale oil accumulation and high yield of sweet spots. The widely developed sandy deposits in deep water areas are sweet spots for shale oil exploration. A series of supporting technology, such as comprehensive evaluation technology of geological-engineering sweet spots, anti-collapse fast and optimal drilling and completion technology of cluster horizontal well, and “advanced energy storage and subdivision cutting” volume fracturing technology of horizontal well, are important guarantees for the discovery of large-scale shale oil reserves. The fruitful exploration results achieved during the 13th Five-Year Plan period support to strengthen the confidence in expanding the scale of gravity flow interlayered type shale oil enrichment area in the central lake basin and exploring new fields of delta front interlayered type shale oil in the peripheral lake basin. Meanwhile, new supporting technology is actively researched, so as to provide a solid resource foundation for the high-quality and rapid development of shale oil exploration in Changqing Oilfield.

Key words: Ordos Basin, shale oil, Chang 7 member of Yanchang Formation, discovery, resource potential

0 引言

页岩油已成为全球非常规油气资源勘探开发的热点^[1-3],影响各国能源战略布局。与美国海相页岩油不同,中国主要为陆相页岩油,普遍具有储层非均质性强、厚度变化快、气油比低、油质重、异常压力不明显的特点。中国各盆地页岩油资源潜力巨大,随着开采技术愈发成熟完善,页岩油必将成为现实性战略接替资源^[4-9]。借鉴北美成功经验,中国加大了陆相页岩油地质研究、勘探攻关、开发试验和产能建设力度,并取得实质性发现和突破,相继在鄂尔多斯盆地^[10]、准噶尔盆地^[11-12]、松辽盆地^[13]及渤海湾盆地^[14-15]烃源岩层系内实现了页岩油资源的重大突破及工业化开发,建立了陆相页岩油富集模式^[16-20]、储层评价参数^[21-23],形成了关键的勘探开发技术^[24-26],对支撑中国陆相页岩油“甜点”预测和产能建设具有重要意义。

鄂尔多斯盆地页岩油储层致密,油层改造前无自然工业产量,直井压裂改造后虽然能达到工业试油产量,但稳产能力有限,累计产油量低。通过对三叠系长7段页岩油形成富集机理研究,明确了甜点主控因素,攻关形成了水平井体积压裂改造等系列配套技术,实现了页岩油的规模效益开发,取得了系列勘探开发进展。本文重点对长庆油田分公司在“十三五”期间取得的页岩油勘探成果、地质认识及勘探关键技术进行总结,明确勘探潜力,为“十四五”期间页岩油勘探指明方向,为国内其他盆地页岩油勘探提供参考。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部,是一个多旋回的叠合含油气盆地^[27-28]。三叠系延长组发育一套内陆河流—三角洲—湖泊相碎屑岩系(图1),延长组长7段沉积期为最大湖泛期,大型内陆坳陷淡水湖盆的形成大面积细粒沉积发育奠定了地质基础,沉积了一套广覆式分布的富有机质泥页岩夹粉—细砂岩沉

积组合,面积广、厚度大、生烃能力强的优质烃源岩为页岩油规模富集成藏奠定了基础^[29-31]。长7段主要以半深湖—深湖亚相为主,整体发育泥质岩类沉积,地层厚度为110m左右,自上而下可细分为长7₁亚段、长7₂亚段和长7₃亚段,其中长7₃亚段沉积期为湖泊发育的鼎盛时期。

中国陆相页岩油分为夹层型、混积型、页岩型三大类^[32],鄂尔多斯盆地长7段页岩油主要发育夹层型和页岩型两大类,结合相带分布、岩性组合、源储配置等特征,进一步划分为重力流型、三角洲前缘型、纹层型、页理型4小类(表1)。聚焦4类页岩油类型,长庆油田分公司开展了为期10余年的地质理论创新和关键技术攻关研究,夹层型页岩油规模勘探开发取得革命性的突破,建成了国内第一个百万吨整装页岩油示范区,成功探索出内陆湖盆低压页岩油规模效益开发模式,成为国内非常规页岩油整装规模效益开发的先行者^[10,33-34]。

2 页岩油勘探发现

围绕长7段多类型页岩油的规模勘探评价,长庆油田分公司边攻关、边试验、边探索,持续深化地质理论认识,加大关键技术攻关,在湖盆中部发现了10×10⁸t重力流夹层型页岩油,在湖盆周边探明了1×10⁸t三角洲前缘夹层型页岩油,纹层型页岩油两口风险水平井勘探获得重要突破(图1)。

2.1 湖盆中部发现了10亿吨级庆城大油田

鄂尔多斯盆地长7段以往主要作为烃源岩进行研究,零星钻遇的油层普遍被视为无开采价值,未引起足够的重视。受美国页岩革命的影响,特别是2011年以来,通过对鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组沉积期沉积环境的恢复研究,构建了坳陷湖盆细粒沉积发育模式,创新提出“盆地周缘隆升、宽缓湖盆底形、广阔的可容纳空间”有利于在大型坳陷湖盆发

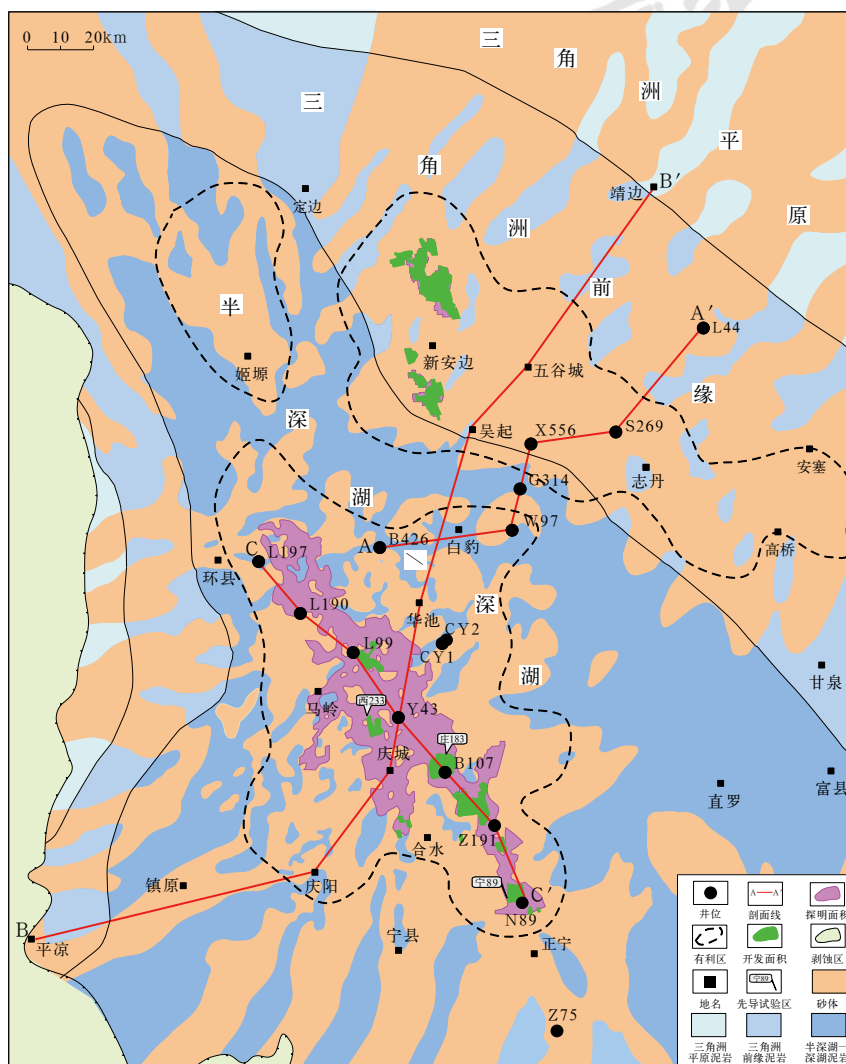


图 1 鄂尔多斯盆地长 7 段沉积相图

Fig.1 Sedimentary facies map of Chang 7 member, Ordos Basin

育大面积细粒砂质和泥质混合沉积的重要认识，明晰了湖盆深水区烃源岩和储集体互层共生关系，实现了长 7 段页岩层系从“单一烃源岩”到“源储一体”认识的重大转变，开辟了陆相页岩油勘探新领域。以地质理论创新为突破口，积极转变勘探评价思路，借鉴国外非常规油气勘探开发经验，积极开展“水平井+体积压裂”攻关，6 年时间内先后开辟了西 233、庄 183、宁 89 等 3 个先导试验区，试油区完钻的 25 口水平井平均试油产量均超百吨，经过长期试采评价，稳产形势较好，投产初期平均日产油超 10t，目前日产油近 5t，平均单井累计产油超过 2×10^4 t，其中 YP7 井累计产油超过 4×10^4 t，坚定了推进页岩油规模勘探开发的信心。2018 年以来，按照“直井控藏、水平井提产”的思路，通过

整体部署，分步实施，加快推进开发示范基地建设，实现了页岩油勘探的重大突破。2019 年，在湖盆中部发现了储量规模超 10×10^8 t 的中国最大的页岩油田——庆城油田，其中新增探明地质储量 3.58×10^8 t，新增探明和预测地质储量合计超 10×10^8 t，实现了长 7 段页岩油勘探的历史性突破。2020 年庆城油田提交探明储量 1.43×10^8 t，2021 年提交探明储量 5.50×10^8 t，庆城油田探明储量已达 10.52×10^8 t。2020 年庆城油田页岩油年产量达到 93.1×10^4 t，快速建成了百万吨页岩油规模开发区。同时，在庆城油田发现的基础上，围绕外围“甜点”开展整体部署，新落实含油面积超 2000km²。目前，陇东地区近 6000km² 有利范围得到控制，重力流夹层型页岩油整体规模储量有望达 30×10^8 t，是页岩油增储上产的现实目标。

表 1 鄂尔多斯盆地长 7 段页岩油类型划分表

Table 1 Classification of shale oil type of Chang 7 member, Ordos Basin

“甜点”类型	岩性示意图	岩性组合	砂地比/%	单砂体厚度/m	开发方式	勘探现状	代表区块
夹层型	重力流型	半深湖—深湖泥页岩夹多薄层叠置砂岩	>20 (一般小于 30)	<5	水力压裂	规模效益开发	庆城油田
	三角洲前缘型	三角洲前缘多期叠置厚层细砂岩夹泥岩	一般小于 30	5~10	水力压裂	落实规模含油富集区	新安边油田、志靖—安塞地区
页岩型	纹层型	半深湖—深湖厚层泥页岩夹薄层粉—细砂岩	5~20	2~4	水力压裂	风险勘探露出苗头	城页井组
	页理型	半深湖—深湖黑色页岩为主	<5	<2	中—低成熟度原位转化	原位转化现场试验	正 75 井区

2.2 湖盆周边探明了亿吨级新安边油田

2014 年, 在陕北姬塬地区长 7_2 亚段三角洲前缘亚相中发现了亿吨级的新安边油田, 新增探明地质储量 $1.01 \times 10^8 \text{t}$, 预测地质储量 $2.5 \times 10^8 \text{t}$ 以上, 发现

了储量规模 $3.5 \times 10^8 \text{t}$ 以上的三角洲前缘夹层型页岩油, 表明湖盆周边夹层型页岩油具有一定的勘探潜力。为进一步拓展湖盆周边侧向运聚成藏的三角洲前缘夹层型页岩油勘探目标 (图 2), 持续加大甩开勘探力度, 在陕北吴起—志丹—安塞地区新落实有利含油面积近

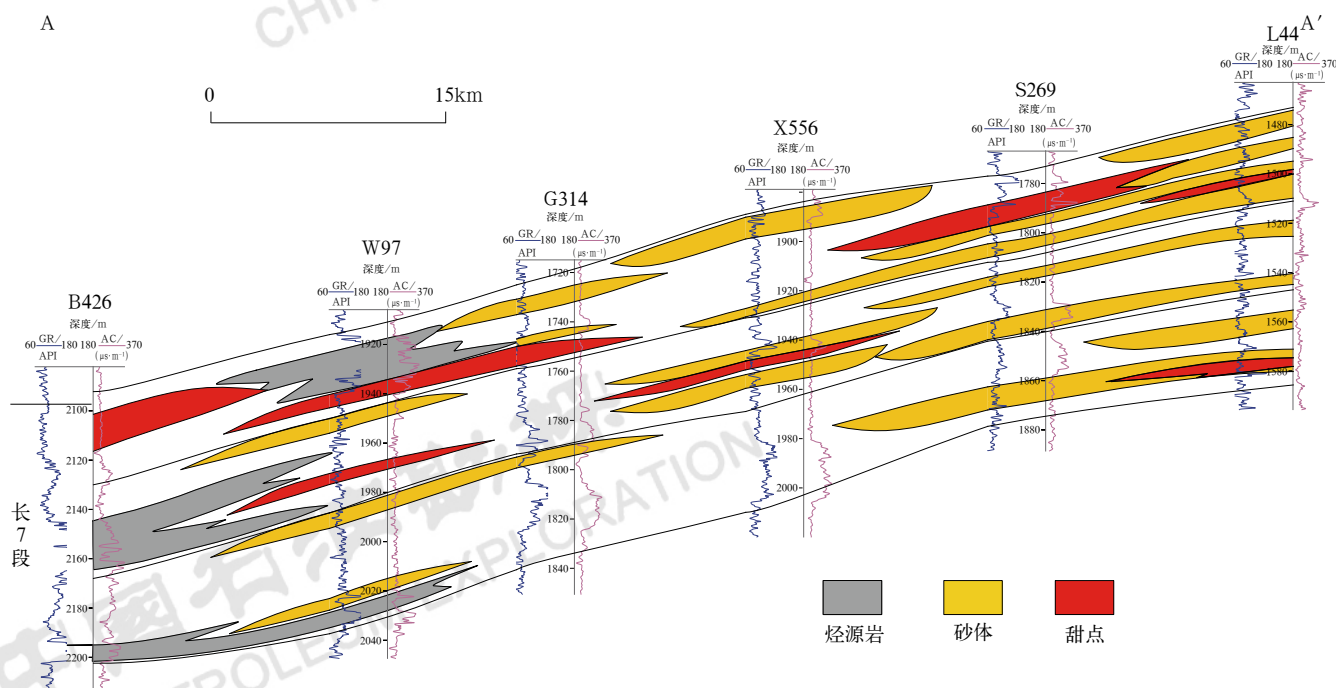


图 2 陕北地区长 7 段三角洲前缘夹层型页岩油成藏组合图 (剖面位置见图 1)

Fig.2 Shale oil accumulation pattern of delta front interlayered type of Chang 7 member in Shaanbei area (section location is in Fig.1)

2000km²,初步发现了储量规模预计近5×10⁸t的新区带,三角洲前缘夹层型页岩油勘探获得重要苗头。加上2014年在新安边地区探明的亿吨级新安边油田,陕北新安边—吴起—志丹—安塞地区在三角洲前缘末端砂体中发现有利含油面积累计达3000km²,提交探明地质储量和预测地质储量合计超3×10⁸t,总体落实10×10⁸t储量规模,是页岩油增储上产重要的后备领域。

2.3 纹层页岩型页岩油风险勘探展现出新苗头

纹层页岩型页岩油主要分布在长7₃亚段半深湖—深湖区,岩性组合以厚层泥页岩夹薄层粉—细砂岩为主,烃源岩与储集体互层共生,在异常高压的持续充注下,流动性好的油气就近持续充注,有利于形成大面积连续分布的高饱和度页岩油。在岩相特征、储集性能和烃类赋存特征等研究基础上,针对纹层页岩型页岩油开展了页岩段直井体积压裂改造试验,14口井获工业油流,突破了出油关。2019年,在华池地区东南部部署CY1井和CY2井两口水平井开展纹层页岩型页岩油风险勘探攻关试验,两口水平井试油分别获121.38t/d和108.38t/d的高产油流,有力助推了纹层页岩型页岩油的勘探进展^[35]。半深湖—深湖区厚层泥页岩夹薄层粉—细砂岩分布面积广,源储配置条件有利,成熟—高成熟($R_o > 0.7\%$)区面积约为2.6×10⁴km²,估算其远景资源量约为60×10⁸t,是页岩油下一步攻关探索的潜在领域。

3 页岩油勘探启示

3.1 大型宽缓拗陷湖盆广泛发育的细粒沉积造就了页岩油规模富集

受印支运动的影响,晚三叠世形成了东部宽缓、西部陡窄的不对称的鄂尔多斯大型宽缓内陆拗陷湖盆。延长组长7段沉积期为湖盆发育鼎盛期,形成了“面广水深”的沉积格局,湖相烃源岩大面积分布,广阔的可容纳空间为三角洲前缘及深水重力流砂体发育提供了有利条件,数量众多的微纳米级孔喉提升了砂体储集能力,为页岩油规模富集成藏提供了具先天优势的地质条件。

3.1.1 优质烃源岩为页岩油富集奠定了物质基础

火山物质蚀变、深部热液作用为生物勃发提供了丰富的营养元素,絮凝作用使有机质富集,低陆源碎

屑补偿促进有机质进一步富集,沉积后的缺氧环境有利于有机质保存,在淡水湖盆形成了超富有机质烃源岩。长7段黑色页岩面积达3.3×10⁴km²^[34],平均厚度达20m,最大厚度达60m,平均TOC为13.81%;暗色泥岩面积达5.1×10⁴km²^[34],平均厚度达25m,最大厚度达120m,平均TOC为3.75%,分布广、厚度大、有机质含量高的优质烃源岩为页岩油提供了良好的生烃物质基础。长7段烃源岩热演化程度适中(R_o 为0.7%~1.2%),平均 T_{max} 达447℃,已达成熟生油阶段,处于生油高峰期,以生成液态烃为主,优质烃源岩生烃总量约为2000×10⁸t。适中的有机质成熟度形成的源内自生自储、持续高压充注是长7段高含油饱和度页岩油富集的关键,经历快速成藏和持续充注富集两个阶段,最终含油饱和度高达70%以上。

3.1.2 多类型储集空间为页岩油聚集成藏提供了保证

受物源供给强度、坡度及水体变化控制,滑塌、砂质碎屑流、浊流等沉积在不同底形单元形成差异组合类型,在坡脚和湖底平原深水沉积区各类砂岩叠置连片分布,源内多类型优势储层大面积发育。粉—细砂岩夹层是长7段页岩油主要的储集体,通过微纳米CT、扫描电镜等手段开展储层特性定量评价,砂岩中广泛发育的粒间孔、溶蚀孔、黏土矿物晶间孔是页岩油主要的储集空间类型,储层孔喉细小,普遍发育微米孔隙和纳米喉道,孔隙半径主要集中在2~8μm,密集分布、数量众多的微纳米孔喉提升了页岩层系有效储集能力(图3),多类型的储集空间是长7段页岩油规模成藏、甜点高产的核心。

3.1.3 深水区广泛发育的砂质沉积构成了页岩油的勘探甜点

长7段沉积期整体以半深湖—深湖沉积为主,受古气候、古地形、古水深有利因素控制,西南陡坡带、湖盆中部等发育重力流沉积,东北缓坡带以三角洲沉积为主,不同区域沉积了不同类型的砂体,是页岩油勘探的有利目标(图4)。

由长7₃亚段沉积期至长7₁亚段沉积期,湖盆经历了从鼎盛到逐渐萎缩的过程,在不同演化时期沉积了不同类型的砂体。长7₃亚段泥页岩大面积分布,湖盆中部发育少量重力流砂质沉积;长7₂亚段湖盆中部发育重力流沉积砂体,周边发育小规模三角洲沉积;长7₁亚段砂体规模进一步增大,形成了大面积复合连片的沉积砂体。

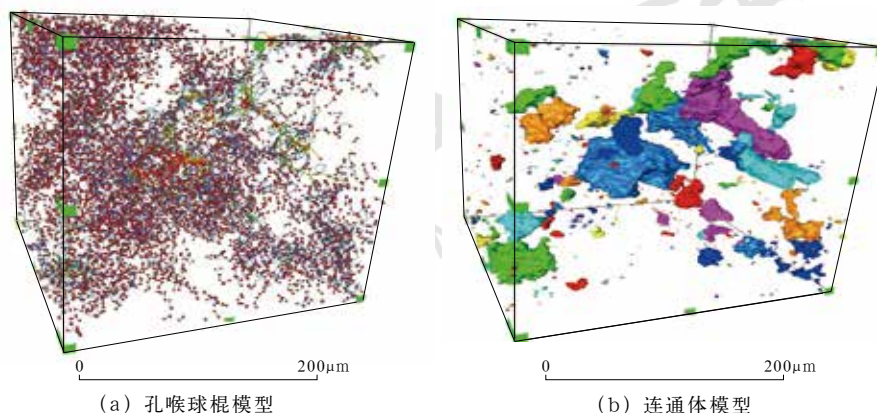


图3 鄂尔多斯盆地CY1井长7段砂岩储层三维孔喉分布特征

Fig.3 3D pore-throat distribution of sandstone reservoir of Chang 7 member in Well CY1 in Ordos Basin

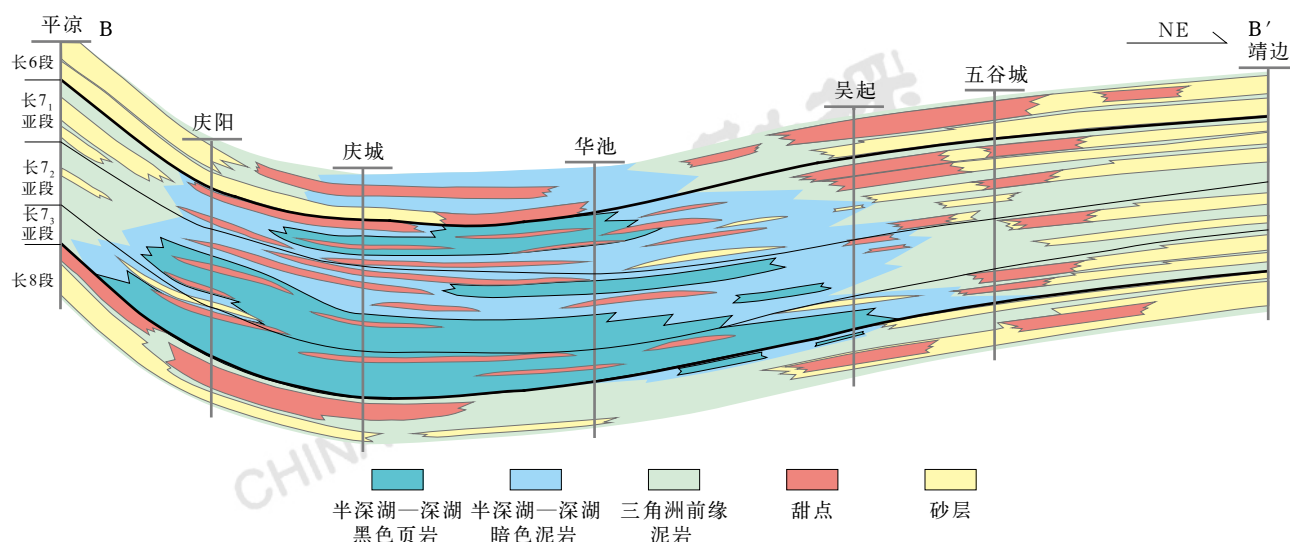


图4 鄂尔多斯盆地页岩油砂质岩夹层甜点示意图 (剖面位置见图1)

Fig.4 Schematic diagram of sandy interlayer sweet spots of shale oil in Ordos Basin (section location is in Fig.1)

3.2 形成的勘探关键技术系列是规模储量发现的重要保障

经历10余年的勘探技术攻关探索,针对长7段页岩油已经形成一系列相对成熟的勘探配套技术,为长庆油田分公司页岩油规模发现和效益开发提供了重要技术保证。

3.2.1 攻关形成黄土山地三维地震技术,实现页岩油甜点的有效预测

鄂尔多斯盆地黄土塬地区经过长期剥蚀、切割,形成了复杂多变的沟、塬、梁、茆、坡等地形,黄土塬具有对地震信号的强吸收衰减、地表地形高差大及障碍物复杂等特点,是公认的地震勘探难区。针对巨

厚黄土塬地震采集难点,通过多年地震持续攻关,首创了黄土塬地区高精度可控震源与井炮联合激发(炮震混采)、无线节点接收的宽方位三维地震采集方法,创新研制了高通过性可控震源BV330CQ地震激发装备,发明了适用于黄土塬地貌的气动钻机,突破了黄土塬三维地震采集技术瓶颈,作业效率提高3倍,获得了高品质、宽频带、宽方位三维地震资料,单炮记录视主频由20Hz提高到30Hz。创新了超深层微测井变网格约束层析静校正、黄土层衰减补偿、超级螺旋道集优化、五域处理和叠前Q深度偏移成像等黄土塬宽方位处理技术,有效解决了黄土塬地区地震波衰减严重、信噪比低的技术难题,处理后分方位角、分偏移距资料保真度高,目的层成像精度高,成果资

料主频达到45Hz。地震品质较以往二维地震资料大幅度提升,砂体识别精度由15m提升至5m^[10,36]。集成研发了井控变速建模、工程力学参数预测、井震多属性融合概率甜点评价及水平井轨迹实时导向等五维地震解释技术,指导庆城油田三维区开发水平井部署与随钻分析,甜点区预测符合率达85%,水平井有效储层钻遇率提高15%。

3.2.2 创新页岩油测井精细评价技术,提高了甜点识别精度

针对页岩油测井评价面临的关键问题,建立了以微纳米孔隙评价为核心的非常规测井采集模式,形成了储层品质、烃源岩品质、工程力学品质定量解释的“三品质”评价技术系列,可实现页岩油地质甜点和工程甜点的测井综合评价,有效支撑长7₁亚段、长7₂亚段夹层型页岩油甜点优选^[10]。结合细粒沉积岩矿分析,重新刻度了岩性扫描测井中元素与矿物含量的转化系数,提高了岩石矿物组分含量计算精度,建立了基于测井 $M-N$ (M 是声波—密度交会图上骨架点与水点连线的斜率; N 是中子—密度交会图上骨架点与水点连线的斜率)交会的常规测井资料泥质含量定量计算方法,消除了干酪根的影响,测井岩性剖面计算精度大幅提高,岩性识别准确率达到80%以上,并且有效识别出长7₃亚段烃源岩内部的薄层砂质甜点,为纹层页岩型页岩油风险勘探井位部署提供了依据。

3.2.3 形成页岩油丛式水平井防塌优快钻完井技术

创新形成以空间圆弧剖面设计方法+高增斜钻具组合+强抑制防塌钻井液为核心的水平井优快钻井技术,系统应用在庆城油田百万吨开发示范区建设中,最大偏移距达到800m以上,降低了钻摩阻扭矩,平均钻井速度提高20%,平均钻井周期由29天缩短至18天;通过优选高分子黏性堵漏剂,形成强抑制防塌堵漏钻井液体系,有效解决洛河组漏失、直罗组坍塌问题,井身结构由三开优化为浅表层二开井身结构,实现安全钻井;研发的球型化可变型材料、聚丙烯纤维等水泥添加剂,实现水泥浆增韧、增强,弹性模量显著降低,抗压强度大幅提高,水平井固井优质率由75%提高至90%。

3.2.4 构建水平井“超前蓄能、细分切割”体积压裂技术

为提高单井产量和储量动用程度,针对长7段脆性指数和地层压力系数低、复杂裂缝系统形成难度大问题,压裂增产突破传统理念束缚,水平井改

造由早期分段压裂向分段多簇压裂再向细分切割体积压裂转变,形成以“细分切割提高缝控程度、超前蓄能提高地层能量、渗吸驱油提高采出程度”为特色的长水平段细分切割体积压裂技术体系。以“接触面积最大、渗流距离最短、累计产量最高”为目标,综合复杂裂缝扩展、油藏工程及数值模拟方法优化裂缝间距5~10m,通过增加裂缝密度,微地震事件覆盖程度达90%以上。为满足压裂造缝和补充能量两方面需求,综合数值模拟和矿场实践,进液强度增至20~25m³/m,地层压力系数由原始的0.8提高至1.3,超前补能将页岩油产量年递减率由40%~50%降至30%以下。针对长7段储层微纳米孔喉数量众多,利用其自发渗吸特性,自主研发高效渗吸改善剂,将微孔、纳米孔中不可动油部分置换为可动油,降低剩余油饱和度,发挥存地液最大功效,预测采出程度提高2~3个百分点。

4 页岩油资源潜力与攻关方向

4.1 半深湖—深湖沉积区,扩大重力流夹层型页岩油勘探发现

以庆城油田为代表的湖盆中部重力流夹层型页岩油是增储上产的现实目标,半深湖—深湖沉积区具有与庆城油田相似地质条件,有望形成新的规模含油富集区(图5)。在庆城油田发现的基础上,通过系统开展甜点主控因素研究,明确甜点分布规律并开展部署,落实新的含油面积。“十四五”期间,围绕储量升级和扩大新发现,整体部署,加快实施三维地震,加强有利区与庆城油田储量关键参数对标分析,加大湖盆深水区勘探评价力度,部署直井落实有利含油面积,在低井控、低试油区部署水平井评价产能,持续开展理论创新与关键技术攻关,扩大重力流夹层型页岩油规模含油富集区。

4.2 三角洲前缘沉积区,开拓夹层型页岩油新领域

湖盆周边的三角洲前缘夹层型页岩油主要以三角洲前缘末端砂体为主,有利面积约3000km²,预计储量规模可达10×10⁸t,是长7段页岩油稳产上产的后备领域。在湖盆周边页岩油新领域,开展沉积相、砂体展布、油藏特征等研究,明确湖盆周边页岩油新领域油藏分布;在低井控、低试油率区开展水平井攻关,加快组织实施水平井试油,积极开拓三角洲前缘夹层型页岩油勘探新领域。

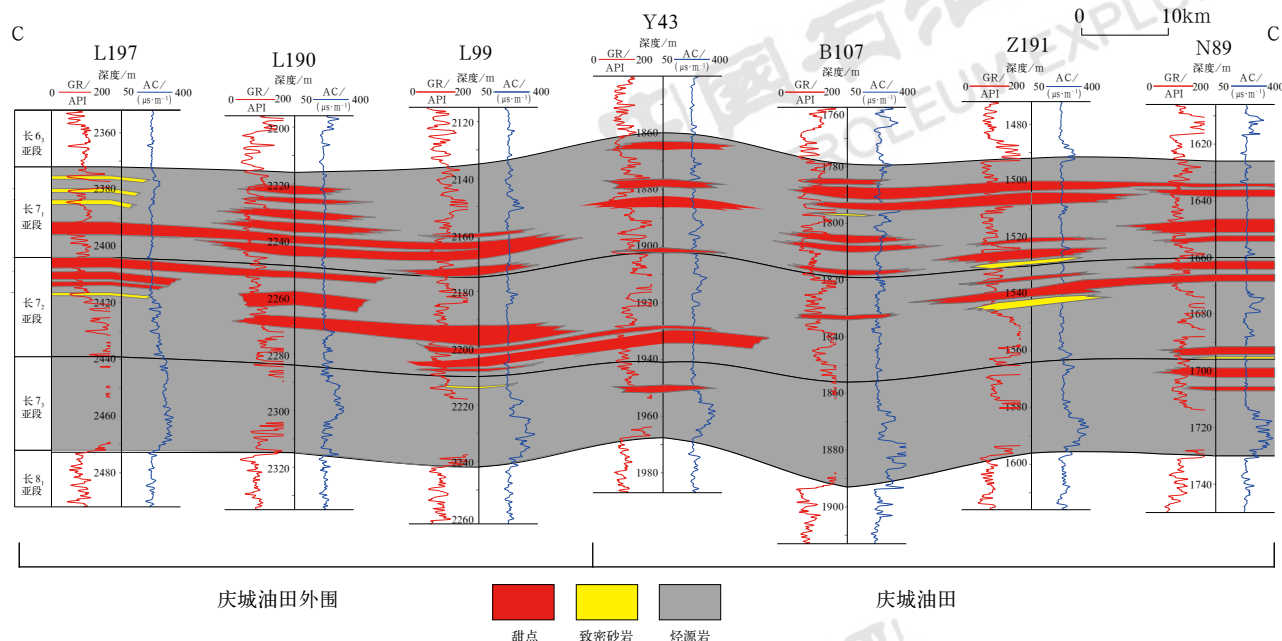


图5 庆城油田及其外围油藏剖面图(剖面位置图1)

Fig.5 Reservoir profile of Qingcheng Oilfield and its periphery (section location is in Fig.1)

4.3 深湖泥页岩沉积区, 积极探索页岩型页岩油勘探潜力

鄂尔多斯盆地中—高成熟度纹层页岩型页岩油面积约 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 资源潜力大。“十四五”期间, 继续加快推进纹层页岩型页岩油风险勘探, 深化细粒沉积模式、甜点主控因素研究, 建立纹层页岩型页岩油甜点评价标准。加强三维地震薄层粉—细砂岩预测、测井甜点识别及评价研究。针对长 7_3 亚段纹层页岩型页岩油, 开展立体化压裂改造试验研究, 深入剖析复杂性储集体在不同条件下人工裂缝起裂控制机理和延伸扩展规律, 明确主控因素并建立表征参数体系, 攻克砂岩—泥岩—页岩互层支撑剂充填困难、压裂液渗吸置换作用不明显等瓶颈问题, 建立适合纹层页岩型页岩油开发的试采制度, 确保油水渗吸置换充分, 控水增油。

地下原位加热转化技术是有望实现中—低成熟度页岩型页岩油资源有效开发利用的关键技术^[5-6,37], 基于原位加热转化技术对中—低成熟度页岩型页岩油进行评价, 中国页岩油原位转化资源潜力巨大。对比发现, 中国陆相盆地中鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩油原位转化的现实性最好^[37]。“十四五”期间, 将持续探索原位转化油气生成与产出机理, 建立热流固三场耦合和固液气三相耦合理论模型, 加快关键技术设备引进, 推动现场实施进展。

“十三五”期间, 利用超前蓄能、细分切割体积压裂技术人工造缝, 长庆油田实现了夹层型页岩油规模效益开发, “十四五”期间页岩油地下原位转化如能实现突破, 将有望实现夹层型页岩油和页岩型页岩油立体一体化开发模式, 提高页岩油潜在资源量的有效动用(图6)。

5 结语

“十三五”期间, 长庆油田分公司依靠地质理论创新明确了长7段多类型页岩油规模富集成藏的地质条件, 形成的配套技术为页岩油效益开发提供了重要的技术保障。夹层型页岩油储量规模达 $40 \times 10^8 \text{ t}$, 是近期长时间内增储上产的现实目标; 纹层页岩型页岩油有望成为页岩油增储上产重要的接替目标。

“十四五”期间, 长庆油田分公司将围绕页岩油富集机理、多学科“甜点”综合评价和压裂增产等关键理论和技术问题, 加强顶层设计, 统筹规划, 通过地质、地震、测井、储层改造等多学科联手, 创新内陆湖盆低压页岩油勘探理论和配套技术; 继续扩大庆城油田的勘探成果, 加强庆城油田外围勘探, 落实规模含油富集区; 积极拓展盆地周边三角洲前缘夹层型页岩油新领域, 开拓新的含油富集区; 持续加大科研攻关力度, 积极探索页岩型页岩油新类型, 为长庆油田二次加快发展和国家能源安全提供保障。

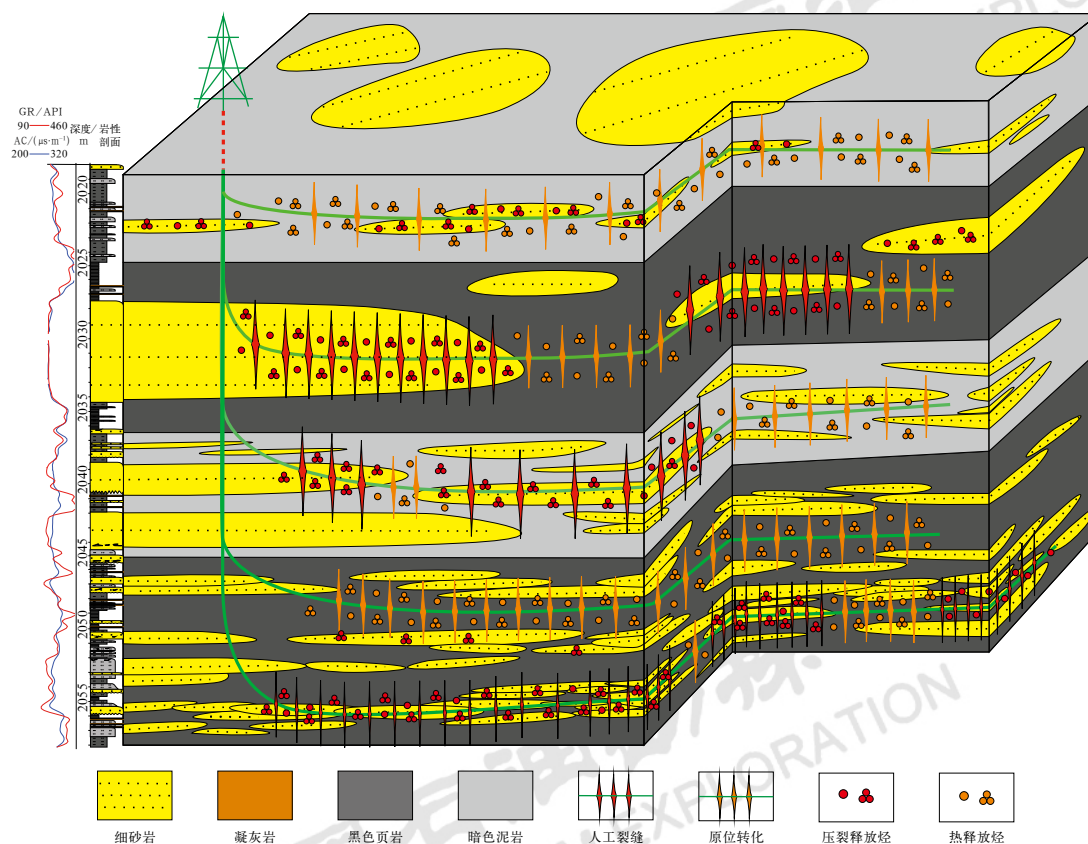


图6 长庆油田夹层型页岩油和页岩型页岩油立体一体化开发模式图

Fig.6 Diagram of integrated stereoscopic development model of interlayered type and shale type shale oil in Changqing Oilfield

参考文献

- [1] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020,41(1):1-12.
Zou Caineng, Pan Songqi, Jing Zhenhua, *et al.* Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020,41(1):1-12.
- [2] 聂海宽, 张培先, 边瑞康, 等. 中国陆相页岩油富集特征[J]. 地学前缘, 2016,23(2):55-62.
Nie Haikuan, Zhang Peixian, Bian Ruikang, *et al.* Oil accumulation characteristics of China continental shale[J]. Earth Science Frontiers, 2016,23(2):55-62.
- [3] 王倩茹, 陶士振, 关平. 中国陆相页岩油研究及勘探开发进展[J]. 天然气地球科学, 2020,31(3):417-427.
Wang Qianru, Tao Shizhen, Guan Ping. Progress in research and exploration & development of shale oil in continental basins in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2020,31(3):417-427.
- [4] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020,47(1):1-10.
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua, *et al.* Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020,47(1):1-10.
- [5] 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.
- [6] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):560-568.
Du Jinhu, Hu Suyun, Pang Zhenglian, *et al.* The types, potentials and prospects of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):560-568.
- [7] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):1-13.
Li Guoxin, Zhu Rukai. Progress, challenges and key issues in the unconventional oil and gas development of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):1-13.
- [8] 许坤, 郑冬冬, 林爽. 促进中国油气勘探开发对策探讨[J]. 石油科技论坛, 2019,38(6):6-14.
Xu Kun, Zheng Dongdong, Lin Shuang. Discussion of counter-measures for promotion of China's oil and gas exploration and development[J]. Oil Forum, 2019,38(6):6-14.

- [9] 张国生, 王小林, 朱世佳. “十四五”我国油气发展路径选择[J]. 石油科技论坛, 2020,39(6):7-12.
Zhang Guosheng, Wang Xiaolin, Zhu Shijia. China's option for oil and gas development path in 14th Five-Year Plan period[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(6):7-12.
- [10] 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.
- [11] 许琳, 常秋生, 冯玲丽, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层特征及控制因素[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):649-660.
Xu Lin, Chang Qiusheng, Feng Lingli, *et al.* The reservoir characteristics and control factors of shale oil in Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):649-660.
- [12] 高阳, 叶义平, 何吉祥, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油开发实践[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):133-141.
Gao Yang, Ye Yiping, He Jixiang, *et al.* Development practice of continental shale oil in the Jimsar Sag in the Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):133-141.
- [13] 王玉华, 梁江平, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油资源潜力及勘探方向[J]. 大庆石油地质与开发, 2020,39(3):20-34.
Wang Yuhua, Liang Jiangping, Zhang Jinyou, *et al.* Resource potential and exploration direction of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020,39(3):20-34.
- [14] 周立宏, 赵贤正, 柴公权, 等. 陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践:以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例[J]. 石油勘探与开发, 2020,47(5):1059-1066.
Zhou Lihong, Zhao Xianzheng, Chai Gongquan, *et al.* Key exploration & development technologies and engineering practice of continental shale oil: a case study of member 2 of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020,47(5):1059-1066.
- [15] 赵贤正, 周立宏, 赵敏, 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 Xianzheng, Zhou Lihong, Zhao Min, *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.
- [16] 李浩, 陆建林, 王保华, 等. 陆相页岩油富集高产关键因素分析[J]. 现代地质, 2020,34(4):837-848.
Li Hao, Lu Jianlin, Wang Baohua, *et al.* Critical controlling factors of enrichment and high-yield of land shale oil[J]. Geoscience, 2020,34(4):837-848.
- [17] 付锁堂, 姚泾利, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组陆相页岩油富集特征与资源潜力[J]. 石油实验地质, 2020,42(5):698-710.
Fu Suotang, Yao Jingli, Li Shixiang, *et al.* Enrichment characteristics and resource potential of continental shale oil in Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020,42(5):698-710.
- [18] 黎茂稳, 金之钧, 董明哲, 等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J]. 石油实验地质, 2020,42(4):489-505.
Li Maowen, Jin Zhijun, Dong Mingzhe, *et al.* Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020,42(4):489-505.
- [19] 邱振, 卢斌, 施振生, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油滞留聚集机理及资源潜力探讨[J]. 天然气地球科学, 2016,27(10):1817-1827.
Qiu Zhen, Lu Bin, Shi Zhensheng, *et al.* Residual accumulation and resource assessment of shale oil from the Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(10):1817-1827.
- [20] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盆地相区页岩油富集理论、勘探技术及前景:以渤海湾盆地黄骅凹陷古近系为例[J]. 石油学报, 2021,42(2):143-162.
Zhao Xianzheng, Pu Xiugang, Zhou Lihong, *et al.* Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: a case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021,42(2):143-162.
- [21] 匡立春, 侯连华, 杨智, 等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J]. 石油学报, 2021,42(1):1-14.
Kuang Lichun, Hou Lianhua, Yang Zhi, *et al.* Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021,42(1):1-14.
- [22] 金旭, 李国欣, 孟思炜, 等. 陆相页岩油可动性微观综合评价[J]. 石油勘探与开发, 2021,48(1):222-232.
Jin Xu, Li Guoxin, Meng Siwei, *et al.* Microscale comprehensive evaluation of continental shale oil recoverability[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021,48(1):222-232.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 页岩油地质评价方法: GB/T 38718—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Geological evaluating methods for shale oil: GB/T 38718—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [24] 石林, 张鲲鹏, 慕立俊. 页岩油储层压裂改造技术问题的讨论[J]. 石油科学通报, 2020,5(4):496-511.
Shi Lin, Zhang Kunpeng, Mu Lijun. Discussion of hydraulic fracturing technical issues in shale oil reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020,5(4):496-511.
- [25] 刘合, 匡立春, 李国欣, 等. 中国陆相页岩油完井方式优选的思考与建议[J]. 石油学报, 2020,41(4):489-496.
Liu He, Kuang Lichun, Li Guoxin, *et al.* Considerations and suggestions on optimizing completion methods of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020,41(4):489-496.
- [26] 吴宝成, 李建民, 邬元月, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组

- 页岩油上甜点地质工程一体化开发实践[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5):679-690.
- Wu Baocheng, Li Jianmin, Wu Yuanyue, *et al.* Development practices of geology-engineering integration on upper sweet spots of Lucaogou Formation shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5):679-690.
- [27] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(5):15-20.
- Zhao Zhenyu, Guo Yanru, Wang Yan, *et al.* Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(5):15-20.
- [28] 李士祥, 牛小兵, 柳广弟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩油形成富集机理[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4):719-729.
- Li Shixiang, Niu Xiaobing, Liu Guangdi, *et al.* Formation and accumulation mechanism of shale oil in the 7th member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4):719-729.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 崔景伟, 朱如凯, 范春怡, 等. 页岩层系油气资源有序共生及其勘探意义:以鄂尔多斯盆地延长组长7页岩层系为例[J]. 地质通报, 2019, 38(6):1052-1061.
- Cui Jingwei, Zhu Rukai, Fan Chunyi, *et al.* Oil and gas resources of shale formation orderly accumulation and coexistence as well as its prospecting significance: a case study of Chang 7 shale formation in Ordos Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(6):1052-1061.
- [32] 焦方正, 邹才能, 杨智. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6):1067-1078.
- Jiao Fangzheng, Zou Caineng, Yang Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6):1067-1078.
- [33] 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5):601-614.
- Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Dan Weidong, *et al.* The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang 7 member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5):601-614.
- [34] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5):870-883.
- Fu Jinhua, Li Shixiang, Niu Xiaobing, *et al.* Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5):870-883.
- [35] 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.
- [36] 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(1):67-77.
- Fu Suotang, Wang Daxing, Yao Zonghui. 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(1):67-77.
- [37] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4):537-545.
- Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua. Connotation and strategic role of in-situ conversion processing of shale oil underground in the onshore China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4):537-545.