

引用: 付金华, 董国栋, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术 [J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 19-40.

Fu Jinhua, Dong Guodong, Zhou Xinping, et al. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 19-40.

# 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术

付金华<sup>1,2</sup> 董国栋<sup>2,3</sup> 周新平<sup>2,3</sup> 惠 潇<sup>2,3</sup> 谈卫东<sup>2,3</sup> 范立勇<sup>2,3</sup> 王永刚<sup>2,3</sup>

张海涛<sup>2,3</sup> 古永红<sup>2,3</sup> 周国晓<sup>2,3</sup>

(1 中国石油长庆油田公司; 2 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室;

3 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院)

**摘 要:** 鄂尔多斯盆地是我国第二大沉积盆地, 油气资源丰富, 勘探前景广阔, 是我国近20年来石油天然气储量、产量增长最快的盆地, 目前已成为我国第一大油气生产盆地和第一大天然气产区。长庆油田通过50多年的攻关研究, 创新发展了“陆相淡水湖盆页岩油、内陆拗陷湖盆大型三角洲、侏罗系古地貌油藏群、陆相致密砂岩气、奥陶系岩溶古地貌天然气”等5项油气地质认识, 形成了“黄土塬三维地震勘探、低渗透致密油气层测井识别与评价、低渗一致密储层体积压裂”等三大技术系列, 发现了4个10亿吨级大油区和3个万亿立方米大气区, 为保障国家能源资源安全做出重要贡献, 同时对国内外其他类似盆地的勘探提供了重要经验与借鉴。

**关键词:** 鄂尔多斯盆地; 长庆油田; 石油; 天然气; 地质认识; 技术创新; 勘探成果

**中图分类号:** TE122.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.03.003

## Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin

Fu Jinhua<sup>1,2</sup>, Dong Guodong<sup>2,3</sup>, Zhou Xinping<sup>2,3</sup>, Hui Xiao<sup>2,3</sup>, Dan Weidong<sup>2,3</sup>, Fan Liyong<sup>2,3</sup>, Wang Yonggang<sup>2,3</sup>,  
Zhang Haitao<sup>2,3</sup>, Gu Yonghong<sup>2,3</sup>, Zhou Guoxiao<sup>2,3</sup>

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

**Abstract:** Ordos Basin is the second largest sedimentary basin in China, which has abundant oil and gas resources and broad exploration prospect. In recent two decades, growth in oil and gas reserves and production is the fastest in Ordos Basin, and now it is the largest oil and gas producing basin and the largest natural gas producing region in China. Through more than 50 years of research, Changqing Oilfield has innovated five petroleum geological understandings, including “shale oil of continental freshwater lake basin, large delta of inland depression lake basin, Jurassic paleogeomorphic oil reservoir group, continental tight sandstone gas, and Ordovician karst paleogeomorphic natural gas”. Moreover, three technology series have been developed in terms of “3D seismic exploration in loess plateau, logging identification and evaluation technology of low-permeability tight oil and gas layers, and volume fracturing of low-permeability tight reservoir”. As a result, four

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05047-001); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“长庆油田5000万吨持续高效稳产关键技术研究与应用”(2016E-05-02)。

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, 邮政编码: 710018。E-mail: fjh\_cq@petrochina.com.cn

通信作者简介: 董国栋(1986-), 男, 山东泰安人, 硕士, 2012年毕业于中国石油大学(北京), 工程师, 现从事油气地质综合研究及天然气勘探部署工作。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: donggd1\_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2020-12-31; 修改日期: 2021-04-28

billion-ton-level large oil regions and three trillion-cubic-meter-level large gas regions have been discovered, contributing a lot to the national energy and resource security and providing important experience and reference for the exploration of similar basins at home and abroad.

**Key words:** Ordos Basin, Changqing Oilfield, petroleum, natural gas, geological understanding, technological innovation, exploration result

## 0 引言

在长庆油田跨越油气当量  $6000 \times 10^4 \text{t}$  之际,回顾其 50 年来在鄂尔多斯盆地油气勘探开发的科技历程,创新形成了独特的低渗透油气勘探开发理论体系与先进实用技术系列。早在 20 世纪 70 年代,从“构造找油”到侏罗系“古地貌控油”勘探思路的转变,相继发现了马岭、华池、元城等油田,迎来盆地第一个石油储量增长期。八九十年代,石油勘探层系由侏罗系转移至三叠系,在陆相湖盆三角洲成藏理论指导下,发现了安塞、靖安等亿吨级油田。以 70 年代末引入煤成气理论为起点,天然气勘探由盆地周边转向腹地,创新了碳酸盐岩岩溶古地貌、海相三角洲成藏认识,指导米脂、靖边、榆林等超千亿立方米气田的发现。进入 21 世纪,提出了三叠系多层系复合成藏、湖盆中部重力流复合控砂等重要地质认识,指导了西峰、姬塬、华庆等亿吨级大油田的发现;天然气勘探在上古生界大面积致密砂岩气成藏认识指导下发现了万亿立方米的整装苏里格气田。近年来,在加大非常规资源勘探背景下,创新了陆相淡水湖盆源内非常规页岩油规模富集的地质认识,新发现了 10 亿吨级的庆城页岩油大油田。长庆油田油气储量的不断增长,离不开勘探理论体系的完善与实用技术系列的应用,因此,通过系统回顾这一历程,总结以往的认识与经验,为下一步勘探工作指明方向。

## 1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部,面积约  $37 \times 10^4 \text{km}^2$ 。根据现今构造发育特征可将其划分为伊盟隆起、西缘冲断带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带和渭北隆起 6 个构造单元<sup>[1]</sup>。它为一个大型多旋回克拉通盆地,在太古宙—古元古代形成的结晶基底之上,经历了中—新元古代拗拉谷、早古生代浅海台地、晚古生代近海平原、中生代内陆湖盆和新生代周边断陷五大沉积演化阶段<sup>[2]</sup>。

固结于古元古代末的结晶基底依次被中元古界长城系碎屑岩和蓟县系碳酸盐岩覆盖;中元古代末的蓟县运动使华北克拉通普遍上升,缺失青白口系,震旦系仅分布于华北克拉通西南缘<sup>[3]</sup>。早古生代鄂尔多斯

地块处于陆表海环境,沉积了以碳酸盐岩为主的寒武系和中、下奥陶统,内部发育一个“L”形的庆阳隆起。中奥陶世末加里东运动造成盆地全面抬升,为东倾大斜坡,经历了长达 140Ma 的沉积间断与风化剥蚀,缺失志留系、泥盆系和下石炭统,形成奥陶系风化壳岩溶古地貌气藏<sup>[4-5]</sup>。晚石炭世华北海和祁连海从东西两侧发生海侵,盆地持续沉降,沉积了海相和海陆交互的上石炭统和下二叠统太原组、山西组煤系地层;中—晚二叠世海水完全退出,发育内陆湖盆—三角洲沉积体系,广覆式生烃的煤系烃源岩与大面积分布的致密砂岩储层相互叠置形成上古生界致密砂岩气藏<sup>[6-7]</sup>。晚印支运动结束了南海北陆的古地貌格局,中生代演化为内陆坳陷盆地。上三叠统延长组沉积期经历了一期湖盆演化的全过程,其中长 7 段沉积期为最大湖泛期,为富有机质泥页岩及三角洲—重力流细粒砂岩建造,富集了丰富的页岩油资源<sup>[8]</sup>;同时,长 6 段、长 7 段沉积期盆地周缘构造活动致使湖盆中部重力流—牵引流复合控砂<sup>[9]</sup>,长 8 段沉积期发育河流三角洲沉积<sup>[10]</sup>,有利于形成大型低渗透岩性大油区<sup>[11]</sup>。印支运动末期盆地再度隆升,延长组遭受长期侵蚀,形成沟谷纵横、残丘广布的古地貌,从而控制侏罗系原油成藏<sup>[12]</sup>(图 1)。

## 2 主要地质研究进展

鄂尔多斯盆地为典型的隐蔽性岩性油气藏,具有“低渗、低压、低产”的特点,其成藏主控因素更加复杂,勘探难度更大。近年来,长庆油田不断深化综合地质研究,强化技术攻关,创新发展了“5 项油气地质认识”,推动油气勘探不断取得新突破,有力支撑了油气产量快速攀升及持续稳产。

### 2.1 陆相淡水湖盆页岩油成藏认识

鄂尔多斯盆地晚三叠世发育典型的大型内陆坳陷湖盆,长 7 段沉积期处于最大湖泛期,湖广水深,整体发育了一套大面积分布的富有机质泥页岩与砂岩沉积(图 2),砂质岩粒度大多在 0.125mm 以下,为粉—细砂岩。广覆式富有机质页岩与细粒砂质沉积紧密接触或互层共生,发育典型的陆相页岩油。页岩油赋存于长 7 段烃源岩层系内,黑色页岩厚度为 15~25m,

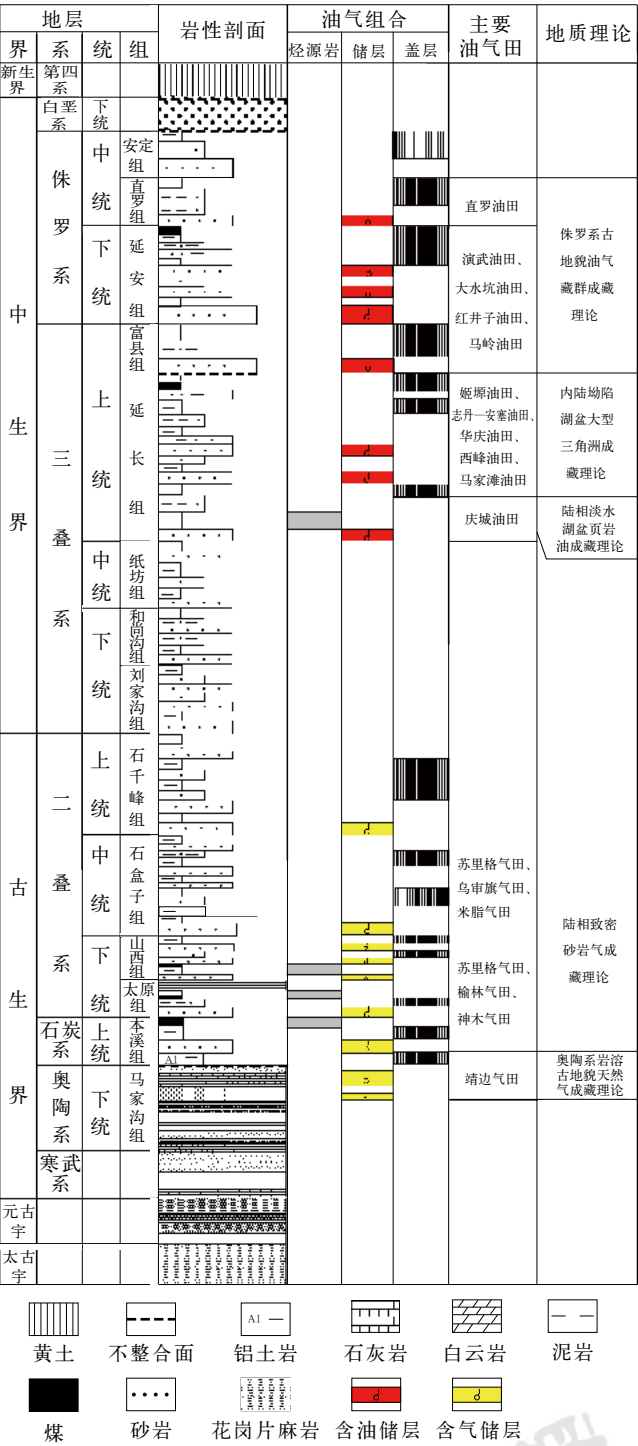


图 1 鄂尔多斯盆地油气地质层综合柱状图  
Fig.1 Comprehensive hydrocarbon bearing stratigraphic column in the Ordos Basin

单砂体厚度平均为 3.5m，砂地比平均为 17.8%，需要水平井体积压裂开发<sup>[13]</sup>。近年来，通过不断深化优质烃源岩富有机质成因机理、深湖区大面积富砂成因机制及油藏成藏富集机理研究，页岩油勘探取得了突破性进展。

(1) 长 7 段泥页岩层系具备优质烃源岩条件。

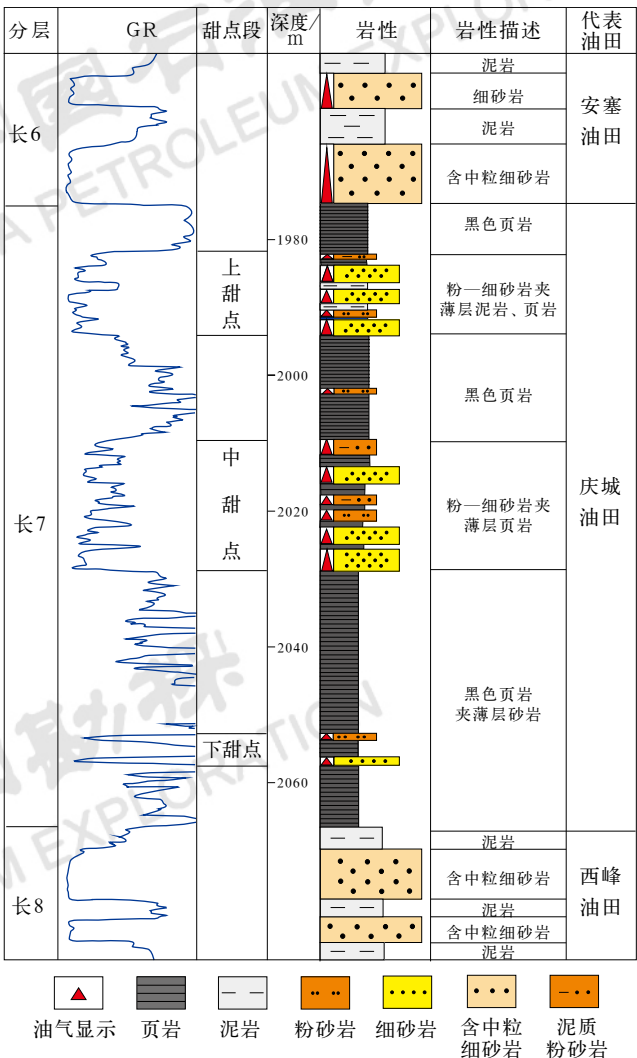


图 2 鄂尔多斯盆地长 7 段页岩油岩性综合柱状图  
Fig.2 Comprehensive lithology histogram of Chang 7 shale oil in the Ordos Basin

长 7 段泥页岩层系发育黑色页岩、暗色泥岩两类烃源岩。黑色页岩有机质类型主要为 I 型和 II<sub>1</sub> 型，有机质丰度高，TOC 主要为 6%~26%，平均为 13.81%，有机质呈纹层状分布；暗色泥岩有机质类型主要为 II<sub>1</sub> 型和 II<sub>2</sub> 型，有机质丰度较高，TOC 主要为 2%~6%，平均为 3.75%，有机质呈分散状、团块状分布。富有机质泥页岩热演化程度适中，R<sub>o</sub> 主要介于 0.7%~1.2%，处于生油高峰期，以生成液态烃为主，并含有大量伴生气<sup>[14]</sup>。火山物质蚀变作用与深部热液活动等为生物提供丰富的营养元素，促使生物勃发，形成高生产力<sup>[15]</sup>。低陆源碎屑补偿促进有机质富集，沉积后的缺氧环境有利于有机质保存，因此，有机质丰度高。

(2) 深水区广泛发育的砂质沉积构成页岩油勘探甜点。

在相对较陡的古地形基础上,因受频繁的古构造事件控制,陡坡带形成的大面积重力流砂体发育砂质碎屑流、浊流、滑塌沉积等沉积微相;另外,湖盆广阔的可容纳空间有利于深水重力流沉积的发育,多层粉—细砂岩砂体叠置形成有利甜点区<sup>[16]</sup>。夹持于泥页岩中的薄砂岩储层孔喉尺度小,孔隙半径分布在 $2\sim 8\mu\text{m}$ ,喉道半径为 $20\sim 150\text{nm}$ ,小尺度孔隙数量众多。纳米级喉道连通微米级孔隙形成众多簇状复杂的孔喉单元,有利于形成人工压裂体。

(3) 源内自生自储促使页岩油高强度富集。

盆地长7段页岩油成藏经历了快速成藏和持续高压充注两个阶段。快速成藏期优先充注较大孔隙,储层中含油饱和度呈快速增长;持续高压充注期充注大量微小孔隙,含油饱和度缓慢增长,最终高达70%以上<sup>[17-18]</sup>。基于以上地质认识,构建了长7段页岩油“超富有机质供烃、深水区规模富砂、微纳米孔喉共储、高强度持续充注”的成藏模式(图3)。

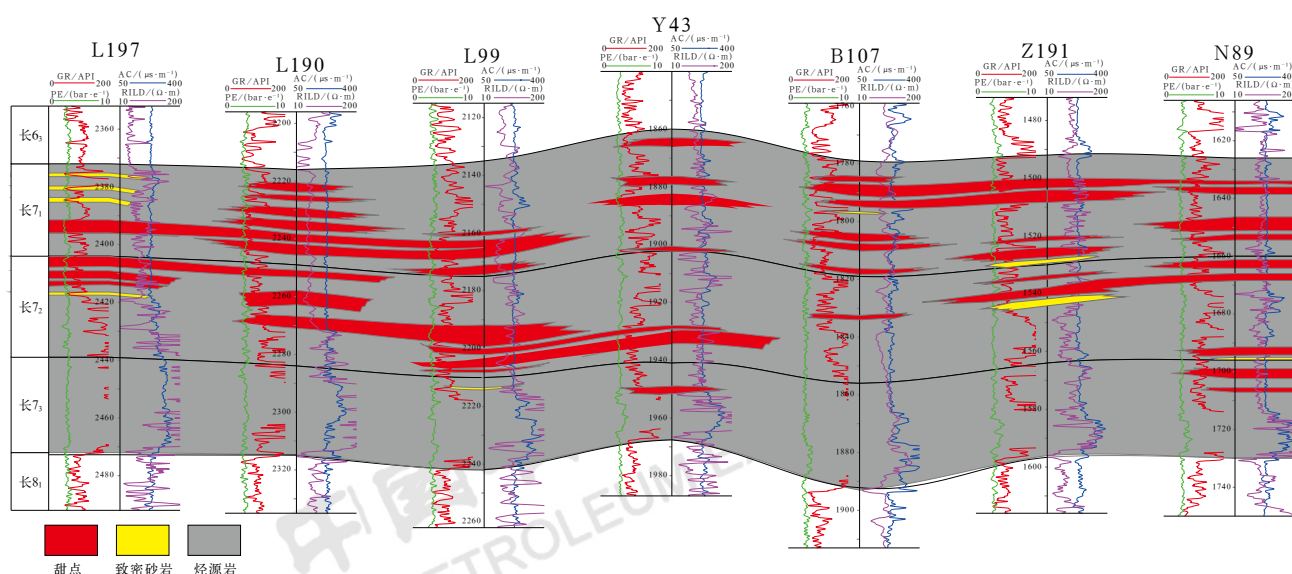


图3 庆城油田延长组长7段成藏组合图

Fig.3 Chang 7 oil reservoir assemblage correlation map of Yanchang Formation in Qingcheng Oilfield

通过实施整体规模勘探,发现了超10亿吨级的庆城大油田,在盆地落实了陇东、陕北两大含油富集区。陆相淡水湖盆大型源内非常规石油成藏认识的创新,实现了长7段泥页岩层系从“单一烃源岩”到“源储一体”认识的重大转变,推动了长7段油藏勘探的重大突破。拓展有利勘探区带 $1.68\times 10^4\text{km}^2$ ,初步评价长7段页岩油规模储量 $(30\sim 50)\times 10^8\text{t}$ ,远景资源量约 $100\times 10^8\text{t}$ 。

## 2.2 内陆拗陷湖盆大型三角洲成藏认识

鄂尔多斯盆地原为华北盆地的一部分,中生代后期逐渐与华北盆地分离,并演化为一个大型内陆盆地<sup>[19]</sup>。在上三叠统延长组沉积期,盆地开始下拗,进入大型拗陷湖盆发育阶段,具有稳定沉降、湖盆宽缓与沉积范围大等特点,湖盆演化经历了形成(长10段—长8段沉积期)—鼎盛(长7段沉积期)—逐渐消亡(长6段—长1段沉积期)的过程,发育一

套河流—三角洲—湖泊相碎屑岩沉积。由于物源供应充足,加之湖盆稳定沉降及回返,沉积了一套厚约千余米的湖相—三角洲相碎屑岩建造,为大面积岩性油藏的形成创造了条件。近年来通过不断深化认识,细化成藏条件及成藏模式,总结内陆拗陷湖盆大型三角洲成藏特征与规律,指导石油勘探不断取得重大突破。

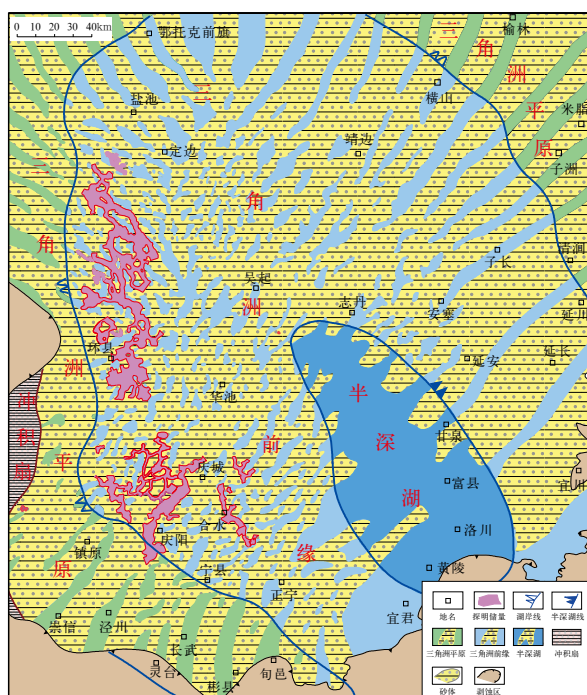
(1) 具有“西辮东曲、多类型复合、满盆富砂”的三角洲沉积特征。

上三叠统延长组沉积期,大型内陆拗陷湖盆的发育,既形成了广阔而巨大的沉积可容纳空间,也为多物源供砂提供了有利的沉积背景。该时期湖盆共接受东北、西南、西北三大物源的输入,供屑能力强。湖盆从形成至消亡的演化过程中,因受盆地底形的控制,总体呈“西辮东曲”的沉积相特征,即盆地西部底形较陡,发育大型辮状河三角洲;而东部底形较缓,发育大型曲流河三角洲。长8段沉积期,湖盆总体水体较浅,发育浅水三角洲。由于

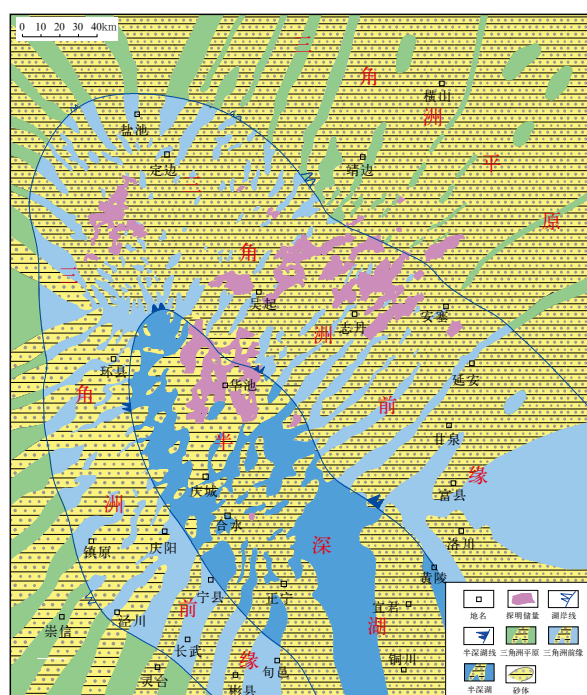


湖岸线在枯水期和洪水期迁移范围大,加之水体浅,造成多期河道频繁摆动、交织分布、叠合发育,形成了大连片的砂体展布特征(图4a)。长6段沉积期,由于物源供应更加充足,加之湖盆稳定抬升造成水体退缩,有利于形成规模较大的建设型三角洲。以往认为深水区不发育规模砂体,通过深化沉积理论认识,开展湖盆底形恢复和坡折带研究,建立

湖盆中部三角洲与深水重力流多类型复合沉积的新模式,指导勘探落实大规模砂体(图4b),解放了湖盆中部  $1.5 \times 10^4 \text{km}^2$  的勘探领域。总之,湖盆长8段、长6段沉积期发育大面积三角洲沉积砂体,为大面积岩性油藏及致密油藏的发育提供了储集砂体,为内陆坳陷湖盆大型三角洲成藏理论的创立奠定了基础。



(a) 长8段



(b) 长6段

图4 鄂尔多斯盆地延长组长8段、长6段沉积相图

Fig.4 Sedimentary facies maps of Chang 8 and Chang 6 members of Yanchang Formation in the Ordos Basin

(2) 有利成岩相带控制形成相对高渗储层大面积分布。

长8段、长6段大面积发育的砂岩为典型的特低渗透—超低渗透砂岩,储层物性差,是否发育平面相对高孔、高渗甜点区是有效成藏的又一关键。通过成岩作用发现,烃类早期充注和黏土膜抑制下的原生粒间孔、长石与火山碎屑次生溶蚀孔两种成岩相是大面积低渗透背景下有利储层发育的重要因素,明确长8段、长6段平面可发育大面积相对高孔、高渗甜点区,使大规模油藏的发育成为可能。

(3) 建立“生烃增压、大面积充注、多元输导、连续性聚集”的成藏模式。

长7段沉积期为湖盆发育最鼎盛时期,形成了一套广覆式分布、品质超优的烃源岩。长6段、长8段分别与长7段上下紧邻,源储距离近,具备近源成藏

的有利条件。长7段烃源岩生烃增压作用明显,与长8段、长6段存在很高的源储压差;同时,长8段—长6段天然裂缝发育;长7段生成的石油在高的源储压差下,通过裂缝与叠置的高渗砂体共同输导,大面积向下、向上充注。经过晚侏罗世至早白垩世的长时期连续充注聚集,在长8段、长6段形成了大型低渗透岩性一致密油藏。

近年来,在实践中不断创新成藏地质认识,形成了内陆坳陷湖盆大型三角洲满盆富砂、相对优质储层形成机理与“生烃增压、大面积充注、多种输导、连续性聚集”成藏模式等新观点,不断深化延长组三角洲成藏规律研究,形成了内陆坳陷湖盆大型三角洲沉积区可大面积富砂、大规模成藏、发育大型岩性油藏—致密油藏的重要认识,坚定了盆地长8段、长6段持续规模勘探的信心,指导勘探不断获

得重大发现。陆续发现了安塞、西峰、姬塬、华庆等亿吨级大油田,目前已落实了4个10亿吨级整装含油富集区。

延长组长8段、长6段仍是当前及今后一段时期盆地内石油勘探的主力层系。勘探开发实践表明,在大规模成藏背景下,仍面临砂体变化大、储层致密且非均质性强、含油性变化大等问题,下一步需要不断深化砂体空间展布、优质储层预测、储层及含油非均质性等方面的研究,精准预测低渗—致密背景上的油藏“甜点”发育区,同时深化油藏纵向空间结构展布特征,做好地质工程一体化攻关研究及扩边连片勘探工作,持续扩大长8段、长6段大型低渗透—致密油藏领域勘探成果。

### 2.3 侏罗系古地貌油藏群成藏认识

鄂尔多斯盆地侏罗系石油勘探始于20世纪60年代,1960—1979年,通过加大区域勘探力度,在盆

地西缘及南部陇东地区相继发现了大水坑、马岭等一批油田。同时通过成藏规律研究,总结出了古地貌油藏模式<sup>[20]</sup>。在该认识指导下,自1980年后在侏罗系相继发现了大批油藏<sup>[21-26]</sup>。近年来,通过不断深化发展早期的古地貌成藏模式,创建了“远源供烃、多元输导、地层—构造—岩性复合圈闭、油藏立体群状分布”的古地貌油藏群成藏新认识,指导盆地侏罗系石油勘探不断取得新的突破。

(1) 前侏罗纪古地貌对侏罗系油藏具有最基本的控制作用。

三叠纪末盆地整体抬升遭受剥蚀,形成古河切割、残留高地、沟谷纵横的古地貌形态,主要发育古河、斜坡、高地、支沟、河间丘等古地貌单元,具有甘陕、宁陕、蒙陕三大古河切割,姬塬、定边、靖边、演武、子午岭五大高地残留及各级支河、支沟广泛发育的特征(图5)。理论研究及勘探实践表明,前侏罗纪古地貌对侏罗系油藏控藏作用明显。侏罗系古河可下切

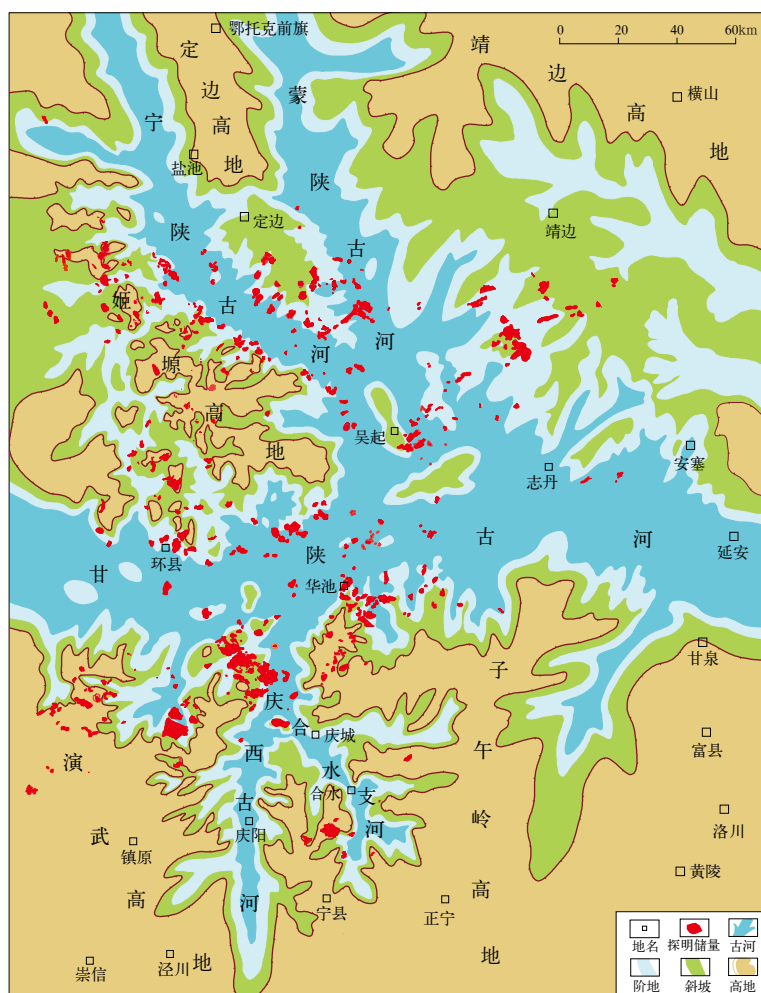


图5 鄂尔多斯盆地前侏罗纪古地貌及侏罗系勘探成果图

Fig.5 Pre-Jurassic paleogeomorphic map and exploration results of the Jurassic in Ordos Basin



至延长组长4+5段,极大拉近了侏罗系底部延安组延10段、富县组与下伏延长组长7段烃源岩层的垂向距离。长7段烃源岩在生烃增压作用下排出的石油,在一定压差下通过长7段以上残留的延长组中的微裂缝及多期叠置的渗透性砂体快速进入侏罗系古河,然后通过古河两侧的不整合面、古河内与上覆的高渗砂体及盆地西缘断裂的共同输导,石油在古河、斜坡、高地、支沟、支河等圈闭内成藏,油藏总体以油源为中心呈发散状分布。

古河两侧的斜坡部位一直被认为是最有利的成藏单元<sup>[27-28]</sup>,而古河因缺乏盖层、高地因缺失下侏罗统和运移通道均被认为是不利的成藏单元。近年来,随着勘探程度的不断增高、三维地震技术的应用及认识的不断深化,在大范围分布的高地上发育数量众多的各级支沟、支河,使已经输导至斜坡区的石油沿着

支沟、支河向高地的纵向深部运聚成藏;同时,古河内也发现了数量众多的“河间丘式”及“古河式”油藏<sup>[7]</sup>。因此,古高地与古河也成为勘探有利目标。

(2) 侏罗系油藏多类型、多层系立体群状分布。

侏罗系延安组下部的延10段、富县组油藏受古地貌控制最为明显,发育“斜坡式”“古河式”“河间丘式”“高地式”等古地貌控制的岩性、构造及地层复合圈闭油藏<sup>[28]</sup>;延9段及以上层系沉积于侵蚀沟谷地形基本被填平补齐之后,延10段的石油在微裂缝及高渗砂体共同输导下向上部的延4+5段—延1段及直罗组运聚成藏,类型为岩性、低幅度构造单一或复合式油藏,已不再受古地貌形态的控制。在盆地西缘侏罗系还发育与断裂有关的断块、断鼻式油藏。总之,侏罗系油藏纵向上呈多类型、多层系立体式发育,平面上呈小规模、高密度的群状分布特征(图6)。

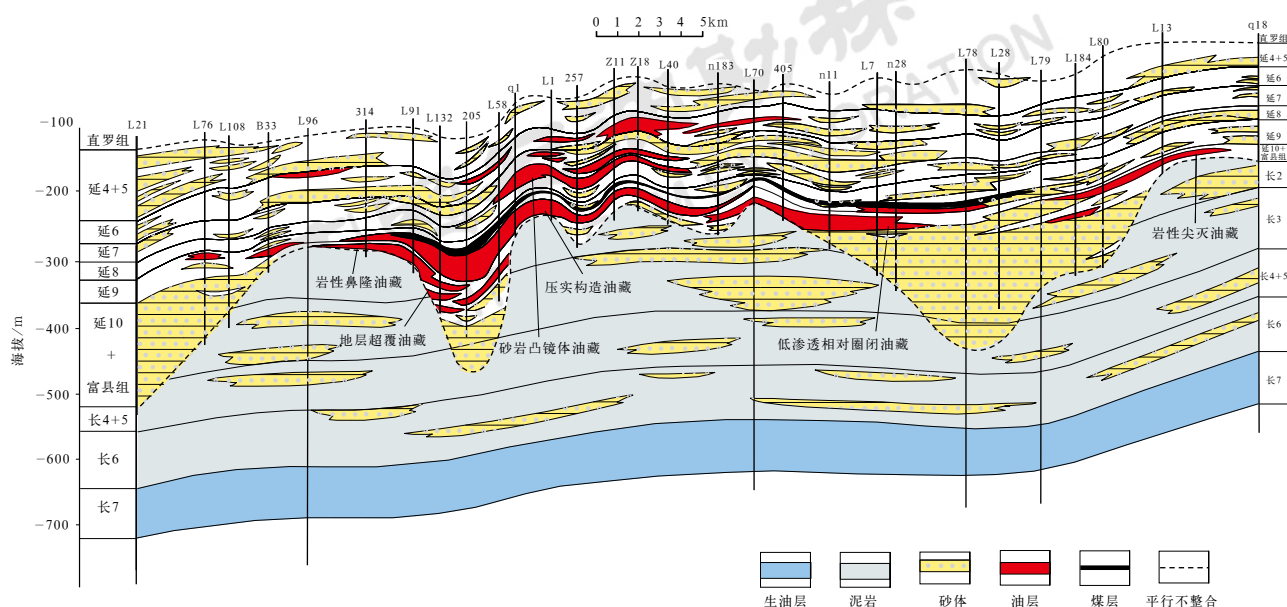


图6 鄂尔多斯盆地中生界侏罗系古地貌油藏成藏模式图

Fig.6 Oil accumulation pattern of Mesozoic Jurassic paleogeomorphic reservoir in Ordos Basin

侏罗系古地貌成藏模式提出于20世纪70年代<sup>[20]</sup>,随着石油勘探的不断推进与深入及技术与认识的不断进步,一直在实践中不断丰富完善。早期的侏罗系古地貌成藏模式指出古河斜坡区成藏有利,油藏沿斜坡呈带状分布,勘探更多的是在斜坡区开展。近年来,通过成藏认识的不断发展与深化,突破了古高地、古河勘探的认识禁区,形成了侏罗系古地貌油藏群成藏新认识(图6),在新认识指导下,坚持“上山下河、纵向拓展”的勘探战略,勘探成效显著。近几年每年提交探明石油地质储量超 $5000 \times 10^4 \text{t}$ ,累计提交

石油探明储量达 $5.92 \times 10^8 \text{t}$ ,侏罗系原油年产量达到 $670 \times 10^4 \text{t}$ 以上。

随着勘探程度的不断增高,今后新发现侏罗系的油藏规模将越来越小,油藏发现难度将不断增大。根据侏罗系油藏成藏特征,下一步必须持续深化前侏罗纪古地貌精细刻画研究,细化各级支河、支沟展布,尤其是高地上及古河两侧各级支河、支沟的精细刻画,不断拓展勘探领域;持续加大三维地震实施与技术攻关力度,加大二维地震老资料的重新解释技术攻关,提高砂体及圈闭预测精度;勘探思路方面要不断解放

思想,整体加大盆地侏罗系油藏勘探力度,加大盆地周缘高风险勘探区成藏地质条件的深化研究,突破盆地西缘天环坳陷及以西构造复杂区、三边(定边、安边及靖边)北等高风险探区,力争侏罗系石油勘探不断取得新发现。

## 2.4 陆相致密砂岩气成藏认识

近年来,在烃源岩评价、沉积储层分布和成藏要素研究基础上,通过缓坡型三角洲沉积模式、致密砂岩气成藏主要控制因素和盆地东部多层系复合气藏形成条件等方面研究,深化了陆相大型致密砂岩气藏的地质认识,指导了致密砂岩气勘探领域由盆地本部向外围、单层向多层系、源外向源内拓展,助推致密气储量和产量保持快速增长。

(1) 煤系烃源岩具有“广覆式生烃、大面积供气”的特征。

烃源岩是圈闭成藏的物质基础<sup>[29]</sup>。鄂尔多斯盆地石炭系本溪组、下二叠统太原组与山西组广泛分布着

煤系烃源岩,其中煤层厚约6~20m,平均有机碳含量为67.3%;暗色泥岩厚约40~120m,平均有机碳含量为2.93%。煤系烃源岩发育于弱氧化—弱还原条件,其原始沉积物主要为高等植物,有机显微组分以镜质组为主<sup>[30]</sup>。烃源岩 $R_o$ 几乎都大于1.3%,已进入高成熟阶段;同时,生排烃高峰期在晚侏罗世至早白垩世,大部分烃源岩均已发生生气与排烃作用<sup>[31-32]</sup>。这套煤系烃源岩具有良好的生烃条件,是上古生界致密砂岩气藏形成的重要气源。据前人研究,生烃强度大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的烃源岩就能生成大气田<sup>[33-34]</sup>。近年来油气勘探实践与实验结果均突破了传统形成大气田的生烃门限,鄂尔多斯盆地煤系烃源岩生烃强度为 $(5 \sim 50) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的超过 $15 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约占盆地本部面积的60%(图7),总体表现为广覆式生烃的特征,为大气田的形成奠定了重要的物质基础。“广覆式生烃、大面积供气”的地质认识,指导了天然气勘探从盆地东部向盆地腹部大型岩性气藏的转移。

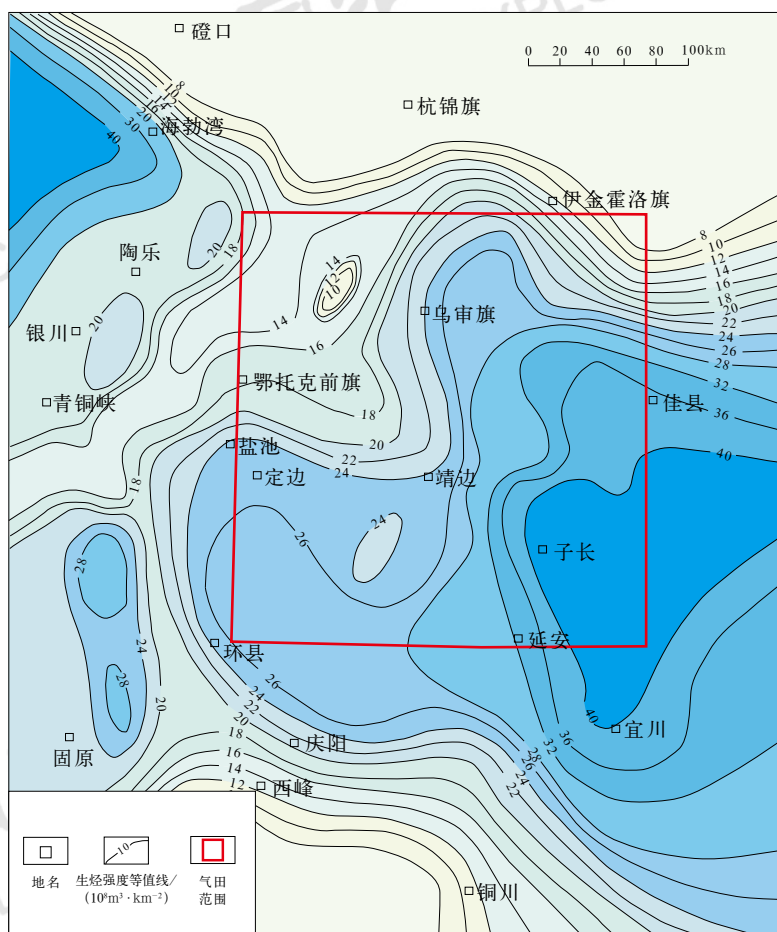


图7 鄂尔多斯盆地烃源岩生烃强度及气田分布图

Fig.7 Hydrocarbon generation intensity of source rocks and gas field distribution map in Ordos Basin



(2) 发育大型缓坡型三角洲沉积砂体, 火山物质溶蚀形成了有效储层。

晚石炭世以来, 北部阴山古陆、南部秦岭—大别山古陆持续抬升为盆地砂体提供了丰富的物质来源<sup>[35]</sup>。鄂尔多斯地块作为华北稳定地台的一部分, 沉积古地形平缓, 发育大型缓坡三角洲沉积。在储集砂体构型描述和气藏精细解剖研究的基础上, 认为缓坡三角洲沉积背景下储集砂体具有大面积薄饼状、集群式心滩—分流河道叠合砂体发育模式。在洪水事件沉积作用下<sup>[36]</sup>, 盆地大面积砂体成因具有以下必要条件, 即“平缓古地貌是背景、强物源供给是基础、多水系发育是前提、高流速河流是动力”, 指导了对盆地砂体展布形态的精细刻画。火山物质的成岩作用及蚀变严重影响其赋存储层的孔隙演化, 很大程度改善了致密储层的质量<sup>[37]</sup>。储集体岩性为中—粗粒石英砂岩、岩屑石英砂岩, 火山物质溶孔比例高达70%以上, 主要发育粒间孔与火山物质强溶蚀、晶间孔与火山物质强溶蚀两种优势相带, 火山物质的溶蚀促进了优质储层的形成。

(3) 发育“源储交互叠置、孔缝网状输导、近距离运聚、大面积成藏”的成藏模式。

储集体与烃源岩交互叠置于地层中。流体包裹体与热演化分析表明储层硅质胶结致密化主要发生于晚三叠世—中侏罗世<sup>[38]</sup>, 早于天然气大规模成藏期(晚侏罗世—早白垩世), 因此, 储层具有先致密、后成藏的特征, 导致天然气难以进行大规模侧向运移, 主要运移聚集在距烃源岩较近的储层<sup>[39-41]</sup>, 聚集系数可达1.55%~4.9%。同时, 砂岩、泥岩与页岩中天然裂缝较发育, 泥岩与砂岩的孔、缝有效配合, 构成了良好的网状输导体系, 为致密砂岩大面积聚气提供了通道<sup>[42]</sup>。上古生界普遍发育异常压力, 石炭系—二叠系太原组、山西组、石盒子组过剩压力超过10MPa, 储层中过剩压力差为天然气运移提供动力。总之, 陆相致密砂岩气藏具有“源储交互叠置、孔缝网状输导、近距离运聚、大面积成藏、集群式富集”的成藏模式<sup>[32]</sup>。

陆相致密砂岩气成藏地质认识指导了鄂尔多斯盆地致密气规模化勘探, 推动了苏里格大气田勘探发现与规模储量的落实。近年来, 通过坚持整体勘探, 天然气勘探领域向东、西、南不断拓展, 形成了苏里格、盆地东部和盆地南部3个万亿立方米整装大气区。下一步攻关针对盆地东部和盆地南部地区开展南部沉积砂体控制因素、致密储层精细评价和致密气富集规律研

究, 积极推进地质工程一体化, 为提交规模储量提供地质依据。

## 2.5 奥陶系岩溶古地貌天然气成藏认识

20世纪80年代中晚期, 在“古潜台”成藏认识指导下部署的陕参1井等多口探井喜获高产气流, 证明盆地存在非构造控制的大型岩溶古地貌成岩圈闭, 通过印模法、残厚法及地震模型识别技术, 恢复了岩溶古地貌的区域分布格局及发育形态, 提出了“古潜台含气、古潜沟遮挡”的成藏观点, 并依此建立了岩溶古地貌成藏模式<sup>[43-44]</sup>, 指导发现了多个气藏, 快速探明了靖边大气田。近年来, 通过深化早期“古潜台”成藏认识, 加大奥陶系海相碳酸盐岩沉积微相研究、岩溶古地貌精细刻画、成藏主控因素分析, 创新发展了岩溶古地貌成藏认识, 推动了海相碳酸盐岩勘探领域不断拓展。

(1) 沉积微相是控制储层发育的物质基础。

下奥陶统马家沟组是鄂尔多斯盆地主要的海相碳酸盐岩含气层位。该沉积期, 由于近南北向展布的中央古隆起对海水的分隔作用<sup>[45]</sup>, 加之沉积期气候干旱炎热, 盆地东部凹陷区为蒸发岩盆地<sup>[46]</sup>, 围绕古隆起呈环带状发育膏云坪、含膏云坪及环陆泥云坪沉积。尤其在马家沟组马五段沉积期, 含硬石膏白云岩坪在盆地中部靖边地区近南北向展布, 分布面积近 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 岩性以泥—细粉晶准同生白云岩为主, 并普遍含石膏结核、石膏砂屑等易溶矿物, 有利于形成溶蚀孔洞型储层。同时, 由于含膏层段的成层性好, 形成的储层段平面上分布连续、稳定, 为鄂尔多斯盆地储层大面积分布奠定了物质基础。

(2) 三大岩溶系统为风化壳储层的形成创造条件。

奥陶纪末期的加里东运动, 导致盆地本部整体抬升, 使奥陶系碳酸盐岩经历了约1.5亿年的风化淋滤, 形成了沟壑纵横的古喀斯特地貌和古岩溶体系<sup>[47]</sup>。受中央古隆起的影响, 古地形西高东低, 自西向东依次发育定边岩溶高地、靖边岩溶斜坡、绥德岩溶盆地三大古地貌单元(图8)。不同岩溶古地貌单元的岩溶作用及强度不同, 储集性能存在差异。岩溶高地以垂直岩溶为主, 发育垂直岩溶管道、落水洞等岩溶形态, 储层非均质性强、局部高渗; 岩溶盆地古地势较低, 表现为沿沟槽对地层进行弱改造, 整体储层致密, 有效储层在岩溶残丘的斜坡部位局部分布; 岩溶斜坡处于岩溶高地和岩溶盆地的过渡地带, 岩溶以水平径流为主、排泄通畅, 层状储层经改造后溶蚀孔洞发育, 是风化壳储层最为发育部位<sup>[47-48]</sup>。在岩溶古地貌和

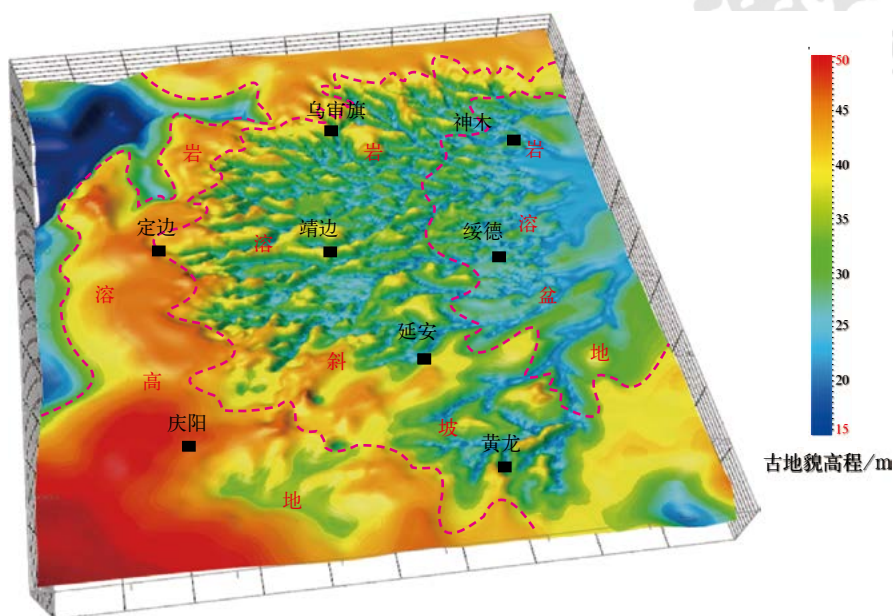


图8 鄂尔多斯盆地前石炭纪岩溶古地貌图

Fig.8 Pre-Carboniferous karst paleogeomorphic map in Ordos Basin

风化壳储层形成机理认识指导下,盆地碳酸盐岩勘探领域由岩溶斜坡不断向岩溶高地和岩溶盆地拓展。

(3) 具有“垂向倒灌式、侧向运移式”两类成藏模式。

奥陶系天然气  $\delta^{13}\text{C}_1$  值大部分介于  $-35\text{‰} \sim -31\text{‰}$ , 普遍偏重, 反映出煤成气的特征, 表明气源来自上古生界石炭系—二叠系烃源岩<sup>[49-50]</sup>。在不同古地貌单元具有不同的成藏模式, 形成不同类型的气藏。岩溶斜坡和岩溶盆地部位, 风化壳岩溶残丘发育, 上古生界生成的天然气在异常高压作用下, 沿古沟槽垂直倒灌

进入奥陶系风化壳储层中聚集成藏, 气层周边的泥岩或致密碳酸盐岩构成有效的岩性遮挡, 形成大型地层—岩性气藏, 如靖边地区马五<sub>1+2</sub>气藏; 岩溶高地部位, 岩溶残丘和古沟槽不发育, 地层无明显切割, 受台内滩相控制的白云岩储层分布稳定<sup>[48]</sup>, 天然气沿不整合面侧向运移, 在上倾方向被东部较致密的碳酸盐岩封堵, 形成岩性气藏, 如靖边气田西侧马五<sub>4+5</sub>气藏(图9)。以上认识的提出, 证实了奥陶系存在大面积、多层系、连片分布的古地貌气藏, 使气藏规模由零散向整装发展, 加快了靖边大气田的探明。

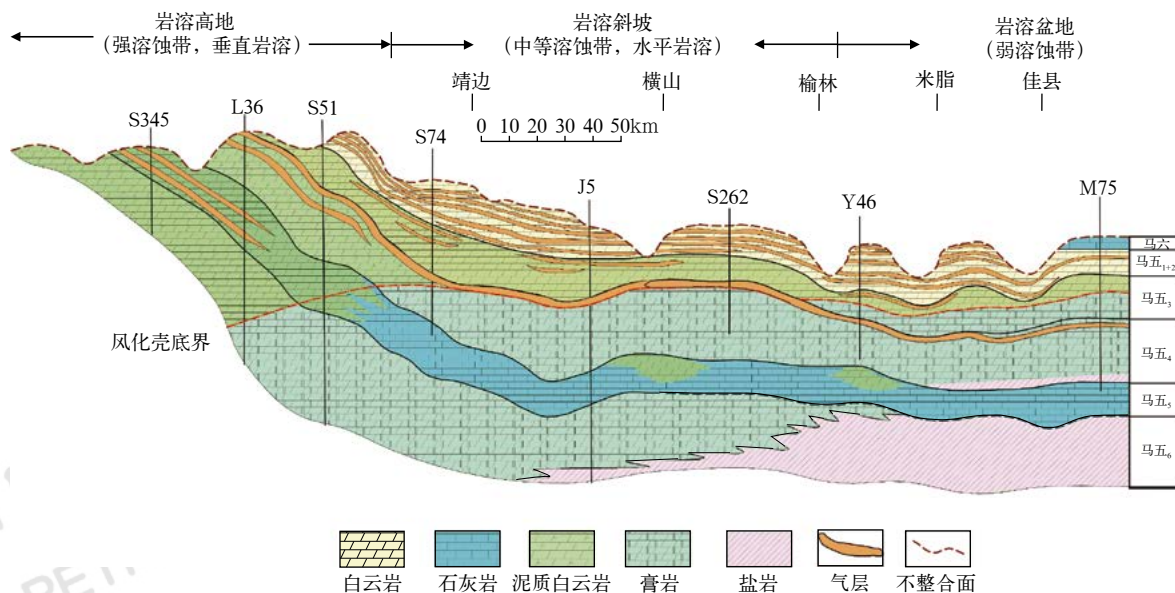


图9 鄂尔多斯盆地岩溶古地貌气藏成藏模式图

Fig.9 Gas accumulation pattern of karst paleogeomorphic reservoirs in the Ordos Basin



以岩溶古地貌天然气成藏认识为核心的勘探技术成功应用于鄂尔多斯盆地古生界海相碳酸盐岩勘探,实现了靖边气田的东扩西增,探明储量累计达  $6577 \times 10^8 \text{m}^3$ , 同时在靖边气田西侧发现马五<sub>4</sub>、马五<sub>5</sub>等新类型风化壳,新增高效储量超  $3000 \times 10^8 \text{m}^3$ 。鄂尔多斯盆地岩溶古地貌气藏三级储量累计超  $10000 \times 10^8 \text{m}^3$ , 成为盆地新的万亿立方米大气区。下一步将继续深化岩溶古地貌成藏认识,围绕靖边气田周边及盆地东部,精细刻画岩溶古地貌,落实含气富集区,提交新的优质储量。

### 3 关键勘探技术进展

在鄂尔多斯盆地勘探过程中,经过不断探索与攻关,同时形成了适合低渗透、致密油气、页岩油气等勘探的配套技术系列,为大油气田的发现提供了重要的技术支撑和保障。

#### 3.1 黄土塬三维地震勘探技术

鄂尔多斯盆地黄土塬面积占总面积的60%以上,是长庆油田油气稳产、上产的重要地区<sup>[51]</sup>。由于黄

土塬地形和表层结构变化大,黄土干燥且疏松,地震波吸收衰减严重,地震资料品质差。针对黄土塬地震勘探的技术难点,围绕黄土塬三维地震低频可控震源和井炮“井震混采”高效采集、高精度成像、低幅度构造预测、小断层微裂缝刻画、致密岩性甜点预测等关键问题,开展地震采集、处理、解释及地质应用一体化综合研究,形成了3项重要技术组合系列,为井位部署、有利区评价、致密油气甜点优选及水平井导向提供了重要技术支撑。

##### (1) “井震混采”三维地震高效采集技术。

针对巨厚干燥黄土地震波吸收衰减作用强、塬上障碍物密集区、炮点布设难和致密油气储层内幕反射成像精度低等难点,以“宽方位、高覆盖、适中面元”为核心,首次在黄土塬创新应用低频可控震源和井炮混合激发(“井震混采”)、高灵敏度宽频单点(节点)接收、大钻井和微测井联合表层调查为一体的黄土塬三维地震高效采集技术系列,覆盖次数提高到400次以上,炮道密度达到50万道/ $\text{km}^2$ ,面元为  $20\text{m} \times 40\text{m}$ ,在巨厚黄土塬区获得了高品质的原始地震资料(图10)。

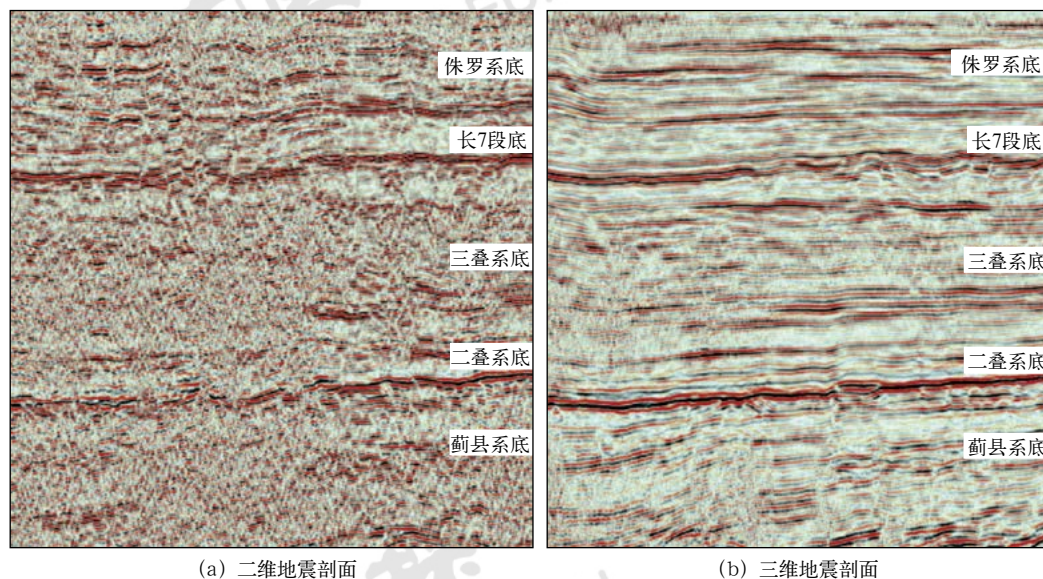


图10 演武北黄土塬三维地震剖面与以往二维地震剖面对比

Fig.10 Comparison between 3D seismic profile and previous 2D seismic profile of Yanwubei loess plateau

##### (2) 形成面向解释需求的“双高”处理技术。

鄂尔多斯盆地黄土塬三维地震资料初至干扰太严重,初至拾取难度很大,造成静校正、叠前去噪和一致性保真处理问题突出。受障碍物及地形的影响,炮检点分布不均匀,资料空道多,采集脚印明显,并且原始单炮的信噪比极低,地震处理难度大。针对性提

出了超深微测井约束三维网格层析静校正和黄土塬近地表  $Q$  补偿技术,利用大钻井和微测井资料,反演出的表层速度及厚度与实际地表结构的一致性更好,建立的近地表速度模型更加准确,黄土塬近地表  $Q$  补偿后,解决了沟塬吸收的不一致问题,地震资料主频提高  $3 \sim 5\text{Hz}$ ,频宽拓展了  $10\text{Hz}$ 。提出的针对黄土



源地震资料五域叠前保真去噪技术,目标层信噪比由原来的4提高到7,OVT域高精度成像和 $Q$ 叠前深度偏移技术的应用,使地震资料目的层主频由以往的25Hz提高到35~40Hz,深浅层资料地质信息丰富,断点清楚,分方位角数据一致性好,为小幅度构造预测和储层甜点评价奠定了基础。

### (3) 致密油气甜点预测技术。

通过模型正演断裂系统模式识别、蚂蚁体、相干断层识别和叠前裂缝检测,预测断裂和裂缝的展布,形成了三维地震低幅度构造、小断层微裂缝刻画技术,精细小幅度构造解释,助力盆地长3段及以上浅层油

藏高效勘探,探井成功率提高27.3%。采用时频分析检测强反射背景中的单砂体,叠前反演预测含油砂体,高亮体和吸收衰减等频率域属性检测含油性,泊松比预测优质储层,脆性指数预测岩石可压裂特性,综合应用上述多属性降维和地质概率统计评价优选甜点区,形成了一套完整的致密油气甜点预测技术,成功应用于陇东页岩油、致密气勘探开发。自主研发形成了基于地震钻井动态时深转换的水平井地震地质导向技术(图11),综合地震反射特征、泊松比、脆性指数等分析指导水平井钻探,水平井有效储层钻遇率提高了10%。

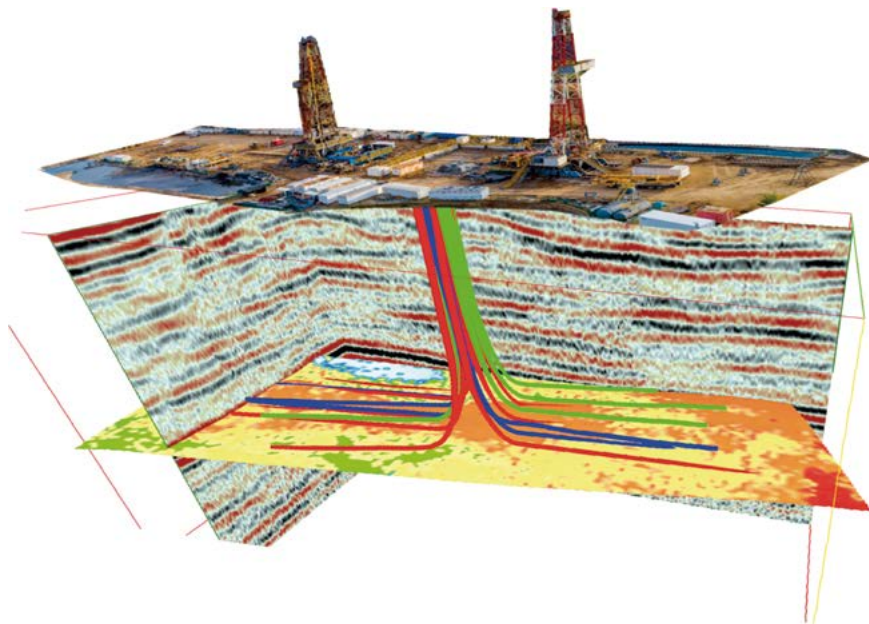


图11 地震水平井设计立体显示示意图

Fig.11 Stereoscopic diagram of seismic steering horizontal well design

## 3.2 低渗透致密油气层测井识别与评价技术

针对鄂尔多斯盆地三低特征,紧密围绕盆地新区带新层系和规模储量区,强化油气藏及储层主控因素分析、测井精细解释和面向油藏的多井评价,形成了低饱和度复杂油气层测井识别、碳酸盐岩储层成像测井定量评价、非常规页岩油岩性精细识别等解释评价技术,在试油气选层和压裂方案优化、储量计算、老井复查和地质综合研究中发挥了重要作用。

### (1) 低饱和度致密气测井精细评价技术。

苏里格外围低饱和度致密气是近年来天然气勘探的重点目标,但由于紧邻西缘冲断带,储层埋深大,微幅构造和小型断裂发育,储层非均质性强、气水关系复杂,气层与水层测井响应特征差异小,流体识别

难。目前低饱和度致密气测井评价主要开展储层物性及孔隙结构评价,饱和度计算采用阿尔奇公式。本文通过配套岩石物理实验和处理解释方法攻关,引入变 $m$ 值阿尔奇公式和印度尼西亚公式,分层系建立了适用于低孔、低渗储层特征的含水饱和度定量计算模型,提高了测井解释精度。分区、分岩性优选气水层敏感参数,构建了多尺度小波分析法、精细识别图版法、相渗分析法等多种气水判识方法,提高测井解释符合率10%以上。利用常规物性和气水相渗资料,采用神经元非线性Sigmoid函数构建了产水率评价模型,精细评价气水层(图12),为试气方案的制定提供了有力的技术支撑。下一步将继续深化气水层识别方法及产水率分级评价方法研究。

(2) 非均质性碳酸盐岩储层有效性成像测井评价技术。

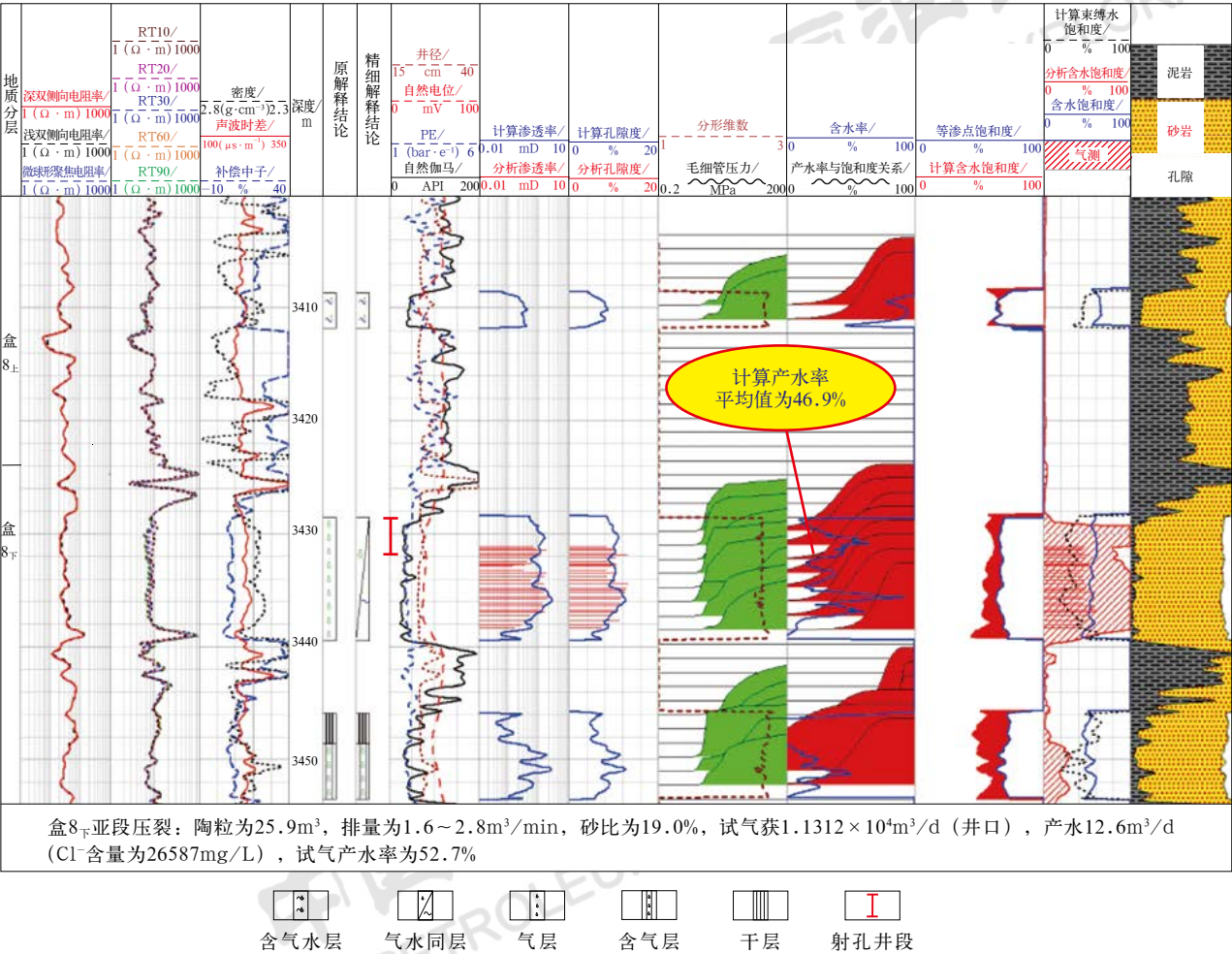


图 12 E41 井盒 8 段测井产水率评价成果图

Fig.12 Logging evaluation results of water cut of He 8 member in Well E41

针对盆地非均质性致密碳酸盐岩储层产能预测难题，开展了利用成像测井孔隙谱特征进行风化壳储层产能预测的方法研究，建立了测井地质模型和成像解释模式，形成了成像测井图版集，涵盖了各种储层类型；形成了以孔隙空间图像特征、岩溶相带特征、孔隙谱特征、地层倾角特征综合评价有效性的方法体系。针对颗粒滩相储层，建立了以孔隙谱均值和变异系数为特征的产能预测模型，形成了以图像模式、孔隙谱特征、储层结构特征、沉积环境特征为主体的储层有效性评价技术。通过推广应用，使非均质性碳酸盐岩储层测井解释符合率历年保持在 82% 以上。下一步将开展高阻水层测井识别方法研究。

(3) 低饱和度复杂油水层测井识别技术。

低饱和度复杂油水层在鄂尔多斯盆地发育广泛，这类油藏单体规模小，但数量众多，对精细勘探和老油田挖潜意义重大。低饱和度油藏一般位于盆地边部，烃源岩供烃能力相对盆地内部较弱，使油藏充注不充分，油藏饱和度低；构造运动剧烈，油气运移通

道复杂，部分油藏经过二次调整，地层水矿化度差异大。由于测井对比度低、油水关系复杂，油层精准识别难度大。

国内外针对低饱和度油水层开展了视电阻增大率、核磁共振移谱差谱、神经网络等识别方法。本文综合对流体敏感的测井参数构建了流体识别因子，针对性提出了双  $R_w$  对比法、孔隙结构指数与电阻率交会法、阵列感应电阻率差异法、全烃录井—测井信息联合法、核磁共振差谱 T2LM 法等流体识别方法，形成了针对性测井识别技术系列；同时积极开展非电法测井（PNX+ADT+CMR）现场试验，探索非电法测井判识复杂油水层流体性质，形成了 FNXS—PHIT 交会、基于 ADT 的有效孔隙空间的含油饱和度计算、泊松比—体积模量等识别方法，丰富了低饱和度复杂油水层测井识别方法，低饱和度油层测井解释符合率提高 10% 以上。下一步将深化研究基于含水率评价的油水层识别方法、移动式全直径核磁岩心分析技术判识流体性质等方法，形成低饱和度复杂油



水层测井技术系列。

#### (4) 非常规页岩油岩性测井精细识别技术。

鄂尔多斯盆地长7段页岩油资源量丰富、储量规模大,但岩性复杂、变化快、分布不稳定,非均质性强,利用常规测井资料很难进行岩性识别、储层物性

等评价<sup>[52]</sup>。目前针对页岩油岩性识别前人开展了交会图、多元统计、聚类分析等多种方法的研究探索。本文基于配套岩石物理实验、常规和成像测井资料,形成了针对盆地页岩油复杂岩性定性和定量综合识别技术(图13)。

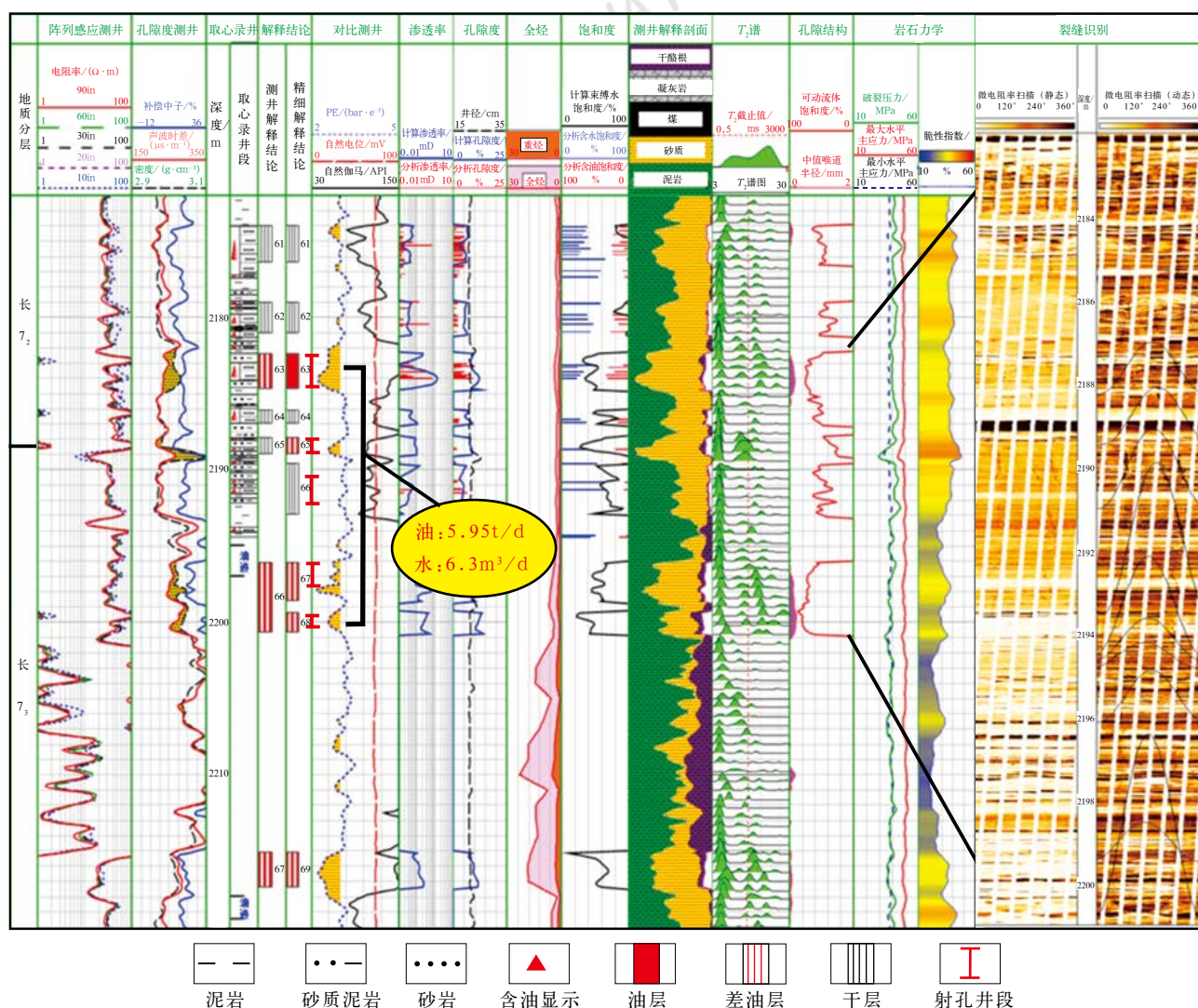


图13 J11井长7段测井解释成果图

Fig.13 Logging interpretation results of Chang 7 member in Well J11

通过岩心、薄片标定电成像测井,不同岩性具有不同特征模式(图14)。细—粉砂岩特征:在电成像静态图像上其电阻率高,动态图像上呈中—厚层状特征,岩层倾角变化较大。暗色泥岩特征:在电成像静态图像上呈黄褐色,动态图像上可见水平层理发育,见分散状黄铁矿分布。黑色页岩特征:在电成像静态图像上呈亮黄色—亮白色,动态图像上主要呈薄层状,局部呈块状,可见分散状黄铁矿集合体发育。凝灰岩特征:在电成像图像上呈暗色块状或层状,电阻率低。

同时建立了基于岩性—孔隙度交会的长7<sub>3</sub>段页

岩油岩性计算方法,通过定量表征地层组分差异,精细解释页岩油岩性,岩性识别图版精度达到86%以上。下一步将进一步完善页岩油岩性识别方法,有序开展页岩油物性、含油性、有机质含量、工程力学、甜点优选等评价研究,形成针对鄂尔多斯盆地长7段页岩油的测井评价技术系列,为页岩油勘探及储量提交提供扎实测井资料。

### 3.3 低渗—致密储层体积压裂技术

“十三五”以来,长庆油田勘探开发的主要对象



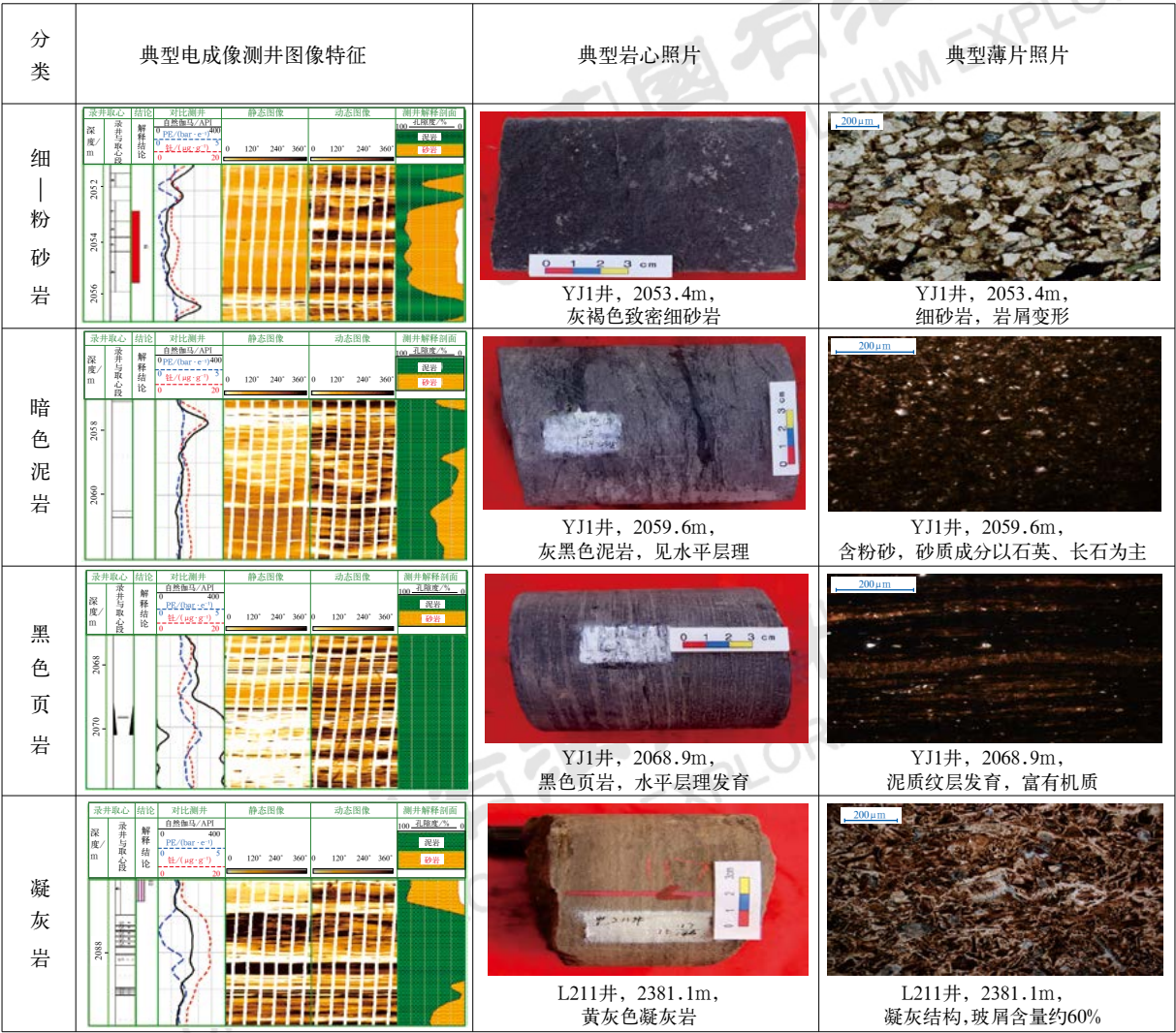


图 14 长 7 段页岩油电成像岩性模式图  
Fig.14 Lithologic pattern and corresponding imaging logging of Chang 7 shale oil

为超低渗、致密油气及页岩油气，单井产量低制约着其经济有效开发。为此跟随国内外非常规储层体积压裂技术不断发展的方向，长庆油田立足自身储层特点，强化基础实验和研究，加大自主工艺技术创新，积极开展矿场试验，逐步形成了针对不同类型储层的长庆特色体积压裂技术，为油田二次加快发展提供了重要的技术支撑和保障。

(1) 页岩油长水平段细分切割体积压裂技术。

页岩油储层具有压力系数低、非均质性强、物性差等改造难点，前期主要采用水平井水力喷砂分段压裂技术，储层改造程度低。“十三五”以来，长庆油田持续深化基础研究，积极探索先进技术，关键指标达国际先进水平。采用真三轴大型体积压裂物模实验、井下微地震矩张量反演、水平井取心观察等综合法开展陆相页岩油人工裂缝形态研究，揭示了鄂尔多

斯盆地页岩油人工裂缝形态是以主缝为主、分支缝为辅的条带状缝网系统<sup>[53]</sup>；构建了“造缝、蓄能、驱油”一体化集成压裂设计模式，建立了裂缝密度、进液强度、加砂强度关键工程参数经济化图版，创新了以“多簇射孔密布缝、可溶球座硬封隔、压前注水蓄能、压后焖井置换”为核心的水平井细分切割高效体积压裂工艺；提出采用超塑性可溶金属密封替代传统橡胶密封的思路，成功研制可溶金属球座工具<sup>[54]</sup>（图 15），溶解时间仅 7 天、承载压差达到 70MPa，价格为国外类似功能产品的 37%；发明了适合微纳米孔喉泥页岩储层的 CSI 多功能驱油滑溜水压裂液，油水渗吸置换效率较常规压裂液提升 27%，减阻率达到 72%。集成配套了极限分簇射孔 + 动态多级暂堵裂缝精细控制技术，多簇起裂有效性达到 80% 以上<sup>[55]</sup>。该技术规模应用后，人工裂缝对储层的控制程度由

60% 提高到 90% 以上 (图 16), 压裂后地层压力系数由 0.75 提高到 1.2 以上, 单井 EUR 由前期  $1.8 \times 10^4$  t 提高到  $2.4 \times 10^4$  t 以上, 为中国陆相源内非常规石油勘探开发提供了关键工程技术利器。

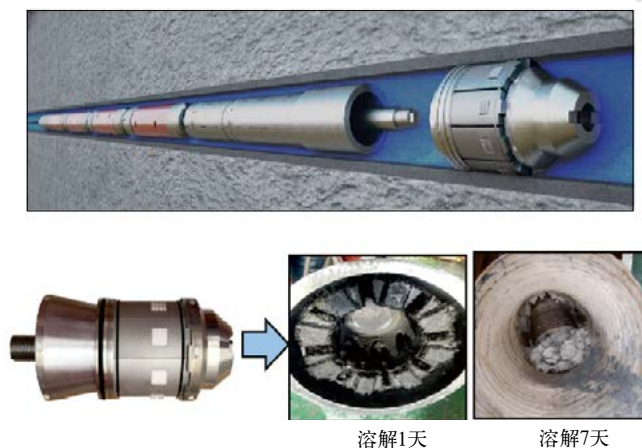


图 15 DMS 可溶球座 (上) 及溶解实验 (下)  
Fig.15 DMS soluble ball seat (up) and dissolution experiment (low)

## (2) 致密油多层多段压裂技术。

致密油前置主要采用直井或定向井开发压裂技术, 单井产量低, 近年来针对单一油层的超低渗透油藏, 创新形成了超低渗油藏水平井分段压裂技术<sup>[56]</sup>。结合五点注采井网, 采用“端部控缝长、中间最大化”

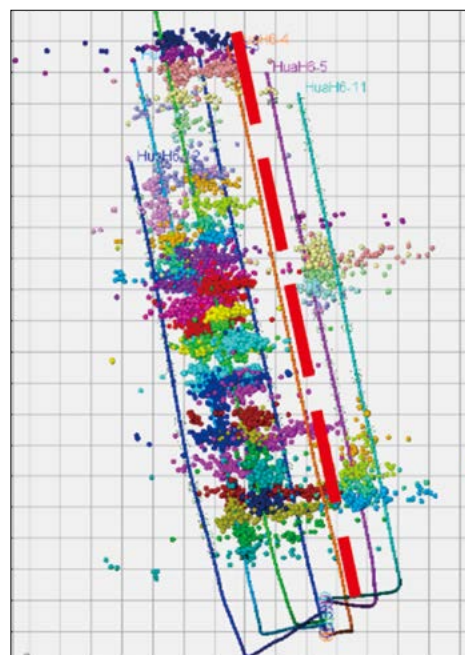


图 16 华 H6 平台裂缝监测图  
Fig.16 Fracture monitoring results of Platform Hua H6

的纺锤形裂缝设计模式, 通过水力喷射理论研究、分段压裂工艺和关键工具研发, 形成以“喷砂射孔、环空加砂、长效封隔”为核心的水力喷砂分段压裂技术 (图 17), 通过加密布缝、多段定点喷射压裂改造, 初期产量达到定向井的 3 倍以上。

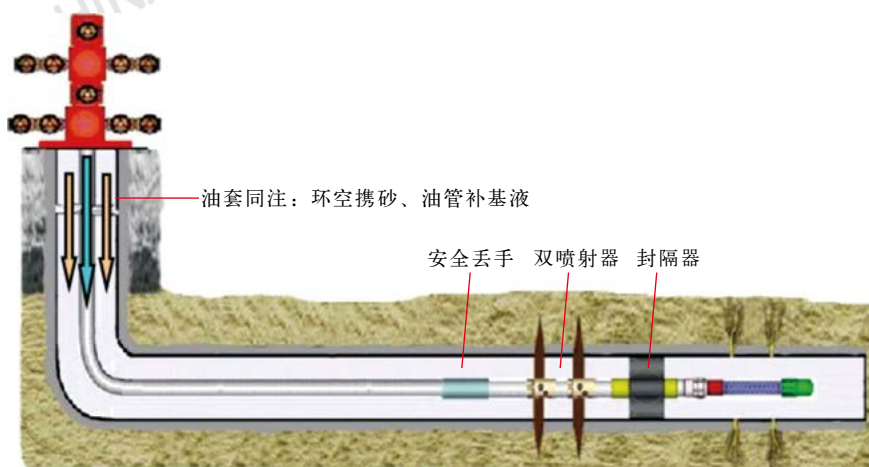


图 17 水平井油套同注、环空携砂示意图

Fig.17 Schematic diagram of tubing casing injection simultaneously and sand carrying in annulus in horizontal well

针对部分砂体厚度大、隔夹层较发育的超低渗透油藏, 创新形成了超低渗油藏大斜度井多层多段压裂技术<sup>[57]</sup> (图 18)。华庆长 6、姬塬长 6 等超低渗透油藏, 采用定向井和水平井开发均难以纵向充分动用, 借鉴水平井体积压裂、直井定点多级压裂技术理念,

开展大斜度井多层多段压裂提产试验, 以水力喷砂分段压裂为主体工艺, 优化形成了以“定点喷射、精准布缝、多段压裂”思路为核心的设计模式<sup>[58]</sup>, 大斜度段长 100~150m, 单井产量相比同区定向井提高 1.0~1.5t。



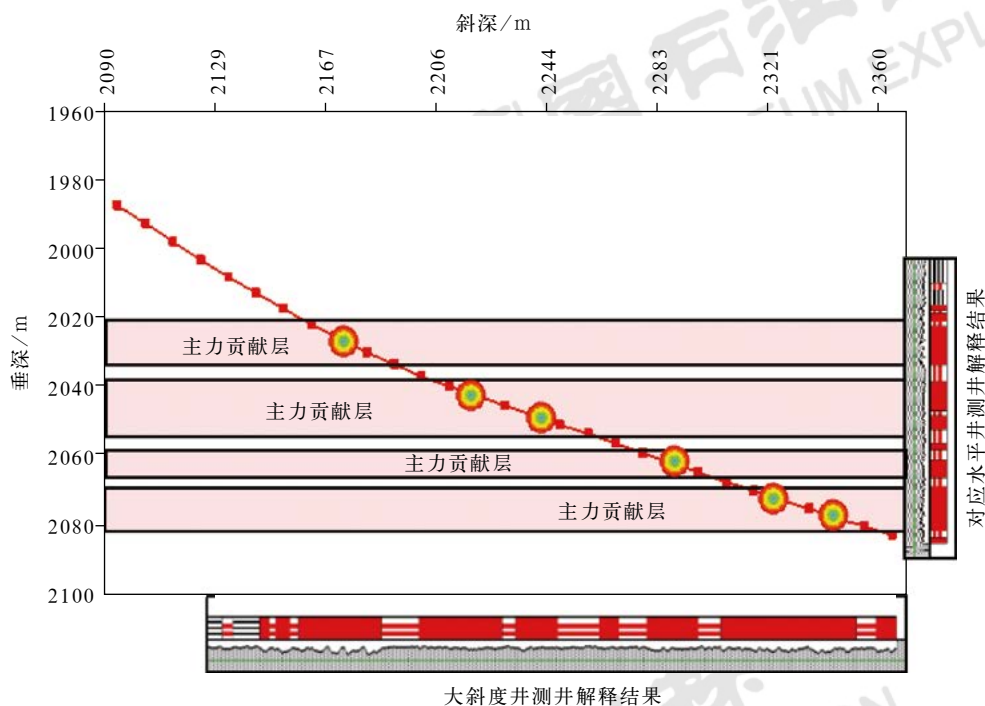


图 18 XX 大斜度井井眼轨迹与压裂层段

Fig.18 XX highly deviated wellbore trajectory and fractured interval

(3) 致密气水平井固井完井桥塞分段多簇压裂技术。

以苏里格气田为代表的致密气资源量大、多层系发育、横向非均质性强、压力系数低、无自然产能。前期主体采用多级滑套水力喷射、裸眼封隔器两项裸眼完井分段压裂技术，实现单井产量的大幅提升<sup>[59]</sup>，

但微地震监测及压裂效果分析表明，裸眼水平井段间封隔可靠性较差、无法满足体积压裂改造需求<sup>[60]</sup>。

近年来，为了进一步提升水平井压裂改造效果，转变完井方式，攻关形成了水平井固井完井桥塞分段多簇压裂技术（图 19）。针对 6in 钻头 + 4 $\frac{1}{2}$ in 套管环空间隙小、顶替效率低、固井质量难以保证等难题，专

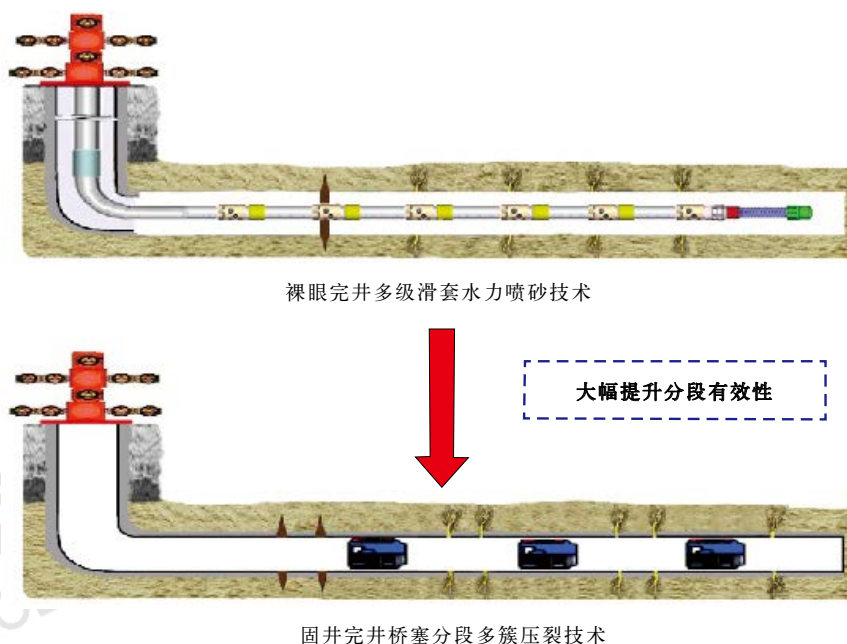


图 19 致密气水平井两种分段压裂工艺对比

Fig.19 Comparison of two types of staged fracturing techniques in horizontal well of tight gas reservoir



门研发高强度韧性水泥浆体系、配套固井关键工具，形成了水平段窄间隙固井技术；以提高改造体积为目标，形成了以“高排量、适度规模、低黏压裂液、多级支撑剂段塞”为主体的高排量混合水压裂设计模式<sup>[56]</sup>；自主研发全金属可溶球座、水溶可降解高分子暂堵剂等关键工具材料，大幅降低作业成本；通

过标准化布局、物料直供、流水线作业和高性能装备配套，形成大平台水平井工厂化作业模式，实现了单个平台平均压裂6~8段/d，并创造了单日压裂25段国内纪录。目前已在苏里格等致密气藏规模全面应用702口井，平均无阻流量为 $64 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，试气产量较前期裸眼井提高30%以上(图20)。

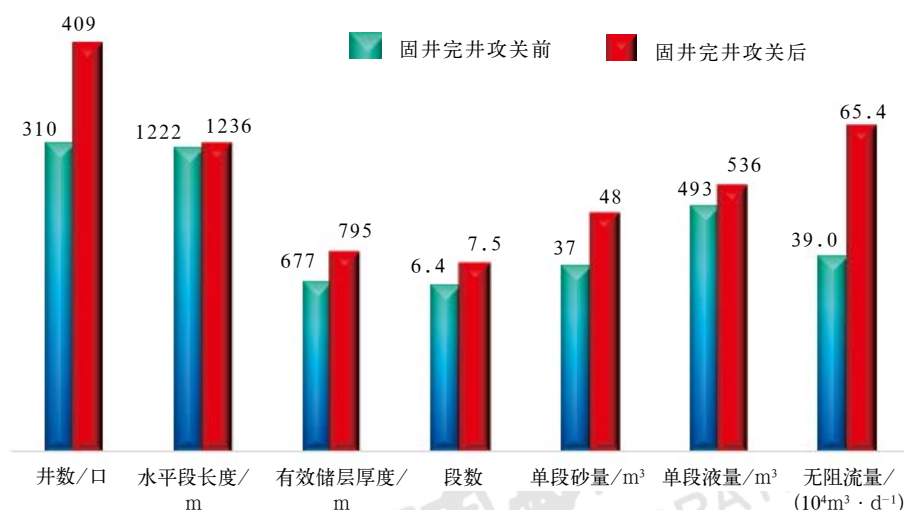


图20 致密气水平井桥塞分段多簇体积压裂效果

Fig.20 Multi-cluster volume fracturing effect with bridge plugging in horizontal wells of tight gas reservoir

#### (4) 致密碳酸盐岩深度酸压技术。

近年来，随着碳酸盐岩勘探开发的不断深入，靖西中上组合、奥陶系盐下、盆地东部岩溶残丘等新区新层不断涌现，与靖边气田比较，呈现出储层类型复杂、致密、低压、强非均质性特征。勘探初期，储层改造借鉴靖边气田开发经验，主体采用小规模稠化酸压、变黏酸酸压等工艺，增产效果不明显。“十二五”以来，压裂工艺紧密结合储层变化，不断攻克技术难

题，创新形成酸蚀裂缝三维激光数字成像(图21)、耦合滤失反应动力学实验、刻蚀形态扫描电镜微观识别等实验研究新方法，提供了酸蚀裂缝定量分析手段，揭示了不同类型储层非均匀刻蚀主控机理，提高了酸压工艺针对性与酸液体系适应性<sup>[61]</sup>；研发了新一代稠化酸、清洁转向酸、交联酸、低黏缓速酸等酸液体系，使得碳酸盐岩酸压改造液体系类型更丰富、功能更全面，规模应用1000余口井，成为碳酸盐岩改造主体

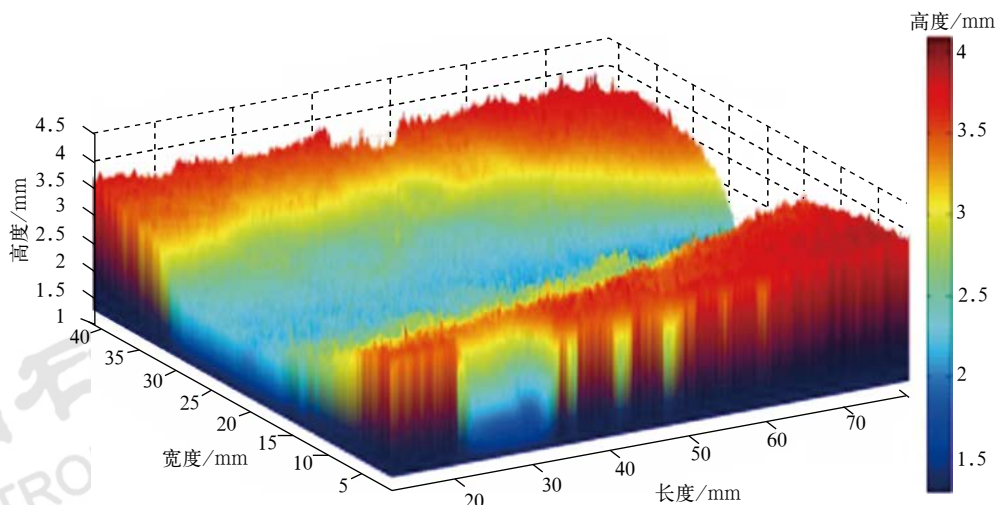


图21 酸蚀裂缝三维激光数字成像图

Fig.21 3D laser digital imaging of acid-etched fractures

酸液体系;结合酸蚀裂缝扩展机理,攻关形成以“多级交替注入、多体系酸液转向、大酸量刻蚀”为核心的多体系深度酸压技术<sup>[62]</sup>,大幅提升酸蚀缝网体积(图22),并根据不同类型储层特征,优选酸液体

系、优化酸压参数,形成了以“非均匀刻蚀、深度转向”为主的差异化多体系深度酸压技术系列,有效提升酸压工艺针对性,规模应用500余口井,初期产量达 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

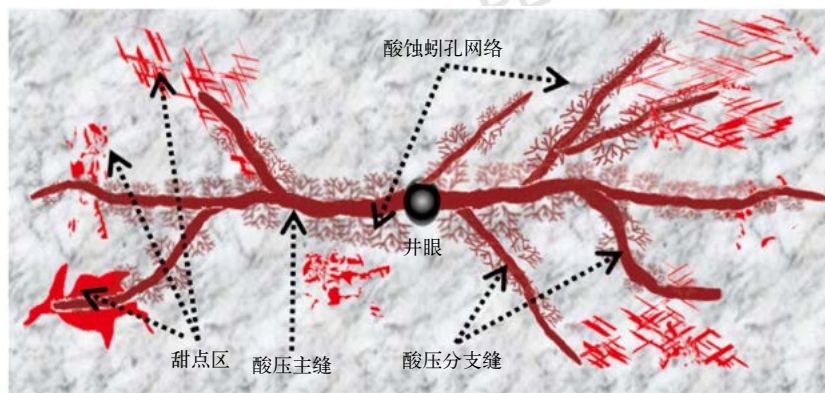


图22 致密碳酸盐岩多体系深度酸压工艺示意图

Fig.22 Schematic diagram of multi-system deep acid fracturing technology for tight carbonate rock

## 4 结论

(1) 鄂尔多斯盆地油气主要分布于伊陕斜坡,平面上呈“满盆气、半盆油”的分布格局,主要发育由长7段远源供烃的侏罗系古地貌油藏、近源聚集的延长组三角洲岩性油藏和长7段自身的页岩油藏,气藏主要类型包括以石炭系—二叠系煤系为气源岩的石炭系—二叠系致密砂岩气藏、奥陶系岩溶古地貌气藏。

(2) 通过持续深化鄂尔多斯盆地综合地质研究,创新发展了“陆相淡水湖盆页岩油、内陆坳陷湖盆大型三角洲、侏罗系古地貌油藏群、陆相致密砂岩气、奥陶系岩溶古地貌天然气”等5项油气地质认识,形成对区域内油气资源宏观、立体、全方位的勘探新认识,相继探明了陕北、姬塬、陇东、华庆4个10亿吨级大油区和下古生界碳酸盐岩、苏里格、盆地东部3个万亿立方米大气区,奠定了稳产发展的资源基础。

(3) 强化基础理论研究和生产实践,在盆地形成了“黄土塬三维地震勘探、低渗透致密油气层测井识别与评价、低渗—致密储层体积压裂”等三大技术系列,地震预测和测井识别精度大幅提高,单井提产效果明显,为盆地油气勘探提供了重要的技术支撑和保障。

(4) 中国在低渗透砂岩、海相碳酸盐岩、页岩油气等领域资源丰富,具有很大的勘探开发潜力,鄂尔多斯盆地下一步勘探工作将重点围绕这3个领域,深

化地质理论认识,强化关键技术攻关,夯实长庆油田二次加快发展的资源基础,为保障国家能源安全做出更大的贡献,同时为国内相关领域的油气勘探提供借鉴。

## 参考文献

- [1] 杨华,张军,王飞雁,等.鄂尔多斯盆地古生界含气系统特征[J].天然气工业,2000,20(6):7-11.  
Yang Hua, Zhang Jun, Wang Feiyan, et al. Characteristics of Paleozoic Gas system in Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2000,20(6):7-11.
- [2] 何自新,付金华,席胜利,等.苏里格大气田成藏地质特征[J].石油学报,2003,24(2):6-12.  
He Zixin, Fu Jinhua, Xi Shengli, et al. Geological features of reservoir formation of Sulige Gas Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(2):6-12.
- [3] 郭忠铭,张军,于忠平.鄂尔多斯地块油区构造演化特征[J].石油勘探与开发,1994,21(2):22-29.  
Guo Zhongming, Zhang Jun, Yu Zhongping. The evolutionary characteristics of structure of the oil and gas bearing areas in Ordos Massif[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994,21(2):22-29.
- [4] 杨华,付金华,魏新善,等.鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域[J].石油学报,2011,32(5):733-740.  
Yang Hua, Fu Jinhua, Wei Xinshan, et al. Natural gas exploration domains in Ordovician marine carbonates, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(5):733-740.
- [5] 付金华,范立勇,刘新社,等.鄂尔多斯盆地天然气勘探新进展、前景展望和对策措施[J].中国石油勘探,2019,24(4):418-430.  
Fu Jinhua, Fan Liyong, Liu Xinshe, et al. New progresses, prospects and countermeasures of natural gas exploration in the

- Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(4):418–430.
- [6] 杨华, 刘新社. 鄂尔多斯盆地古生界煤成气勘探进展[J]. *石油勘探与开发*, 2014,41(2):129–137.
- Yang Hua, Liu Xinshe. Progress of Paleozoic coal-derived gas exploration in Ordos Basin, West China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014,41(2):129–137.
- [7] 席胜利, 刘新社, 孟培龙. 鄂尔多斯盆地大气区的勘探实践与前瞻[J]. *天然气工业*, 2015,35(8):1–9.
- Xi Shengli, Liu Xinshe, Meng Peilong. Exploration practices and prospect of Upper Paleozoic giant gas fields in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015,35(8):1–9.
- [8] 付金华, 牛小兵, 谈卫东, 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, Tan 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.
- [9] 付锁堂, 邓秀芹, 庞锦莲. 晚三叠世鄂尔多斯盆地湖盆沉积中心厚层砂体特征及形成机制分析[J]. *沉积学报*, 2010,28(6):1081–1089.
- Fu Suotang, Deng Xiuqin, Pang Jinlian. Characteristics and mechanism of thick sandbody of Yanchang Formation at the centre of Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010,28(6):1081–1089.
- [10] 付金华, 罗安湘, 喻建, 等. 西峰油田成藏地质特征与勘探方向[J]. *石油学报*, 2004,25(2):25–29.
- Fu Jinhua, Luo Anxiang, Yu Jian, *et al.* Geological features of reservoir formation and exploration[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004,25(2):25–29.
- [11] 杨华, 付金华, 何海清, 等. 鄂尔多斯华庆地区低渗透岩性大油区形成与分布[J]. *石油勘探与开发*, 2012,39(6):641–648.
- Yang Hua, Fu Jinhua, He Haiqing, *et al.* Formation and distribution of large low-permeability lithologic oil regions in Huaqing, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012,39(6):641–648.
- [12] 惠潇, 赵彦德, 邵晓州, 等. 鄂尔多斯盆地中生界石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. *海相油气地质*, 2019,24(2):14–22.
- Hui Xiao, Zhao Yande, Shao Xiaozhou, *et al.* The geological condition, resource potential, and exploration direction of oil in Ordos Basin[J]. *Marian Origin Petroleum Geology*, 2019,24(2):14–22.
- [13] 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.
- [14] 张文正, 杨华, 杨伟伟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 湖相页岩油地质特征评价[J]. *地球化学*, 2015,44(5):505–515.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Weiwei, *et al.* Assessment of geological characteristics of lacustrine shale oil reservoir in Chang 7 Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Geochimica*, 2015,44(5):505–515.
- [15] 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.
- [16] 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(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(5):698–710.
- [17] 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.
- [18] 翟明国. 华北克拉通构造演化[J]. *地质力学学报*, 2019,25(5):722–745.
- Zhai Mingguo. Tectonic evolution of the north China craton[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019,25(5):722–745.
- [19] 翟光明, 王慎言, 史训知. 中国石油地质志(卷十二·长庆油田)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- Zhai Guangming, Wang Shenyan, Shi Xunzhi. *Petroleum Geology of China (volume 12 · Changqing Oilfield)* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [20] 叶博, 梁晓伟, 宋娟, 等. 鄂尔多斯盆地演武地区侏罗系延安组油藏成藏特征[J]. *岩性油气藏*, 2018,30(4):65–73.
- Ye Bo, Liang Xiaowei, Song Juan, *et al.* Reservoir accumulation characteristics of Jurassic Yan'an Formation in Yanwu area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018,30(4):65–73.
- [21] 赵敏, 王多云, 刘军锋, 等. 沉积前古地貌对油藏成藏的有利条件分析——以鄂尔多斯盆地子午岭地区下侏罗统为例[J]. *天然气地球科学*, 2010,21(3):476–481.
- Zhao Min, Wang Duoyun, Liu Junfeng, *et al.* Favorable conditions for petroleum accumulation by paleogeomorphology before deposition-taking Lower Jurassic in Ziwlun area, Ordos Basin as an example[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010,21(3):476–481.
- [22] 袁珍, 李文厚, 朱静, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区侏罗系古地貌恢复及其对石油聚集的影响[J]. *地质通报*, 2013,32(11):1806–1814.
- Yuan Zhen, Li Wenhui, Zhu Jing, *et al.* The restoration of Pre-Jurassic paleogeomorphology and its influence on oil accumulation in Longdong area[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013,32(11):1806–1814.
- [23] 李凤杰, 李磊, 林洪, 等. 鄂尔多斯盆地吴起地区侏罗系侵蚀古河油藏分布特征及控制因素[J]. *天然气地球科学*, 2013,24(6):1109–1117.
- Li Fengjie, Li Lei, Lin Hong, *et al.* Distribution characteristics and controlling factors analyses on incised paleochannel reservoir of valley filling in Jurassic of Wuqi area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013,24(6):1109–1117.
- [24] 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 and significance of the type shale oil risky exploration of Chang 7 of the Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(1):78–92.
- [25] 包洪平, 黄正良, 武春英, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下侧向供烃成藏特征及勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(3):134–145.
- Bao Hongping, Huang Zhengliang, Wu Chunying, *et al.* Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration



- potential of Ordovician pre-salt formations by lateral hydrocarbon supply in the centraleastern Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(3):134-145.
- [26] 曹红霞, 吴海燕, 任星民, 等. 鄂尔多斯盆地东南部奥陶系岩溶地貌与储层分布规律[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(3):146-155.
- Cao Hongxia, Wu Haiyan, Ren Xingmin, *et al.* Karst paleogeomorphology and reservoir distribution pattern of Ordovician in the southeastern Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(3):146-155.
- [27] 赵俊兴, 陈洪德, 时志强. 古地貌恢复技术方法及其研究意义——以鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积前古地貌研究为例[J]. *成都理工大学学报*, 2001,28(3):260-266.
- Zhao Junxing, Chen Hongde, Shi Zhiqiang. The way and implication of rebuilding palaeogeomorphology taking the research of palaeogeomorphology of the Ordos Basin before Jurassic as example[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001,28(3):260-266.
- [28] 郭正权, 潘令红, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系古地貌油田形成条件与分布规律[J]. *中国石油勘探*, 2001,6(4):20-27.
- Guo Zhengquan, Pan Linghong, Liu Xianyang, *et al.* Formation conditions and distribution of Jurassic paleogeomorphologic oilfields in Ordos Basin[J]. *China petroleum exploration*, 2001,6(4):20-27.
- [29] 朱伟林, 张功成, 钟锴. 中国海洋石油总公司“十二五”油气勘探进展及“十三五”展望[J]. *中国石油勘探*, 2012,21(4):1-12.
- Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Zhong Kai. Oil and gas exploration progress of China National Offshore Oil Corporation during the 12<sup>th</sup> Five-Year Plan and the prospect during the 13<sup>th</sup> Five-Year Plan[J]. *China Petroleum Exploration*, 2012,21(4):1-12.
- [30] 戴金星, 钟宁宁, 刘德汉. 中国煤成大中型气田地质基础和主控因素[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- Dai Jinxing, Zhong Ningning, Liu Dehan. The main controlling factor and the geological foundation of the formation of large and medium-sized coal-formed gas field in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [31] 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J]. *石油学报*, 1996,17(1):17-24.
- Ren Zhanli. Research on the relations between geothermal history and oil-gas accumulation in the Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996,17(1):17-24.
- [32] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. *中国科学D辑(地球科学)*, 2007,37(增刊1):27-38.
- Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, *et al.* Tectonic thermal history and its significance on the formation of oil and gas accumulation and mineral deposit in Ordos Basin[J]. *Science in China: Series D (Earth Sciences)*, 2007,37(S1):27-38.
- [33] 邹才能, 陶士振, 侯连华. 非常规油气地质(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua. Unconventional oil and gas geology (2nd edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [34] 付金华, 范立勇, 刘新社, 等. 苏里格气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2019,40(2):240-256.
- Fu Jinhua, Fan Liyong, Liu Xinshe, *et al.* Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Sulige Gas Field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019,40(2):240-256.
- [35] 蔺宏斌, 侯明才, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田北部下二叠统山1段和盒8段物源分析及其地质意义[J]. *地质通报*, 2009,28(4):483-492.
- Lin Hongbin, Hou Mingcai, Chen Hongde, *et al.* Provenance analysis and its geological significance of Shan, session and HeR session in northern Sulige Gas Field, Ordos Basin, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009,28(4):483-492.
- [36] 刘锐娥, 肖红平, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地二叠系“洪水成因型”辫状河三角洲沉积模式[J]. *石油学报*, 2013,34(增刊1):120-127.
- Liu Rui'e, Xiao Hongping, Fan Liyong, *et al.* A depositional mode of flood-induced braided river delta in Permian of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013,34(S1):120-127.
- [37] 朱世发, 朱筱敏, 刘学超, 等. 油气储层火山物质蚀变产物及其对储集空间的影响——以准噶尔盆地克一夏地区下二叠统为例[J]. *石油学报*, 2014,35(2):276-285.
- Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Liu Xuechao, *et al.* Alteration products of volcanic materials and their influence on reservoir space in hydrocarbon reservoirs: evidence from Lower Permian strata in Ke-Xia region, Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014,35(2):276-285.
- [38] 张文忠, 郭彦如, 汤达祯, 等. 苏里格气田上古生界储层流体包裹体特征及成藏期次划分[J]. *石油学报*, 2009,30(5):685-691.
- Zhang Wenzhong, Guo Yanru, Tang Dazhen, *et al.* Characteristics of fluid inclusions and determination of gas accumulation period in the Upper Paleozoic reservoirs of Sulige Gas Field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009,30(5):685-691.
- [39] 赵林, 夏新宇, 戴金星. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气的运移与聚集[J]. *地质地球化学*, 2000,28(3):48-53.
- Zhao Lin, Xia Xinyu, Dai Jinxing. Migration and accumulation of natural gases in Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. *Geology-Geochemistry*, 2000,28(3):48-53.
- [40] 赵文智, 汪泽成, 朱怡翔, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田低效气藏的形成机理[J]. *石油学报*, 2005,26(5):5-9.
- Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Zhu Yixiang, *et al.* Forming mechanism of low efficiency gas reservoir in Sulige Gas Field of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005,26(5):5-9.
- [41] 李熙喆, 张满郎, 谢武仁. 鄂尔多斯盆地上古生界岩性气藏形成的主控因素与分布规律[J]. *石油学报*, 2009,30(2):168-175.
- Li Xizhe, Zhang Manlang, Xie Wuren. Controlling factors for lithologic gas reservoir and regularity of gas distribution in the Upper Paleozoic of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009,30(2):168-175.
- [42] 杨华, 付金华, 刘新社, 等. 苏里格大型致密砂岩气藏形成条件及勘探技术[J]. *石油学报*, 2012,33(增刊1):211-219.
- Yan Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshe, *et al.* Formation conditions and exploration technology of large-scale tight sandstone gas reservoir in Sulige[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012,33(S1):211-219.
- [43] 何自新, 郑聪斌, 王彩丽, 等. 鄂尔多斯盆地靖边气田的发现与勘探[J]. *海相油气地质*, 2005,10(2):37-44.
- He Zixin, Zheng Congbin, Wang Caili, *et al.* Discovery and exploration of Jingbian Gas Field, Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2005,10(2):37-44.
- [44] 杨俊杰. 陕甘宁盆地地下古生界天然气的发现[J]. *天然气工业*, 1991,11(2):1-6.
- Yang Junjie. Exploration and development discovery of the natural gas in Lower Palaeozoic in Shanganning Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 1991,11(2):1-6.
- [45] 张晓星, 陈安清, 党牛, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐岩构造—沉积分异及成藏效应[J]. *中国岩溶*, 2020,39(2):215-223.

- Zhang Xiaoxing, Chen Anqing, Dang Niu, *et al.* Tectono-sedimentary differentiation of lower Palaeozoic carbonate rock in Ordos Basin, NW China and its implications for hydrocarbon-play generation[J]. *Carsologica Sinica*, 2020,39(2):215-223.
- [46] 周进高, 席胜利, 邓红婴, 等. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征[J]. *天然气工业*, 2020,40(2):41-51.
- Zhou Jingao, Xi Shengli, Deng Hongying, *et al.* Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian-Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020,40(2):41-51.
- [47] 杨华, 刘新社, 张道锋. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气成藏主控因素及勘探进展[J]. *天然气工业*, 2013,33(5):1-10.
- Yang Hua, Liu Xinshe, Zhang Daofeng. Main controlling factors of gas pooling in Ordovician marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin and advances in gas exploration[J]. *Natural Gas Industry*, 2013,33(5):1-10.
- [48] 郭彦如, 付金华, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩成藏特征与模式[J]. *石油勘探与开发*, 2014,41(4):393-402.
- Guo Yanru, Fu Jinhua, Wei Xinshan, *et al.* Natural gas accumulation and models in Ordovician carbonates, Ordos Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014,41(4):393-402.
- [49] 戴金星, 夏新宇. 长庆气田奥陶系风化壳气藏、气源研究[J]. *地学前缘*, 1999,6(增刊1):195-203.
- Dai Jinxing, Xia Xinyu. Research on source rock correlation of the ordovician reservoir, Changqing Gasfield[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999,6(S1):195-203.
- [50] 黄第藩, 熊传武, 杨俊杰, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田气源判别和天然气成因类型[J]. *天然气工业*, 1996,16(6):1-5.
- Huang Difan, Xiong Chuanwu, Yang Junjie, *et al.* Natural gas genetic types of central gas field in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 1996,16(6):1-5.
- [51] 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.
- [52] 张晋言. 页岩油测井评价方法及其应用[J]. *地球物理学进展*, 2012,27(113):1154-1162.
- Zhang Jinyan. Well logging evaluation method of shale oil reservoirs and its applications[J]. *Progress in Geophysics*, 2012,27(113):1154-1162.
- [53] 李宪文, 赵振峰, 李喆, 等. 随机分形压裂水平井缝网参数反演方法[J]. *断块油气田*, 2019,26(2):205-209.
- Li Xianwen, Zhao Zhenfeng, Li Zhe, *et al.* Stochastic fractal model for fracture network parameter inversion of fracturing horizontal well[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019,26(2):205-209.
- [54] 赵振峰, 唐梅荣, 杜现飞, 等. 水平井套管定位球座分段多簇压裂技术[J]. *石油钻采工艺*, 2018,40(3):381-399.
- Zhao Zhenfeng, Tang Meirong, Du Xianfei, *et al.* Multi-cluster staged fracturing technology of horizontal well with casing ball seat[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2018,40(3):381-399.
- [55] 李宪文, 刘顺, 陈强, 等. 考虑复杂裂缝网络的致密油藏水平井体积压裂改造效果评价[J]. *石油钻探技术*, 2019,47(6):73-82.
- Li Xianwen, Liu Shun, Chen Qiang, *et al.* An evaluation of the stimulation effect of horizontal well volumetric fracturing in tight reservoirs with complex fracture networks[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019,47(6):73-82.
- [56] 李宪文, 张矿生, 樊凤玲, 等. 鄂尔多斯盆地低压致密油层体积压裂探索研究与试验[J]. *石油天然气学报*, 2013,35(3):142-146.
- Li Xianwen, Zhang Kuangsheng, Fan Fengling, *et al.* Study and experiment on volumetric fracturing in low pressure tight formation of Ordos Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2013,35(3):142-146.
- [57] Zhou Zongqiang, Mu Lijun, Li Xianwen, *et al.* Hybrid fracturing treatments unleash tight oil reservoirs consisting of sand shale sequences in the Changqing Oilfield[C]. *SPE 156179*, 2012.
- [58] 王晓东, 赵振峰, 李向平, 等. 鄂尔多斯盆地致密油层混合水压裂试验[J]. *石油钻采工艺*, 2012,34(5):80-83.
- Wang Xiaodong, Zhao Zhenfeng, Li Xiangping, *et al.* Mixing water fracturing technology for tight oil reservoir in Ordos Basin[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2012,34(5):80-83.
- [59] 马旭, 郝瑞芬, 来轩昂, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏水平井体积压裂矿场试验[J]. *石油勘探与开发*, 2014,41(6):742-747.
- Ma Xu, Hao Ruifen, Lai Xuan'ang, *et al.* Field test of volume fracturing for horizontal wells in Sulige tight sandstone gas reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014,41(6):742-747.
- [60] Mu Lijun, Ma Xu, Zhang Yanming, *et al.* Evaluation of multi-stage Fracturing by Hydrajet, Swellable Packer, and Compressive Packer Techniques in Horizontal Openhole Wells[C]. *SPE 153328*, 2012.
- [61] 周少伟, 刘超, 韩巧荣, 等. 碳酸盐岩气藏不同酸液体系对裂缝导流能力影响的实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2015,15(13):58-62.
- Zhou Shaowei, Liu Chao, Han Qiaorong, *et al.* Influence of reservoir on acid etched fracture conductivity experiment of different acid system for carbonate gas reservoirs[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015,15(13):58-62.
- [62] 刘建坤, 蒋廷学, 周林波, 等. 碳酸盐岩储层多级交替酸压技术研究[J]. *石油钻探技术*, 2017,45(1):104-111.
- Liu Jiankun, Jiang Tingxue, Zhou Linbo, *et al.* Multi-stage alternative acid fracturing technique in carbonate reservoirs stimulation[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017,45(1):104-111.