

引用本文: 隆辉, 曾溅辉, 刘亚洲, 等. 可视化三维物理模拟实验技术在油气成藏研究中的应用——以塔里木盆地顺北地区 S53-2 井为例[J]. 石油实验地质, 2024, 46(5): 1110-1122. DOI: 10.11781/sysydz2024051110.

LONG Hui, ZENG Jianhui, LIU Yazhou, et al. Application of visual 3D physical simulation experiment technology in oil and gas accumulation research: a case study of well S53-2 in Shunbei area of Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(5): 1110-1122. DOI: 10.11781/sysydz2024051110.

可视化三维物理模拟实验技术 在油气成藏研究中的应用

——以塔里木盆地顺北地区 S53-2 井为例

隆 辉^{1,2}, 曾溅辉^{1,2}, 刘亚洲^{1,2}, 杨冀宁^{1,2}, 耿 锋^{1,2}

1. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

摘要: 油气成藏物理模拟实验技术是研究油气运移聚集过程的重要技术手段, 可以在实验室条件下, 实现油气运移成藏动态化、可视化、定量化研究。但传统二维物理模拟实验技术存在细微现象缺乏、含油性测量难、观察面单一等不足。针对这些问题, 同时为了揭示超深层油气成藏特征, 研发了一种可视化三维油气成藏物理模拟实验技术, 并成功模拟了塔里木盆地顺北地区 S53-2 井的成藏过程。明确了超深断控油气藏油气成藏影响因素; 揭示了断层和缝网系统在断控油气藏形成过程中扮演双重角色, 其既作为油气运移通道, 也是重要的油气储集空间; 提出了主断层、缝网及缝网一侧的地堑断层是油气的优势聚集区; 建立了“浮力垂向运移、先核部后破碎带、先主干后地堑、缝网输储一体、主次断裂各异”的油气成藏模式。新技术使实验过程更加清晰, 实验参数更加准确, 实验现象更加立体, 可为实验室油气成藏模拟工作提供新的支撑。

关键词: 断控油气藏; 油气成藏; 物理模拟; 塔里木盆地

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz2024051110

Application of visual 3D physical simulation experiment technology in oil and gas accumulation research:

a case study of well S53-2 in Shunbei area of Tarim Basin

LONG Hui^{1,2}, ZENG Jianhui^{1,2}, LIU Yazhou^{1,2}, YANG Jining^{1,2}, GENG Feng^{1,2}

1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering,
China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract: The physical simulation experiment technology for oil and gas reservoir formation is an important technical means to study the process of oil and gas migration and accumulation. Under laboratory conditions, dynamic, visual, and quantitative research on oil and gas migration and reservoir formation can be achieved. However, traditional two-dimensional physics simulation experimental techniques have shortcomings such as a lack of subtle phenomena, difficulty in measuring oil content, and a single observation surface. To address these issues, and to reveal the characteristics of ultra-deep oil and gas accumulation, a visual 3D physical simulation experiment technology of oil and gas accumulation was developed, and the accumulation process of well S53-2 in Shunbei area of Tarim Basin was successfully simulated. The influencing factors of oil and gas accumulation in ultra-deep fault controlled oil and gas reservoirs have been clarified, revealing that faults and fracture network systems play a dual role in the formation process of fault controlled oil and gas reservoirs, serving as both oil and gas migration channels and

收稿日期(**Received**): 2024-03-19; 修订日期(**Revised**): 2024-08-12; 出版日期(**Published**): 2024-09-28。

作者简介: 隆辉(1998—), 男, 博士生, 从事石油地质和油气成藏研究。E-mail: longleo1997@163.com。

通信作者: 曾溅辉(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事油气运移和油气成藏研究。E-mail: zengjh1215@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目“克拉通盆地内部走滑断裂体系成因及控藏机制研究——以塔里木盆地为例”(U21B2063)资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

important oil and gas storage spaces. It has been proposed that the main fault, fracture network, and the graben fault on one side of the fracture network are advantageous areas for oil and gas accumulation, and a “buoyancy vertical migration, first fault core and then damage zone, first main trunk and then graben, fracture network integrated transportation and storage, and different main and secondary faults” oil and gas accumulation model has been established. The new technology makes the experimental process clearer, the experimental parameters more accurate, and the experimental phenomena more three-dimensional, providing new support for laboratory oil and gas reservoir simulation work.

Key words: fault-controlled reservoir; oil and gas accumulation; physical simulation; Tarim Basin

油气成藏研究是石油地质学至关重要的组成部分,通过研究油气生成、运移和聚集等基本过程,了解油气成藏的条件、影响因素及成藏过程中的动力学机制。研究人员不断探索如何在实验室条件下模拟油气成藏过程,这对揭示油气藏形成条件、动力机制、评估储量潜力以及优化资源开发具有重要意义。物理模拟技术为地质学家提供了新手段,能够直观地观察和分析油气在地质历史中的运移和聚集过程,以动态、直观、定量的方式来研究油气成藏,从而更好地认识油气藏,探讨油气成藏机制,为油气勘探开发提供科学依据。

1 油气成藏物理模拟研究现状

1.1 物理模拟实验类型及特点

多年来,油气成藏物理模拟实验技术蓬勃发展,已在国内外油气成藏研究中广泛应用,实现了实验室条件下,通过物理模型直观地反映油气运聚成藏过程,模拟油气优势运移路径。多年来,物理模拟实验技术不断创新,发展出了不同的实验类型。曾溅辉等^[1]以实验模型的特征及形态分为一维、二维、三维和微观模型实验技术;公言杰等^[2]从实验装置角度,分为一维玻璃管实验、二维可视化运移模拟实验、三维油气运移模拟实验。

本研究在前人的分类基础上,结合模拟实验最新的发展,根据实验装置和模型特征进行划分,分为微观逾渗模拟实验、一维管状模拟实验、二维砂箱模拟实验、二维改良砂箱模拟实验、可视化三维模拟实验,并总结了不同实验类型的技术特征和应用(表1)。

1.2 物理模拟实验发展及现状

1.2.1 启蒙阶段

1909年,MUNN^[3]首先通过实验模拟发现,水流动状态下油水界面随水流方向倾斜,提出石油运移水力说。EMMONS^[4]使用玻璃管弯曲成背斜样式,模拟背斜构造中油气运移特征,提出油和气浮力大小存在差异。1953年,HUBBERT^[5]从运移动力角度模拟动水条件下油水界面变化,提出流体势的概念,油气更容易向低势区运移和聚集。

之后,学者们为了研究微观运移特征和运移力学机制,发展出了微观模型,并逐步探索润湿性、孔隙半径等参数对油气运移的影响。HILL^[6]模拟了粗细交替砂层中油和水的渗流特征,明确动水能促进油水分异,孔隙大小影响石油运移。LENORMAND等^[7]利用微观模型研究了毛细管力和粘性力对油气运移的影响,根据毛细管数和粘性比值,划分了粘性指进、毛细指进和稳定驱替三种运移类型。

表1 模拟实验类型及特点
Table 1 Types and characteristics of simulation experiments

实验分类	装置组成	技术特点	缺点	主要应用
微观逾渗模拟实验	蚀刻玻璃、树脂	用于微观实验	模型制作困难、结果可信度差	用于孔隙尺度浮力运移特征模拟
一维管状模拟实验	玻璃管、钢管、玻璃珠	制作简单、应用广泛	玻璃管模型仅适合低温低压,钢管模型观察难、参数测定难	用于单一方向油气运移路径、机理研究
二维砂箱模拟实验	二维玻璃箱、石英砂	可模拟二维平面运移规律	密封差,仅适合低温低压	用于油气运移特征、方式与成藏影响因素研究
二维改良砂箱模拟实验	二维金属箱、钢板、推进杆、石英砂等	可加温加压、可手动动态模拟	密封差、含油性测定难、缺乏微观现象	用于研究油气运移过程与影响因素
可视化三维模拟实验	三维固结模型、核磁等	可模拟三维立体运移规律、实验过程立体可视、参数测定简单、模型密封		用于油气运移成藏过程与成藏机制研究

1.2.2 快速发展阶段

1979 年, SCHOWALTER^[8]发表文章《油气二次运移和成藏力学机制》,掀起了地质学家们的研究热情,带动了物理模拟实验技术的快速发展。DEMBICKI 等^[9]利用 60 cm×2.5 cm 玻璃管充填亲水沉积物开展模拟,认为在多孔的渗透性地层中石油能通过细小通道发生二次运移,仅少量残余油丢失。CATALAN 等^[10]通过改变石油密度、界面张力、玻璃珠大小及玻璃管倾角等参数,开展油驱水和气驱水物理模拟实验,明确了静水条件下石油二次运移的 4 个特征:①水润湿的储层中,连续油相运移存在临界运移高度;②石油主要通过有限且固定的通道运移;③倾斜地层油气运移效率高于垂直地层;④油气的二次运移速度受孔隙结构、油气密度和初始运移高度影响。

TOKUNAGA 等^[11]利用模拟实验研究,认为油气二次运移受毛细管力、粘滞力、浮力的共同影响,建立了整体驱替和指进驱替两种驱替模式,并通过数学计算进行区分,整体驱替有高的 C/B 值,而指进驱替的 C/B 值较低(C 为驱替流体的粘滞力与毛细管力之比,B 为驱替流体在被驱替流体中受到的浮力与毛细管力之比)。

1.2.3 稳定发展阶段

随着分析和检测设备的进步,研究者结合油田勘探遇到的实际问题,设计新的实验仪器,推动了物理模拟实验技术百花齐放。美国 Exxon 公司的 TOMAS 等^[12]采用相似原理设计了二维砂箱模拟实验,在 100 cm×52 cm×2.5 cm 的装置上模拟了孔隙度 20%、渗透率 $0.1 \mu\text{m}^2$ 、厚度 27 cm 的背斜储集层中的油气运移过程。研究发现,石油对背斜圈闭的充注速率受烃源岩排烃速度影响,且垂向运移石油损失量大,圈闭内横向运移损失小。

模拟技术引入我国后,国内学者也贡献了自己的力量,推动了一维管状模拟实验和二维砂箱实验的发展。张发强等^[13]开展一维管状模拟实验,提出油气运移有非均一性,存在优势通道,且运移过程中有明显的前缘跳跃和分段运移特征。张云峰等^[14]开展二维砂箱实验,认为烃源岩发育超压且断层沟通烃源岩和下部储层是源下岩性油藏成藏的必要条件。曾溅辉等^[15]开展二维砂箱实验,认为岩性圈闭油气成藏受压差、渗透率级差控制。姜林等^[16]通过模拟实验提出,天然气二次运移具有活塞式和优势式 2 个阶段。苗顺德等^[17]和罗晓蓉等^[18]利用模拟实验总结了不同构造油气运移和聚集过程。罗群等^[19]将二维砂箱和手动挤压装置结

合,开发了动态实验模拟,建立了天然气晚期成藏和长期成藏的演化模式。

虽然模拟实验技术不断发展,装置不断改进、要素不断增加,但仍存在许多问题^[19]:①模拟实验常用胶条密封,密封效果差,更换频率高,实验易失败;②油气充注和运移的细微现象不明显,观察难度大;③观察面单一,参数测定难。以上问题影响了油气成藏物理模拟的适用性,影响了对油气充注、运聚、成藏过程和机理的全面认识。本研究结合塔里木盆地顺北地区超深层断控型油气藏特点,为清晰准确地模拟超深断控型油气藏中石油充注和运移过程,规避传统二维物理模拟实验部分缺陷,设计了一种“可视化三维油气运聚成藏模拟装置”,取得了较好的模拟效果,可为研究超深层油气成藏提供新的方法。

2 地质概况

塔里木盆地是我国西部重要的油气资源产地,具有构造条件复杂、油气资源丰富的特征。顺北地区位于盆地中部、地表沙漠覆盖的顺托果勒低隆起上(图 1),南北夹持于沙雅和卡塔克隆起、东西间隔于满加尔坳陷和阿瓦提坳陷之间,是一个低隆起—缓斜坡的弱变形区域^[20~21]。地层稳定沉降,构造受盆地整体演化影响,经历多期调整^[22~24]。加里东早期,处于稳定盆内伸展背景,形成碳酸盐台地;加里东晚期到海西早期,盆地整体挤压,走滑断裂发育,具有多个沉积中心,形成拗陷盆地;海西晚期盆地整体抬升,并再次受挤压作用;喜马拉雅期,整体趋于稳定,地层稳定沉积,断裂发育,并最终调整定型。

目前,顺北地区油气主要赋存于奥陶系一间房组和鹰山组地层中^[25~26],其主要发育灰色泥晶灰岩、颗粒泥晶灰岩、含白云质泥晶灰岩等,基质孔隙度介于 1.2%~4.7%,平均 2.3%,基质渗透率介于 $(0.002~15.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $4.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为典型低孔低渗储层。储层上部发育上奥陶统桑塔木组,岩性为泥岩,厚度普遍大于 1 000 m,是良好的区域盖层;储层下部自下而上发育下寒武统玉尔吐斯组烃源岩、中上寒武统膏盐岩和白云岩;走滑断裂垂向发育,将烃源岩层至储集层的全部地层断穿,断裂顶部发育至泥岩层为止,为油气藏形成创造了良好的运移和储盖条件^[27~29]。同时走滑断裂也控制了断控储集体发育^[30],影响了油气藏分布^[31~34]。

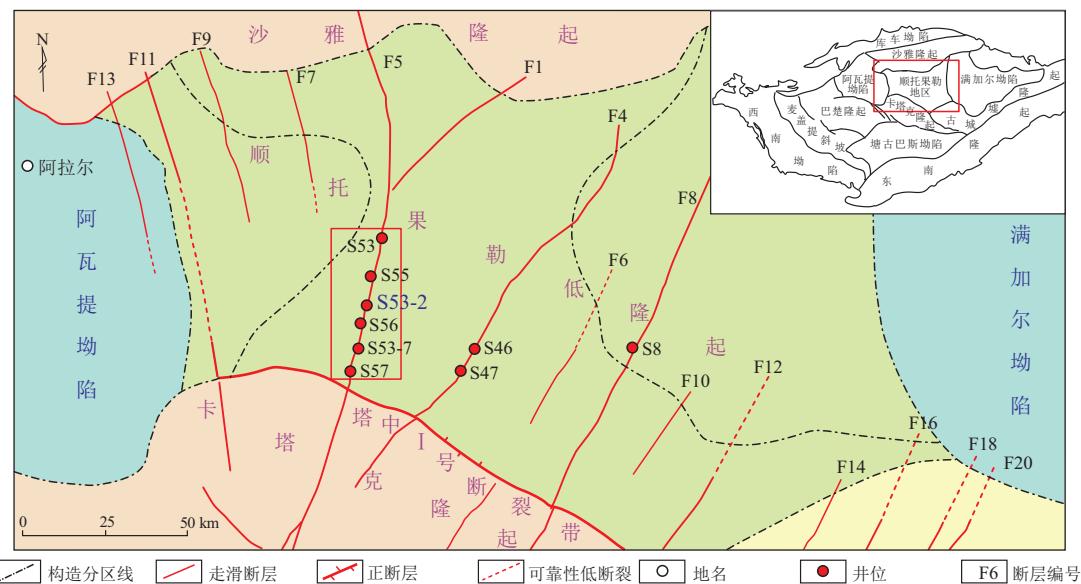


图1 塔里木盆地顺北地区构造位置及断裂分布

Fig.1 Tectonic location and fault distribution in Shunbei area, Tarim Basin

3 典型井油气藏特征

3.1 顺北5号断裂带南段断裂特征

顺北5号断裂带(F5)整体呈南北向展布,具有明显的分段特征,据断裂走向变化分为北(NW20°)、中(NE10°)及南(NE20°)三段(图1)^[35]。顺北5号断裂带南段长约64 km,地层下凹特征明显,整体发育复杂的拉分地堑构造。通过地震剖面解释,明确了一间房组顶面(T_7^4 界面),地震反射清晰,连续性强,断裂组合关系明显(图2a)。平面上,两条边界地堑断裂弯曲辫状发育,中部主断裂线状发育,

处于边界地堑断裂平分线上。垂向上,中部发育一条高陡主断裂,沟通下部寒武系,两侧发育分支断裂,整体呈树杈状,受拉张应力影响,断裂带间地层下掉,形成地堑或复式地堑。

3.2 顺北地区S53-2井油气藏特征

顺北S53-2井位于顺北5号断裂带南段中部,发育典型拉分地堑结构。剖面上主断裂居中发育,断穿寒武系和奥陶系,两侧地堑断面仅在奥陶系地层发育,垂向上向主断层收敛(图2a)。地震同相轴错断明显,落差较大,左侧地堑断裂和中部主断裂均发育红黑相间“串珠”强反射,且主断串

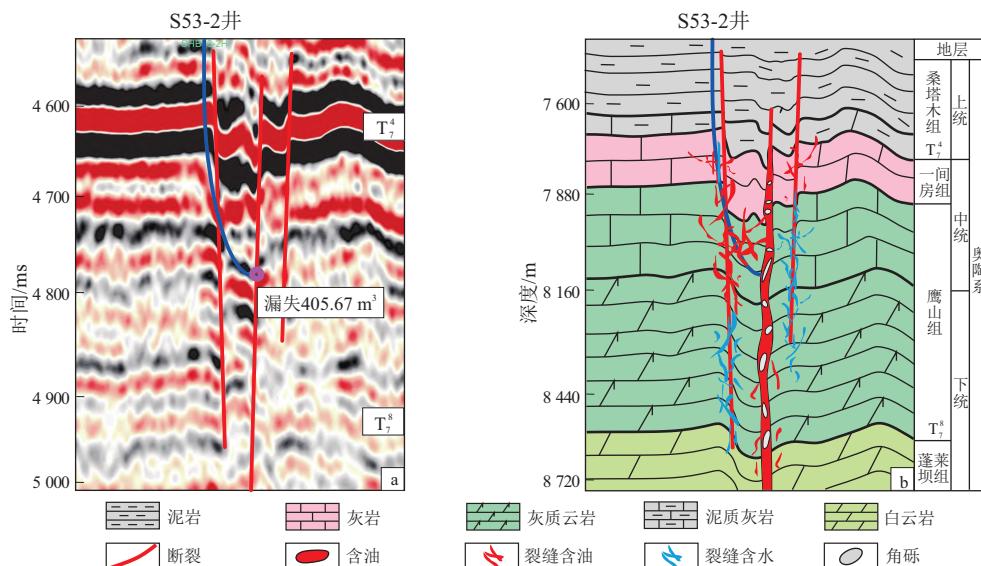


图2 塔里木盆地顺北地区S53-2井剖面特征

a. 垂直断裂走向井轨迹地震剖面; b. 垂直断裂走向井轨迹油藏剖面。

Fig.2 Profile characteristics of well S53-2 in Shunbei area, Tarim Basin

珠长度大于左侧断裂,右侧地堑断裂为杂乱反射。钻进过程中,左侧地堑断裂处发生泥浆溢流,溢流 5 m^3 ;井底主干断裂处经历 2 次钻井液漏失,漏失规模 405.67 m^3 。钻进目的层后,从左侧地堑断裂串珠到井底记录多次油气显示,全烃及甲烷含量一度增高至 80.19%。开井后,日产气 $4.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,关井前累计产液 9908.75 m^3 ,产油 68.36 m^3 ,产气 $262.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

分析认为,顺北地区 S53-2 井断裂为拉分地堑样式,中部主断裂直立高陡,倾角近 80° ,垂向沟通烃源岩,是石油垂向运移主通道。主断裂左右发育地堑断裂,左侧地堑断裂与主断裂之间发育裂缝网络,有油气显示;右侧地堑与主断裂间发育灰岩基质。顺北地区 S53-2 井储集体与断裂息息相关,表现出强烈的断控特征。中部主干走滑和两侧地堑断裂都发育储集体,但中部主干断裂储层规模大,两侧地堑断裂垂向纵深短,储集体规模有限(图 2b)。左侧地堑断裂同相轴错断程度和地层落差均大于右侧,其储集体规模也大于右侧地堑断裂。走滑断裂内部储集体非“板状”连片发育^[36],而是发育断层角砾和破碎带。断控储集体周围发育灰岩和白云岩基岩,岩性致密、物性差,与上部桑塔木组泥岩盖层共同组成侧向遮挡和垂向遮挡。中部主断裂将油气垂向疏导,运移至断控储集体中聚集,并通过裂缝网络侧向调整形成油藏。中部主断裂储集体规模大且直接通源,油气富集程度高,地堑断裂受储集体规模和运移通道影响,油气富集程度较主断裂小,但左侧好于右侧。

4 可视化三维油气成藏物理模拟实验

4.1 三维物理模拟实验改进方案

油气成藏物理模拟实验技术是研究油气运移聚集过程的重要技术手段,能够对油气成藏过程进行动态化、可视化、定量化研究^[2,37],目前在国内各油田的勘探开发研究中广泛运用^[38-40]。但传统二维物理模拟实验技术存在无法测量含油性、仅观察表面运移特征等不足。针对这些问题,对模拟实验进行了改进,研发了可视化三维油气成藏物理模拟实验技术。

(1) 实验模型改进。管状模型和砂箱模型均采用松散玻璃珠或石英砂作为实验材料,用胶条密封,密封效果差。新技术采用矿物材料与环氧胶混合,制作固结实验模型,密封效果更好。

(2) 含油饱和度测量方式改进。目前二维实验装置三面为金属、一面为钢化玻璃,通过玻璃直

接观察模型中流体运移位置,结合注油体积计算含油饱和度,误差较大。新技术运用高温高压驱替核磁共振分析成像系统,直观准确地反映实验过程中模型各部分的含油饱和度,实现了实时测量、精确测量。

(3) 实验方式及观察方式改进。传统物理模拟通过钢化玻璃直接观察模型中流体运移,仅能反映玻璃一侧石油运移情况,模型内部无法观察;且实验中部分油会沿着模型与钢化玻璃接触面运移,并非在构建的模型中运移,导致实验结果存在误差。新技术运用固结模型,结合在线核磁实时成像,规避了石油表面运移的条件,核磁也能反映模型立体状态下,各部分的含油情况,模型内外均可观察。

4.2 三维模拟实验装置

可视化三维物理模拟实验装置由三大系统组成,即三维模拟实验系统、油气充注系统和数据收集分析系统(图 3)。

(1) 三维模拟实验系统,包括三维固结模型和 SPEC 强磁场在线核磁实验装置(图 4)。三维固结

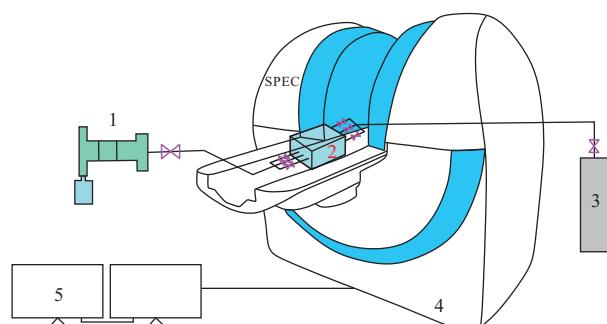


图 3 可视化三维物理模拟实验装置

1. 油气充注装置;2. 三维固结模型;3. 产出气液收集装置;
4. SPEC 在线核磁实验装置;5. 数据采集和分析装置。

Fig.3 Experimental device for visual 3D physical simulation

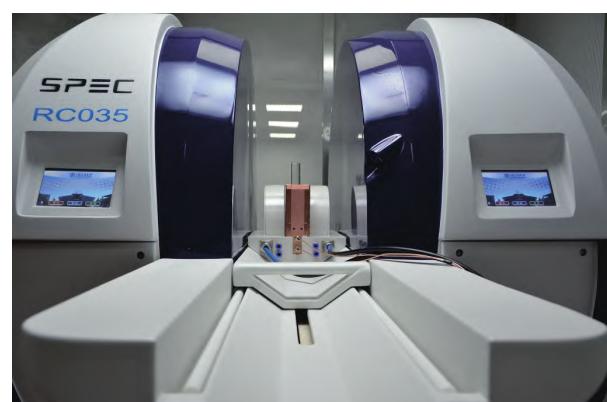


图 4 强磁场在线核磁实验装置

Fig.4 Online nuclear magnetic experiment device with strong magnetic field

模型为 $30\text{ cm}\times 25\text{ cm}\times 25\text{ cm}$ (长×高×厚),整体封闭,仅保留实验设置的流体注入和输出管线。考虑固结模型填埋电极比较困难且尺寸较大,选择核磁共振法测量模型中的含油气情况。核磁共振设备可以通过模型中的油气水信号,反映模型内部油气水运移和分布。因此可将核磁与三维固结模型结合,组成可视化三维油气运聚模拟实验系统。

(2) 油气充注系统,按实验需求可分为充注油系统和充注气系统两类。天然气模拟实验通常以氮气或甲烷气作为实验气体,充注气系统由钢瓶、控制阀门、压力表和注气管组成。实验过程中,调整控制阀门使气体按实验设置压力向模型进行充注。石油模拟实验通常以极性较弱的白油作为实验油。充注油系统由油桶、与控制器连接的 ISCO 泵和注油管组成。实验进行时,调整控制器使 ISCO 泵按实验设置速度向模型进行充注。

(3) 数据收集分析系统(图 5),包含产出气液收集装置(一般为量筒)和数据采集和分析装置(一般为电脑)。

4.3 可视化三维物理模拟实验步骤

(1) 将三维固结模型置于强磁场的 SPEC 在线核磁实验装置中,先用纯净水配置成不同矿化度的水向模型充注,直到充分饱和,注入量等于输出量,此时模型中的空气全部排出。然后根据实验条件,以一定的充注速率向模型中充注油或气。

(2) 通过核磁共振成像方法在线采集二维谱,实时观察油气分布情况,监测油气运移的路径和过程。核磁共振采集图像可以根据实验需求分别进行 XY、XZ、YZ 三个方向中的一个或者多个进行采集。采集图像的同时也要记录 ISCO 泵的注入量、注入压力及出液量(油气水排出量)等实验参数。

(3) 随着实验时间推进,不断重复采集图像、

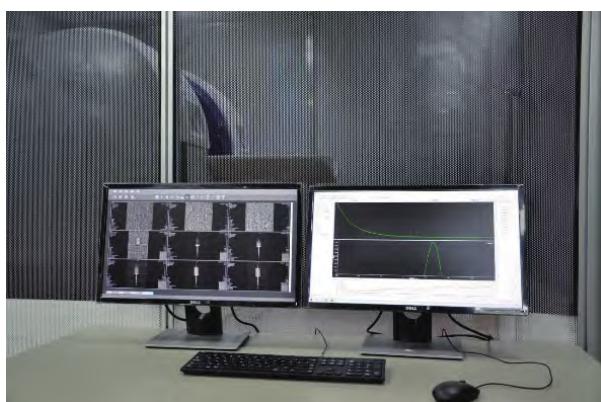


图 5 数据采集和分析装置
Fig.5 Data acquisition and processing system

记录注入量和出液量的步骤,直至模型出口仅出油不出水,且注入量等于排出量;同时观察核磁图像保持稳定,判定实验达到稳定状态,方可结束实验。

4.4 顺北 S53-2 井实验模型及实验设计

4.4.1 三维模拟实验模型

根据顺北 5 号断裂带南段 S53-2 井实际钻井特征,设计实验模型(图 6、图 7),实验参数如表 2 所示。

4.4.2 顺北 S53-2 井三维模拟实验设计

(1) 向实验模型注入水,直至整个实验模型全部饱和,排出模型内所有空气。

(2) 开启出口 1、2、3,关闭出口 4、5,以 0.1 mL/min 的充注速率注油,扫描不同时间实验模型中石油运移情况,记录各测点含油饱和度大小变化,记录各出口的出液量。

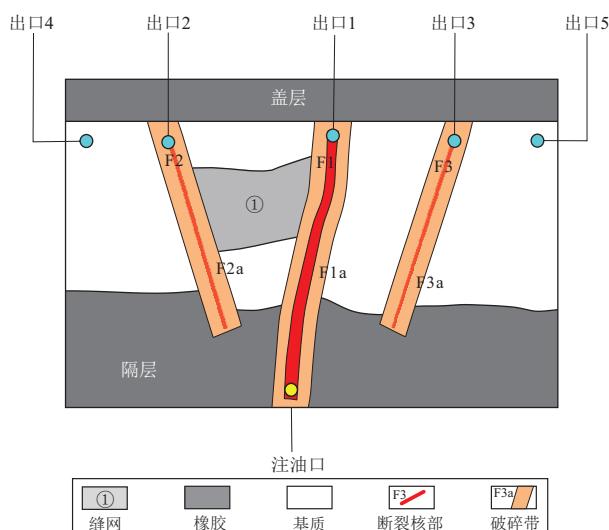


图 6 塔里木盆地顺北地区 S53-2 井设计模型

Fig.6 Design model of well S53-2
in Shunbei area, Tarim Basin

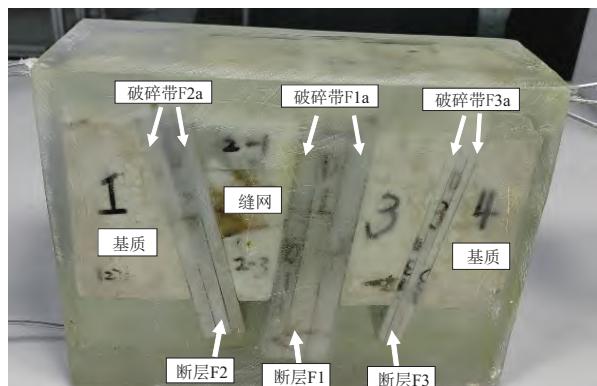


图 7 塔里木盆地顺北地区 S53-2 井实验模型
Fig.7 Experimental model
of well S53-2 in Shunbei area, Tarim Basin

表 2 三维物理模拟实验参数

Table 2 Experimental parameters of three-dimensional physical simulation

编号	宽度/cm	粒径/目	密度/(g/cm ³)	孔隙度/%
断层 F1	1.5	40 : 200(9 : 1)	1.516	37.4
F1 破碎带	3	60	1.625	34.5
断层 F2	1	80	1.600	33.6
F2 破碎带	2	60	2.074	28.4
断层 F3	0.5	80	1.967	25.8
F3 破碎带	1	80 : 200(2 : 1)	2.019	18.7
缝网	5	200	1.728	23.9
基质		200	2.082	15.1
盖层和隔层		橡胶		

注:表中 40 : 200(9 : 1)指 40 目和 200 目以 9 : 1 的比例混合,80 : 200(2 : 1)指 80 目和 200 目以 2 : 1 的比例混合。

(3)当出口 1 开始出油时,关闭出口 1、2、3,开启出口 4、5,扫描不同时间实验模型中几个断裂带和缝网内的石油运移情况,记录各测点含油饱和度大小,记录各出口的出液量。

(4)当出口 4、5 均开始出油,且出油量等于注油量,实验达到稳定状态,实验结束,关闭所有出口,记录各测点的含油饱和度大小,记录各出口的出液量。

4.5 油的运移和聚集过程

本次以 0.1 mL/min 的充注速率进行实验,模拟稳态条件下,断控缝洞油气藏的充注和成藏过程(图 8、图 9)。充注开始后,油先沿着主断层 F1 向上运移,直至断裂顶部,并在断裂顶部富集(图 8a-b、图 9a-b)。注油 290 min 后,断裂 F1 上部 1/3 完全饱和油(图 8c、图 9c);621 min 时,断裂 F1 核部已基本被充满,整体含油饱和度达到 80%以上,部分油开始从断裂顶部扩散进断裂 F1 两侧破碎带(图 8d、图 9d);900 min 时,断裂 F1 左侧破碎带上部 1/2 含油饱和度达到 55%(图 8e、图 9e),部分油从核部顶部向右侧破碎带进行充注。

注油 1 304 min 时(图 8f、图 9f),充注油在经过断层 F1 左侧破碎带进入缝网,以扩散形式逐渐向左侧运移。缝网含油饱和度达到 25%时,沟通左侧断裂 F2,并沿着缝网注入到断层 F2 破碎带。随着充注进行,缝网被油充满。部分充注油通过断层 F2 右侧破碎带进入断层核部(图 8g-h、图 9g-h)。2 112.9 min 时(图 8i、图 9i),断层 F1 右破碎带顶部含油饱和度增加至 60%,部分油经过断层 F1 右侧破碎中部进入基质。

注油 2 586.9 min 时(图 8j、图 9j),断层 F1 右侧破碎带上部 1/2 处均有油充注,充注油不断经过右侧破碎带进入基质。当右侧基质基本含油,且饱

和度增加至 15%~20%,注入油开始进入断层 F3 左侧破碎带(图 8k、图 9k)。此时,部分油气也通过缝网和 F1 左侧破碎带进入左侧基质中。随着实验继续进行,注入油开始稳定向基质充注。5 590.6 min 时(图 8l、图 9l),各出口均排出油,出油速率接近充注速率,实验结束。

5 实验结果与讨论

5.1 油气成藏过程

通过各出口出液量和含油饱和度变化,可将顺北地区 S53-2 井实验过程划分为 3 个阶段:第一阶段中部主断裂成藏阶段,石油沿主断裂 F1 核部快速垂向运移至顶部,核部含油饱和度快速增加至 60%,且具有先断层核后破碎带的油气充注顺序,各断裂含油饱和度快速升高;第二阶段地堑断裂稳定充注阶段,运移速率中等,石油跨过缝网向着左侧地堑断裂 F2 进行充注,在断裂 F2 和缝网中聚集成藏,各断裂含油饱和度稳定增长;第三阶段油藏缓慢调整阶段,石油在顶部封盖条件下,运移进入断裂带周围基质中,部分石油跨过基质向右侧地堑断裂 F3 进行充注,且在断裂 F3 核部和破碎带中聚集成藏,这一阶段运移速率小,各断裂含油饱和度基本不变(图 10、图 11)。

5.2 油气成藏影响因素

5.2.1 剖面结构对油气成藏的影响

中部主干断裂和两侧地堑断裂共同组成顺北 5 号断裂带南段的拉分地堑样式。断裂发育致脆性地层破碎形成缝洞储集体,主断裂直接穿过烃源岩层,为油气充注创造条件。在此情形下,油气才能向断裂带内充注、运移并最终形成油气藏。实验表明,主断裂核部优先成藏,具有先核部后破碎带的石油充注顺序。地堑断裂与主断裂间缝网发育

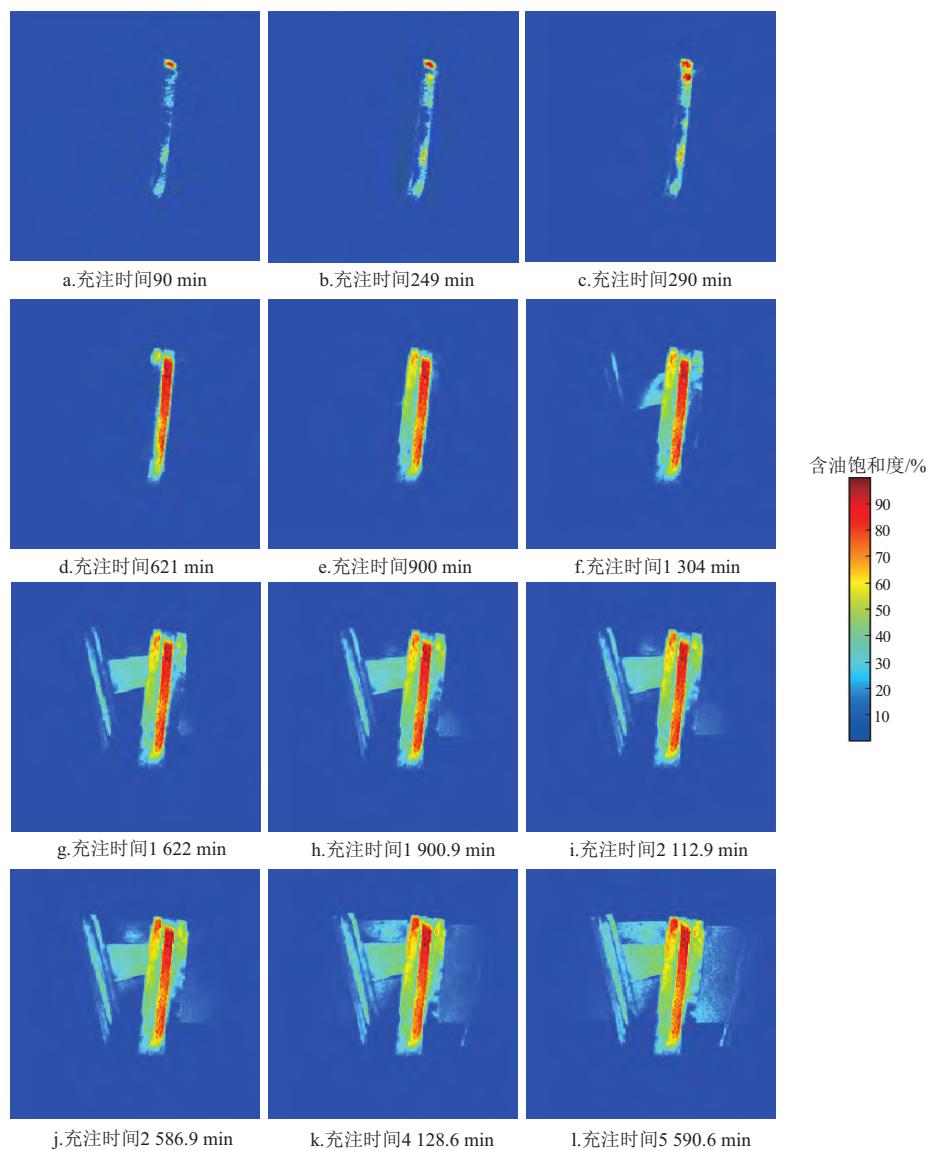


图 8 三维模型物理模拟实验过程(二维视域)

Fig.8 Experimental process of 3D model physical simulation (2D view)

情况影响石油充注顺序。活动性强、地层落差大、串珠发育的地堑断裂与主断裂之间发育密集缝网,相较于基质,石油更易通过缝网运移至地堑断裂中。模拟实验中,主断裂左侧地堑断裂 F2 缝网发育,石油优先充注,并在断裂 F2 核部和破碎带中快速聚集成藏。右侧地堑断裂 F3 缝网不发育,与主断裂之间为基质,油进入基质时间晚,基质中运移速率低,右侧地堑断裂 F3 充注效率低,含油饱和度低,充注时间长(图 8、图 9)。

5.2.2 有利的盖层对油气成藏的影响

受浮力作用影响,油先会沿着通源主断裂垂向运移,并在主断裂顶部聚集成藏。如果没有盖层,油会继续沿着主断裂垂向运移,或通过顶部裂缝逸散,不会在储集层中储集。顺北地区发育广泛的桑塔木组泥岩盖层,为奥陶系断控缝洞型油气藏提供

了较好的封盖条件。在顶部遮挡情况下,油气发生侧向运移,优先充注主断裂核部,之后充注主断裂两侧破碎带,然后通过缝网向地堑断面进行充注(图 8、图 9)。

5.2.3 裂缝发育程度对油气成藏的影响

多期次断裂活动在灰岩地层中形成了一系列的裂缝,断裂间应力集中,地层破碎严重,裂缝密集发育,形成了缝网系统。而碳酸盐岩基质破碎程度小,少量裂缝发育。模拟实验结果表明,缝网系统在断控油气藏形成过程中扮演双重角色:一方面作为油气侧向运移通道,沿主断裂垂向运移的油,在主断裂含油饱和度达到一定程度后,能够通过缝网向地堑断裂进行运移和充注,并在两侧地堑断面中聚集成藏;另一方面,缝网也成为断控油气藏重要的油气储集空间,随着油气不断充注,含油饱和度

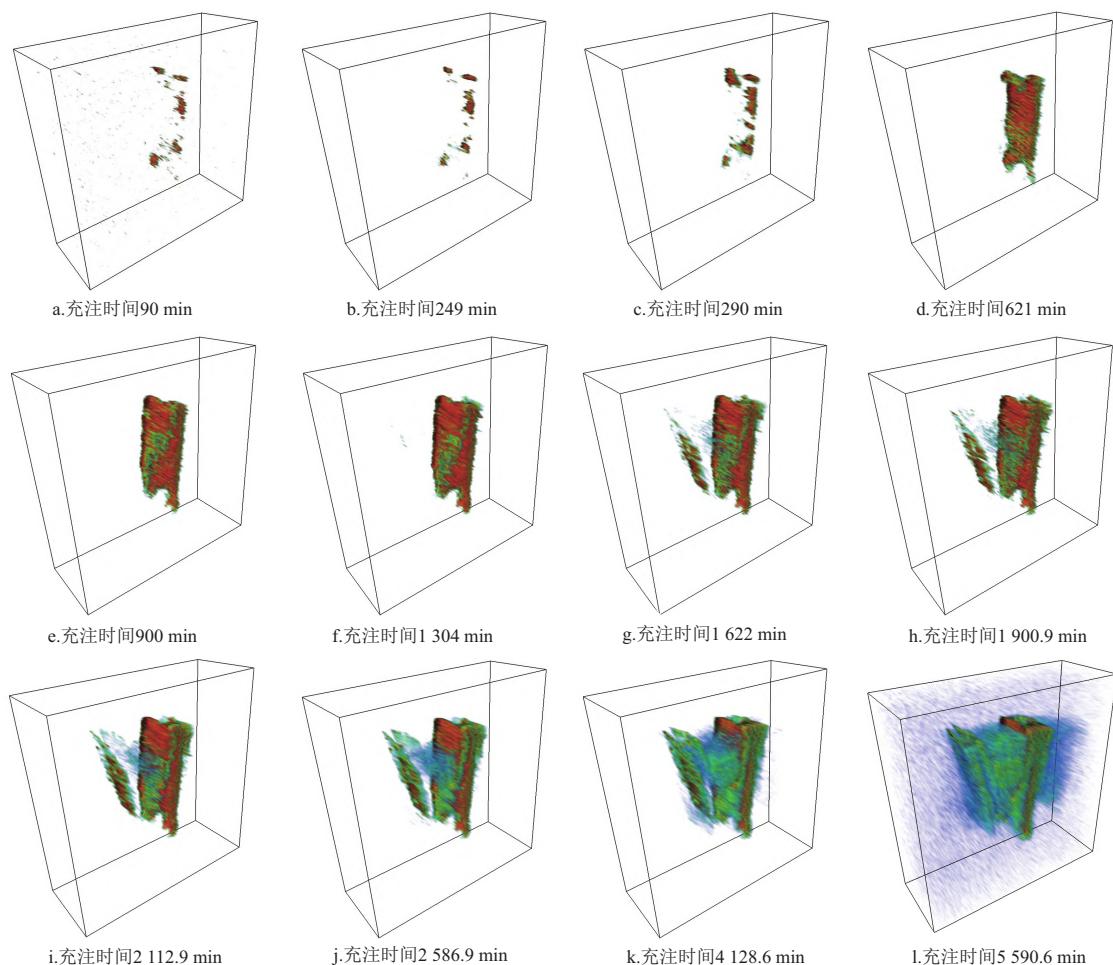


图 9 三维模型物理模拟实验过程(三维视域)

Fig.9 Experimental process of 3D model physical simulation (3D view)

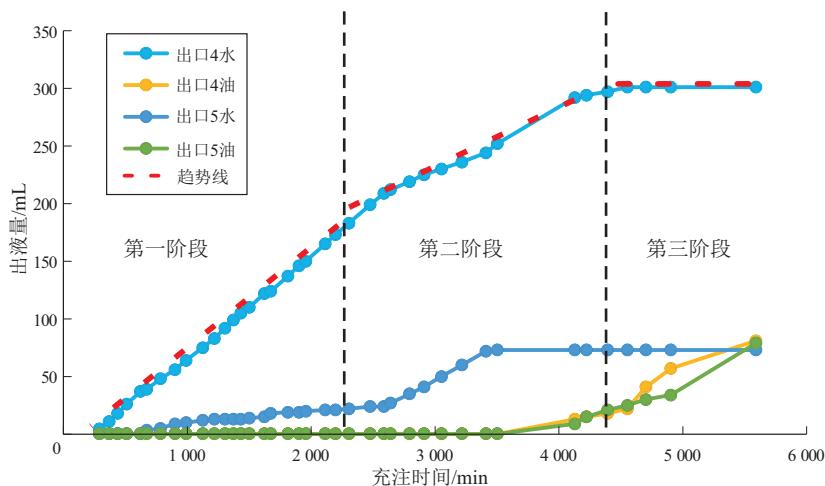


图 10 三维模型不同出口出液量与时间关系

Fig.10 Liquid output vs. time at different exits in 3D model

甚至能够达到 55%，比两侧地堑断裂含油饱和度更高(图 12)。而含少量裂缝的基质油气含量低，通常不具有勘探开发潜力。

5.2.4 石油充注量对油气成藏的影响

油气向储层的充注量决定了油气藏的规模。

在储集体规模一致的情况下，石油充注量越大，油藏规模也越大，主干断裂、地堑断裂和缝网系统均富集油气；石油充注量少，油气柱高度小，仅在主干断裂核部顶端成藏，整体含油饱和度低。定义充注倍数为充注油体积与实验结束模型内注油总体积

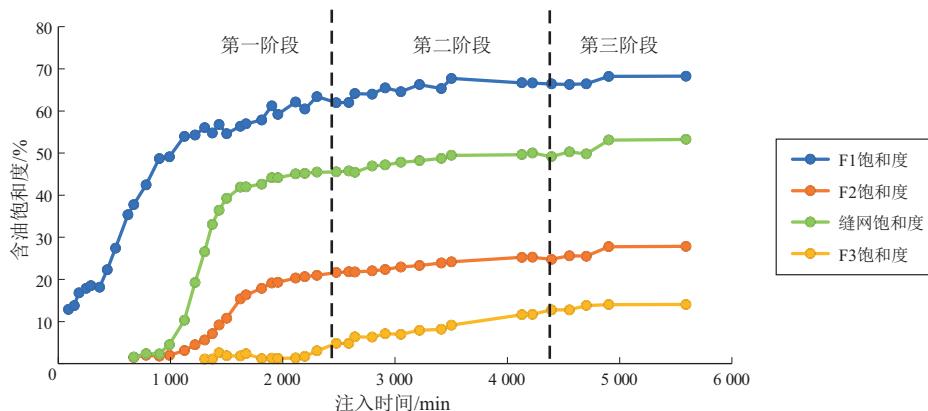


图 11 实验中各断裂含油饱和度变化
Fig.11 Oil saturation changes in each fault during the experiment

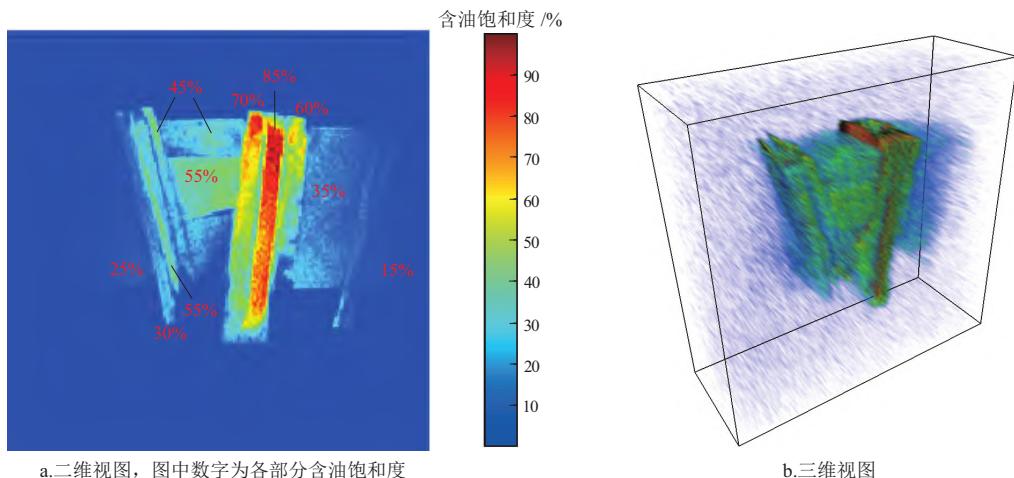


图 12 充注至稳定状态下模型各部分含油饱和度
Fig.12 Oil saturation of each part of the model when it is charged to a steady state

之比。如图 13 所示,充注倍数小于 0.1 时,主要在中部主断裂核部富集;充注倍数大于 0.1 小于 1 时,石油在中部主干断裂、左侧地堑断裂和缝网中富集;充注倍数等于 1 时,主断裂、地堑断裂和缝网均富集油气,甚至基质也有部分油充注。

5.2.5 核带结构及其物性对油气成藏的影响

走滑断裂核部发育断裂空腔,其物性好于两侧

破碎带。石油充注时,断裂核部优先充注油气,为油气运移的主通道;核部含油饱和度达到 75% 以上时,石油才进入两侧破碎带。实验时,具有先核部后破碎带的石油充注顺序,主断裂 F1 中物性更好的断层核部相较破碎带拥有更好的运移优势(图 12)。

5.3 油气成藏模式

在顶部桑塔木组泥岩盖层遮挡下,受浮力作用

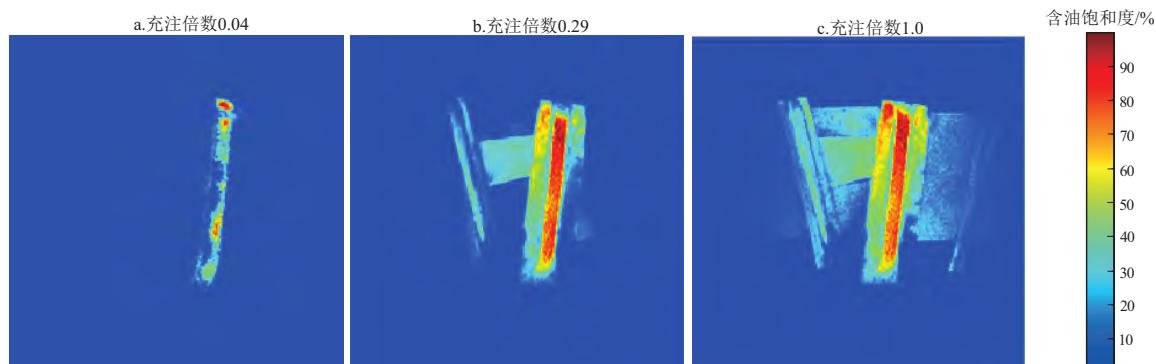


图 13 不同充注倍数石油成藏特征
Fig.13 Reservoir formation characteristics of different charging multiples

影响,石油沿中部主干断裂核部线向上运移至断裂顶部富集,并具有先核部后破碎带的石油充注顺序。在中部主断裂含油饱和度达到 60% 后,且充注倍数大于 0.1,石油通过缝网向地堑断裂进行运移和充注,并在左侧地堑断裂富集成藏。此时,缝网既能够输导油气,也能成为油气储集空间,含油饱和度甚至能够达到 55%,比两侧地堑断裂含油饱和度更高。以顺北地区 S53-2 井为例,建立了顺北 5 号断裂带南段“浮力垂向运移、先核部后破碎带、先主干后地堑、缝网输储一体、主次断裂各异”的油气成藏模式(图 14)。明确了主断裂核部及缝网连通次断裂为油气运聚潜力区,可以作为重点勘探目标。该研究结果为指导研究区下一步勘探工作提供了有力支撑。

6 结论

(1) 可视化三维油气成藏物理模拟技术是对传统二维油气成藏物理模拟实验技术的突破。针

对传统二维物理模拟实验技术缺乏细微运移现象、无法测量含油性、仅观察表面油气运移特征等情况进行改进,通过制作三维固结模型,结合高温高压驱替核磁共振分析与成像系统,使实验过程更加清晰,实验参数更加准确,实验现象更加立体。

(2) 可视化三维油气成藏物理模拟实验表明,中部主断层是油气运移的主要通道和聚集场所,直接控制了 5 号断裂带南段油气成藏,主断层、缝网及缝网发育一侧的地堑断层是油气的优势聚集区。断层核部与破碎带有明显物性差异,物性更好的断层核相较断层破碎带拥有更好的运移优势。缝网系统在断控油气藏形成过程中扮演双重角色,既作为油气侧向运移通道,也成为断控油气藏重要的油气储集空间。

(3) 顺北 5 号断裂带南段油气成藏特征受剖面结构、盖层封闭情况、裂缝发育程度、核带结构及其物性、石油充注量 5 个方面的影响。当断裂顶部盖层封闭性好、缝网发育、石油充注量足够大时,主次断裂核部和破碎带、缝网和基质均可充注油气,断裂控制区域均可成藏。结合实验结果,建立了“浮力垂向运移、先核部后破碎带、先主干后地堑、缝网输储一体、主次断裂各异”的油气成藏模式。

致谢:感谢中国石化西北油田分公司朱秀香研究员、黄诚所长、朱莲花工程师提供的生产资料和帮助,感谢杜玉龙老师在实验设计和操作中的帮助,在此致以衷心感谢!

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

隆辉、曾溅辉、刘亚洲参与实验设计;杨冀宁、耿峰完成实验操作;隆辉参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。
The study was designed by LONG Hui, ZENG Jianhui, and LIU Yazhou. The experimental operation was completed by YANG Jining and GENG Feng. The manuscript was drafted and revised by LONG Hui. All authors have read the last version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

- [1] 曾溅辉,金之钧,王伟华.油气二次运移和聚集实验模拟研究现状与发展[J].石油大学学报(自然科学版),1997,21(5):94-97.
ZENG Jianhui, JIN Zhijun, WANG Weihua. Status and advances of the studies on the experimental simulation of secondary hydrocarbon migration and accumulation [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1997, 21(5): 94-97.
- [2] 公言杰,柳少波,姜林,等.油气二次运移可视化物理模拟实验技术研究进展[J].断块油气田,2014,21(4):458-462.

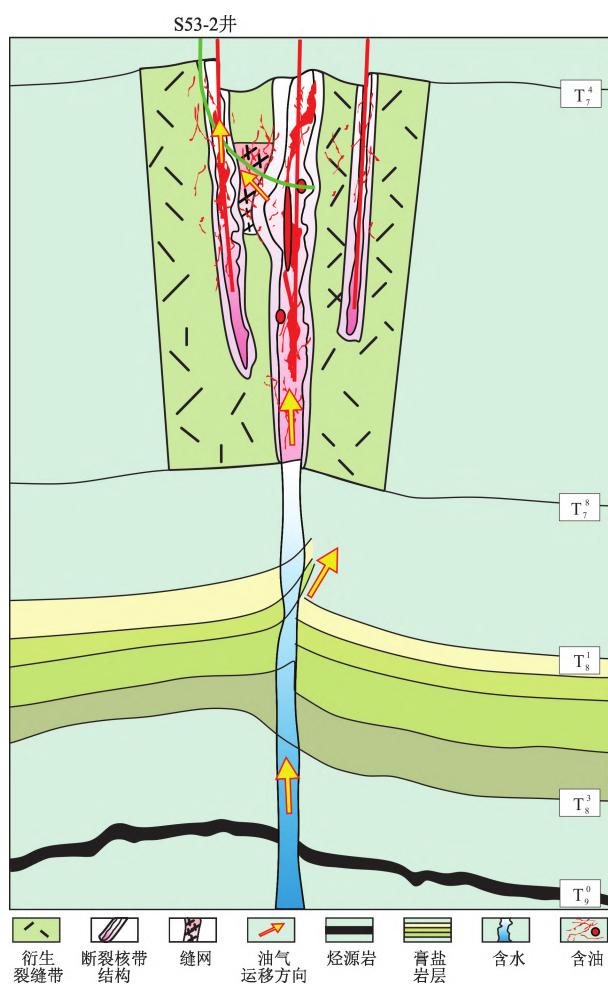


图 14 塔里木盆地顺北地区 S53-2 井油气成藏模式

Fig.14 Oil and gas accumulation model of well S53-2 in Shunbei area, Tarim Basin

- GONG Yanjie, LIU Shaobo, JIANG Lin, et al. Research progress in visual physical simulation experiment technology of secondary hydrocarbon migration [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(4): 458–462.
- [3] MUNN M J. Studies in the application of the anticlinal theory of oil and gas accumulation [J]. Economic Geology, 1909, 4(2): 141–157.
- [4] EMMONS W H. Experiments on accumulation of oil in sands: abstract [J]. AAPG Bulletin, 1921, 5(1): 103–104.
- [5] HUBBERT M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions [J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(8): 1954–2026.
- [6] HILL V G. Geochemical prospecting for nickel in the Blue Mountain area, Jamaica, W.I. [J]. Economic Geology, 1961, 56(6): 1025–1032.
- [7] LENORMAND R, TOUBOUL E, ZARCONE C. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 189: 165–187.
- [8] SCHOWALTER T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(5): 723–760.
- [9] DEMBICKI Jr H, ANDERSON M J. Secondary migration of oil: experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits: geologic note [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(8): 1018–1021.
- [10] CATALAN L, FU X, CHATZIS I, et al. An experimental study of secondary oil migration [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(5): 638–650.
- [11] TOKUNAGA T, MOGI K, MATSUBARA O, et al. Buoyancy and interfacial force effects on two-phase displacement patterns: an experimental study [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(1): 65–74.
- [12] THOMAS M M, CLOUSE J A. Scaled physical model of secondary oil migration [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(1): 19–28.
- [13] 张发强,罗晓容,苗盛,等.石油二次运移优势路径形成过程实验及机理分析[J].地质科学,2004,39(2):159–167.
- ZHANG Faqiang, LUO Xiaorong, MIAO Sheng, et al. Experiments on oil migrating in a limited pathway and the mechanism analysis [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(2): 159–167.
- [14] 张云峰,王朋岩,陈章明.烃源岩之下岩性油藏成藏模拟实验及其机制分析[J].地质科学,2002,37(4):436–443.
- ZHANG Yunfeng, WANG Pengyan, CHEN Zhangming. A modeling experiment on lithologic reservoir formation underlying source rocks and analysis of the mechanism [J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(4): 436–443.
- [15] 曾溅辉,王洪玉.反韵律砂层石油运移模拟实验研究[J].沉积学报,2001,19(4):592–597.
- ZENG Jianhui, WANG Hongyu. Experimental study of oil migration in coarsening upwards sands [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 592–597.
- [16] 姜林,洪峰,柳少波,等.油气二次运移过程差异物理模拟实验[J].天然气地球科学,2011,22(5):784–788.
- JIANG Lin, HONG Feng, LIU Shaobo, et al. Physical simulation of oil and natural gas secondary migration [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(5): 784–788.
- [17] 苗顺德,曾溅辉,李秋芬.复合反“Y”字型构造中油气二次运移与聚集过程物理模拟研究;以黄骅坳陷港东构造带为例[J].石油天然气学报,2007,29(6):18–20.
- MIAO Shunde, ZENG Jianhui, LI Qiufen. Physical simulation of secondary petroleum migration and accumulation process in complicated reserve Y-type structures by taking Gangdong tectonic belt in Huanghua Depression for example [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(6): 18–20.
- [18] 罗晓容.油气运聚动力学研究进展及存在问题[J].天然气地球科学,2003,14(5):337–346.
- LUO Xiaorong. Review of hydrocarbon migration and accumulation dynamics [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(5): 337–346.
- [19] 罗群,王仕琛,贾春,等.断控气藏的动态成藏物理模拟与启示:以柴达木盆地西北地区典型气藏为例[J].石油实验地质,2022,44(5):790–803.
- LUO Qun, WANG Shichen, JIA Chun, et al. Physical simulation of dynamic accumulation of fault-controlled gas reservoirs and its implications: a case study of typical gas reservoirs in northwest part of Qaidam Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(5): 790–803.
- [20] 韩晓影,汤良杰,曹自成,等.塔中北坡“复合花状”构造发育特征及成因机制[J].地球科学,2018,43(2):525–537.
- HAN Xiaoying, TANG Liangjie, CAO Zicheng, et al. Characteristics and formation mechanism of composite flower structures in northern slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin [J]. Earth Science, 2018, 43(2): 525–537.
- [21] 汤良杰,漆立新,邱海峻,等.塔里木盆地断裂构造分期差异活动及其变形机理[J].岩石学报,2012,28(8):2569–2583.
- TANG Liangjie, QI Lixin, QIU Haijun, et al. Poly-phase differential fault movement and hydrocarbon accumulation of the Tarim Basin, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2569–2583.
- [22] 刘雨晴,邓尚,张继标,等.塔里木盆地顺北及邻区走滑断裂体系差异发育特征及成因机制探讨[J].地学前缘,2023,30(6):95–109.
- LIU Yuqing, DENG Shang, ZHANG Jibiao, et al. Characteristics and formation mechanism of the strike-slip fault networks in the Shunbei area and the surroundings, Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 95–109.
- [23] 邓尚,李慧莉,张仲培,等.塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J].石油与天然气地质,2018,39(5):878–888.
- DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 878–888.
- [24] 邓尚,刘雨晴,刘军,等.克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义;以塔里木盆地顺北地区为例[J].大地构造与成矿学,2021,45(6):1111–1126.
- DENG Shang, LIU Yuqing, LIU Jun, et al. Structural styles and evolution models of intracratonic strike-slip faults and the implications for reservoir exploration and appraisal: a case study of the Shunbei area, Tarim Basin [J]. Geotectonica et Metallogenesis, 2020,

- 45(6):1111–1126.
- [25] 邓尚,李慧莉,韩俊,等.塔里木盆地顺北 5 号走滑断裂中段活动特征及其地质意义 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5):990–998.
DENG Shang, LI Huili, HAN Jun, et al. Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin and its geological significance [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5):990–998.
- [26] 林波,张旭,况安鹏,等.塔里木盆地走滑断裂构造变形特征及油气意义:以顺北地区 1 号和 5 号断裂为例 [J]. 石油学报, 2021, 42(7):906–923.
LIN Bo, ZHANG Xu, KUANG Anpeng, et al. Structural deformation characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and their hydrocarbon significance: a case study of No.1 fault and No.5 fault in Shunbei area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 906–923.
- [27] 云露,朱秀香.一种新型圈闭:断控缝洞型圈闭 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1):34–42.
YUN Lu, ZHU Xiuxiang. A new trap type:fault-controlled fracture-vuggy trap [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1):34–42.
- [28] 漆立新.塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义 [J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3):38–51.
QI Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shantuogule Uplift, Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3):38–51.
- [29] 焦方正.塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2):207–216.
JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2):207–216.
- [30] 刘宝增.塔里木盆地顺北地区油气差异聚集主控因素分析:以顺北 1 号、顺北 5 号走滑断裂带为例 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3):83–95.
LIU Baozeng. Analysis of main controlling factors of oil and gas differential accumulation in Shunbei area, Tarim Basin: taking Shunbei No.1 and No.5 strike slip fault zones as examples [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3):83–95.
- [31] 漆立新.塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1):102–111.
QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1):102–111.
- [32] 漆立新,云露,曹自成,等.顺北油气田地质储量评估与油气勘探方向 [J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2):127–135.
QI Lixin, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Geological reserves assessment and petroleum exploration targets in Shunbei oil & gas field [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2):127–135.
- [33] 云露,邓尚.塔里木盆地深层走滑断裂差异变形与控储控藏特征:以顺北油气田为例 [J]. 石油学报, 2022, 43(6):770–787.
YUN Lu, DENG Shang. Structural styles of deep strike-slip faults in Tarim Basin and the characteristics of their control on reservoir formation and hydrocarbon accumulation: a case study of Shunbei oil and gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6):770–787.
- [34] 林波,云露,李海英,等.塔里木盆地顺北 5 号走滑断层空间结构及其油气关系 [J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6):1344–1353.
LIN Bo, YUN Lu, LI Haiying, et al. Spatial structure of Shunbei No.5 strike-slip fault and its relationship with oil and gas reservoirs in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1344–1353.
- [35] 鲍典,曹飞,张娟,等.超深层走滑断裂带应力场模拟及其开发意义:以顺北 5 号断裂带南段为例 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31):13254–13264.
BAO Dian, CAO Fei, ZHANG Juan, et al. Simulation of stress field in ultra deep strike slip fault zone and its development significance: a case study of the southern section of Shunbei No.5 fault zone [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(31):13254–13264.
- [36] 李映涛,邓尚,张继标,等.深层致密碳酸盐岩走滑断裂带核带结构与断控储集体簇状发育模式:以塔里木盆地顺北 4 号断裂带为例 [J]. 地学前缘, 2023, 30(6):80–94.
LI Yingtao, DENG Shang, ZHANG Jibiao, et al. Fault zone architecture of strike-slip faults in deep, tight carbonates and development of reservoir clusters under fault control: a case study in Shunbei, Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6):80–94.
- [37] 郭铮. 埋岛地区新近系石油运移与聚集物理模拟实验研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
GUO Zheng. Physical simulation experiment study of Neogene petroleum migration and accumulation in Chengdao area [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [38] 曾溅辉,王洪玉. 输导层和岩性圈闭中石油运移和聚集模拟实验研究 [J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 1999, 24(2):193–196.
ZENG Jianhui, WANG Hongyu. An experimental study of petroleum migration and accumulation in carrier bed and lithological trap [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 1999, 24(2):193–196.
- [39] 曾溅辉,王捷等. 油气运移机理及物理模拟实验 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003:1–2.
ZENG Jianhui, WANG Jie, et al. Mechanisms and physical simulation of hydrocarbon migration [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003:1–2.
- [40] 陈章明,张云峰,韩有信,等.凸镜状砂体聚油模拟实验及其机理分析 [J]. 石油实验地质, 1998, 20(2):166–170.
CHEN Zhangming, ZHANG Yunfeng, HAN Youxin, et al. A modeling experiment and mechanism analysis of oil accumulation in pod-like sand-body [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1998, 20(2):166–170.

(编辑 张玲珑)