

引用格式:王建,刘丽杰,吴义志,等.胜利油田水驱开发技术进展及发展方向[J].油气地质与采收率,2024,31(5):99-112.  
WANG Jian, LIU Lijie, WU Yizhi, et al. Progress and direction of water flooding development technologies in Shengli Oilfield[J].  
Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(5): 99-112.

## 胜利油田水驱开发技术进展及发展方向

王建<sup>1</sup>,刘丽杰<sup>1</sup>,吴义志<sup>1</sup>,刘海成<sup>1,2</sup>,贾元元<sup>1</sup>,宋志超<sup>1</sup>,陶仕玉<sup>1</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营257015;2.中国地质大学(北京)能源学院,北京100083)

**摘要:**水驱油藏是中国东部老油田开发的主体,经过长期注水开发已整体进入特高含水期,室内研究及矿场实践表明,仍有大幅度提高采收率的潜力,但受储层非均质性和开发动态非均质性影响,科学开发和效益开发难度加大,亟需攻关进一步提高采收率技术。整装油藏针对特高含水后期极端耗水严重、效益稳产及水驱提高采收率难等问题,深化了极端耗水层带理论,创新形成了层系近阻重组开发技术、特高含水油藏矢量开发技术和特高含水后期流场调整开发技术,实现了控耗水、降递减,平均采收率为43.7%;断块油藏针对断层多、断块小的特点及特高含水期剩余油规模小、动用难的问题,深化剩余油富集规律及水动力调控机制认识,创新形成了人工边水驱、立体开发等主导开发技术系列,提高了储量控制和水驱动用程度,平均采收率为29.4%,支撑了断块油藏效益稳产;低渗透油藏针对储层物性差、有效建驱难等问题,持续开展非线性渗流机理和压驱开发机理研究,攻关配套开发技术,不断拓宽开发界限,创新形成特低渗透油藏仿水平井注水、一般低渗透油藏井网适配提高采收率、低渗透致密油藏压驱注水等差异开发技术系列,平均采收率为15.7%,实现了低渗透油藏提速提效开发。通过以上技术进步,实现了特高含水期水驱油藏的效益开发。结合不同类型油藏开发特点及面临形势,对水驱油藏进一步提高采收率提出了下步发展方向。

**关键词:**水驱;剩余油;开发理论;开发技术;提高采收率;发展方向

文章编号:1009-9603(2024)05-0099-14

DOI:10.13673/j.pgre.202405059

中图分类号:TE341

文献标识码:A

## Progress and direction of water flooding development technologies in Shengli Oilfield

WANG Jian<sup>1</sup>, LIU Lijie<sup>1</sup>, WU Yizhi<sup>1</sup>, LIU Haicheng<sup>1,2</sup>, JIA Yuanyuan<sup>1</sup>, SONG Zhichao<sup>1</sup>, TAO Shiyu<sup>1</sup>

(1.Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China;2.School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083, China)

**Abstract:** Water-flooding reservoirs are the mainstay in developing mature oilfields in eastern China, and they have entered the ultra-high water cut stage as a whole after long-term water injection development. Laboratory studies and field practice show that there is still potential for significantly enhancing oil recovery. However, the difficulty of scientific and efficient development has increased due to the heterogeneity of reservoirs and development dynamics, and further research is needed to enhance oil recovery technology. Uncompartmentalized reservoirs face challenges such as severe extreme water consumption in the later stage of ultra-high water cut, affecting stable production and enhanced oil recovery through water flooding. Therefore, the theory of high water consumption zones was deepened, and the development technology of near-resistance layer recombination, the vector development technology of ultra-high water cut reservoirs, and the development technology of flow field adjustment in the later stage of ultra-high water cut were developed through innovation, achieving water consumption control and reduction, with an average oil recovery

收稿日期:2024-05-24。

作者简介:王建(1968—),男,江苏如皋人,正高级工程师,博士,从事油气田开发研究与实践工作。E-mail:wangjian988.slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化重点科技项目“多层系高含水油藏大幅度提高采收率关键技术”(P22021)、“套管钻井井网重构技术与工程应用”(P24089)、“高含水老油田流场表征与开发优化调控技术研究”(P21017)、“油藏地球物理软件集成及示范应用”(P24038)和“特低渗透油藏未开发储量效益开发关键技术”(P24021)。

ery of 43.7%. In response to the characteristics of fault block reservoirs with numerous faults and small fault blocks, as well as the challenges of small remaining oil reserves and difficult exploitation during the ultra-high water-cut stage, understanding of the accumulation patterns of remaining oil and hydrodynamic regulation mechanisms was deepened. A series of leading development technologies were developed through innovation, such as artificial peripheral water flooding and stereoscopic development, improving reserve control and water flooding efficiency, with an average oil recovery of 29.4%. These technologies have supported the stable and profitable production of fault block reservoirs. Given the poor physical properties of low-permeability reservoirs and the difficulty of effective water flooding, nonlinear flow mechanisms and pressure flooding development mechanisms were researched, supporting development technologies were formed, and the development limits were constantly broadened. A series of differential development technologies have been innovated, such as water injection of simulated horizontal wells in ultra-low permeability reservoirs, well pattern adaptation for enhanced oil recovery in general low-permeability reservoirs, and pressure flooding in low-permeability and tight reservoirs, with an average oil recovery of 15.7%, realizing rapid and efficient development of low-permeability reservoirs. Through the above technical research, the efficient development of water-flooding reservoirs in ultra-high water cut stage is realized. According to the development characteristics and situation of different types of reservoirs, the directions for further enhancing oil recovery of water-flooding reservoirs are being put forward.

**Key words:** water flooding; remaining oil; development theory; development technology; enhanced oil recovery; development direction

胜利水驱油藏主要包括整装、断块和低渗透3种油藏类型,截至2023年底,水驱油藏动用石油地质储量为 $37.2 \times 10^8$  t,年产油量为 $1\,400 \times 10^4$  t/a,储量和产量均占胜利油田的2/3以上,是胜利油田稳产的压舱石。经过60多年的开发,水驱油藏已处于特高含水开发阶段,平均含水率超过90%,采出程度较低,仍有大幅度提高采收率的潜力,但受储层非均质性和开发动态非均质性影响,科学开发和效益开发难度加大,需要攻关进一步提高采收率技术。整装油藏目前已整体进入特高含水后期,水油比高,耗水量大,高耗水成为制约该类油藏进一步提高水驱采收率、实现效益开发的关键难题<sup>[1-2]</sup>。断块油藏断裂系统复杂、纵向小层多且非均质性强<sup>[3]</sup>,特高含水开发期老井井况恶化、动态非均质性增强,导致该类油藏采收率偏低,经过多轮次调整,平面和纵向开发的不均衡制约了断块油藏的高效开发。低渗透油藏储层埋藏深、丰度低、物性差,老区经过多年开发,平面和纵向动用差异大,应力场和压力场与原始状态相比发生了较大改变<sup>[4]</sup>,制约了开发效果,目前地层能量保持水平低、采油速度低、采出程度低等开发矛盾依然突出。基于以上问题,围绕整装油藏经济有效开发、断块油藏高效均衡开发、低渗透油藏有效动用开展了技术攻关,形成了特高含水油藏矢量开发技术与特高含水后期流场调整开发技术<sup>[5]</sup>、复杂断块油藏水动力调控<sup>[6]</sup>、低渗透油藏压驱注水开发技术<sup>[7]</sup>等高含水油藏提高采收率技术系列,开辟了水驱油藏经济有效开发的新途径。新技术成果在胜利油田推广应用,增储稳产效果显著,为保障国家能源安全、促进石油工业持续稳定

发展做出了积极贡献。

## 1 胜利油田水驱开发现状

### 1.1 整装油藏

整装油藏是胜利油田主要油藏类型之一,包括胜坨、孤岛、埕东和孤东油田。自1964年起,4大整装油田相继投入开发,历经产能建设、细分加密高速上产、精细挖潜持续稳产、持续开发控制递减和流场调控效益开发5个开发阶段。截至2023年底,整装油藏已动用石油地质储量为 $11.5 \times 10^8$  t,占胜利油田的22.0%;累积产油量为 $5.07 \times 10^8$  t,占胜利油田的38.6%,其中2023年产油量为 $400 \times 10^4$  t。由此可知,整装油藏在胜利油田占有重要地位。

经过60多年的注水开发,目前整装油藏整体进入特高含水后期开发阶段,截至2023年底,其综合含水率为96.4%,标定采收率为43.7%,采出程度为41.5%,呈现“综合含水率高(96.4%)、水油比高(26.8)、采油速度低(0.35%)”的特征,产油量相对稳定,年均递减率约为2.8%。矿场实践和动态监测资料均表明,特高含水后期整装油藏注水开发驱替不均衡。吸水剖面资料显示,纵向上20%的小层出现强吸水层;立体示踪剂分析结果表明,平面上注入水沿着优势通道突进,驱替不均衡。亟需明晰特高含水后期剩余油分布特征,创新开发理论认识,形成针对性的开发技术,支撑整装油藏高质量开发,大幅度提高采收率。

### 1.2 断块油藏

断块油藏是胜利油田重要的油藏类型,截至

2023年底,累积动用石油地质储量为 $16.3 \times 10^8$  t,占胜利油田的31.2%,2023年产油量为 $616 \times 10^4$  t。经过60多年多轮次开发调整,目前已整体处于特高含水开发阶段,综合含水率为93.2%,采出程度为28.2%。断块油藏具有断层多、断块小、小层多和倾角大的特点,特高含水期剩余油呈现散、碎和小的难动用特征。不同类型断块油藏开发状况差异显著<sup>[8-10]</sup>,其中边底水断块油藏已经处于特高含水后期(综合含水率为96.1%),呈现高含水、高能量(压力保持水平为0.85)、高液量(单井日产液量为71.4 t/d)、高采出程度(采出程度为37.9%)的特征;复杂断块油藏处于特高含水期(综合含水率为93.3%),能量(压力保持水平为0.75)、液量(单井日产液量为31.3 t/d)和采出程度(采出程度为28.5%)均处于中等水平;极复杂断块油藏开始进入特高含水期(综合含水率为90.7%),呈现低能量(压力保持水平为0.68)、低液量(单井日产液量为22.5 t/d)和低采出程度(采出程度为22.1%)的特征。亟需聚焦不同类型断块油藏开发特征,分析剩余油分布规律,形成主导开发技术,实现差异化大幅度提高采收率。

### 1.3 低渗透油藏

低渗透油藏主要分布在渤南、纯化和牛庄等油田,截至2023年底,已动用石油地质储量为 $9.4 \times 10^8$  t,占胜利油田的18.0%;累积产油量为 $1.18 \times 10^8$  t,占胜利油田的9.0%;2023年产油量为 $384 \times 10^4$  t。目前低渗透油藏平均单井日产液量为7.7 t/d,平均单井日产油量为2.2 t/d,采出程度为11.8%,采油速度为0.39%,标定采收率为15.7%,综合含水率为71.9%,处于中高含水期,是胜利油田重要的上产阵地之一。

低渗透油藏压裂投产后初期产能高,后期受油藏压力降低和储层孔隙细小影响,流体渗流能力下降,产能下降,递减明显。注水开发初期,由于剩余油饱和度高,水驱效果较好。随着水驱持续进行,受储层非均质性和人工裂缝影响,注入水沿裂缝和优势相带突进,水驱前缘扩散速度不均,导致油藏水淹水窜与注采两难并存<sup>[11-13]</sup>。亟需明晰低渗透油藏低效机制,攻关创新开发技术,实现提速提效开发,大幅度提高采收率。

## 2 剩余油分布特征

### 2.1 整装油藏

特高含水后期23口密闭取心井的分析结果表明:剩余油饱和度主要为30%~50%,平均为

38.9%,可以看出特高含水后期仍具备进一步提高采收率的潜力和物质基础。通过研究发现,极端耗水主要表现为平面极端耗水带、层间极端耗水层和层内极端耗水段3种模式。受极端耗水层带发育特征影响,剩余油分布规律更加复杂<sup>[14]</sup>。

**平面分布特征** 受平面非均质性与井网形式控制,极端耗水带主要位于优势相带沿着注采主流线方向,剩余油在平面上呈现差异富集特征,非主流线、油井排等弱驱部位剩余油相对富集。

**层间分布特征** 多层油藏相对高渗透层易形成极端耗水层,受层间非均质性影响,层间动用程度存在差异,主力层水洗程度高,剩余油饱和度小于35%;非主力层动用程度低,剩余油饱和度较高,一般大于40%(图1)。

**层内分布特征** 正韵律厚油层底部、复合正韵律油层相对高渗透段易形成极端耗水段(图2),导致层内驱替不均衡,底部水洗程度高,剩余油饱和度低,部分剩余油饱和度小于20%;顶部剩余油相对富集,剩余油饱和度一般大于40%。

### 2.2 断块油藏

综合运用密闭取心、动态监测和数值模拟等方法,深化剩余油分布特征研究,明晰了断块油藏断层、倾角、井网和层间非均质性等剩余油主控因素的控制机制,形成了剩余油平面、层间和层内富集规律认识。

**平面分布特征** 特高含水期平面剩余油分布差异大,主要表现为断层控制的高部位断层和断层夹角等断边带区域未驱替剩余油富集程度高,剩余油饱和度一般大于50%;腰部井网控制的弱驱替剩余油饱和度较高,一般为40%左右;而低部位强水淹带剩余油饱和度较低,约为30%左右。

**层间分布特征** 断块油藏纵向小层多、非均质性强,特高含水期层间物性差异控制剩余油分布。厚度大、分布连片的主力层动用程度高,剩余油饱和度低(小于40%);薄差层动用程度低,剩余油饱和度高(大于50%),如盘2-检1井水淹剖面分布(图3)。通常在断裂系统复杂区精细油藏描述后,由于复杂断裂系统重新组合、储层展布改变等地质认识更新,会发现未动用小碎层块,该类层块内部剩余油处于原始未动用状态。

**层内分布特征** 特高含水期层内剩余油分布受韵律性控制,正韵律厚层底部水洗程度高,顶部剩余油富集。油井附近由于采液形成势差会发育水锥体,水锥体内部水淹严重,而外部水淹相对较轻。

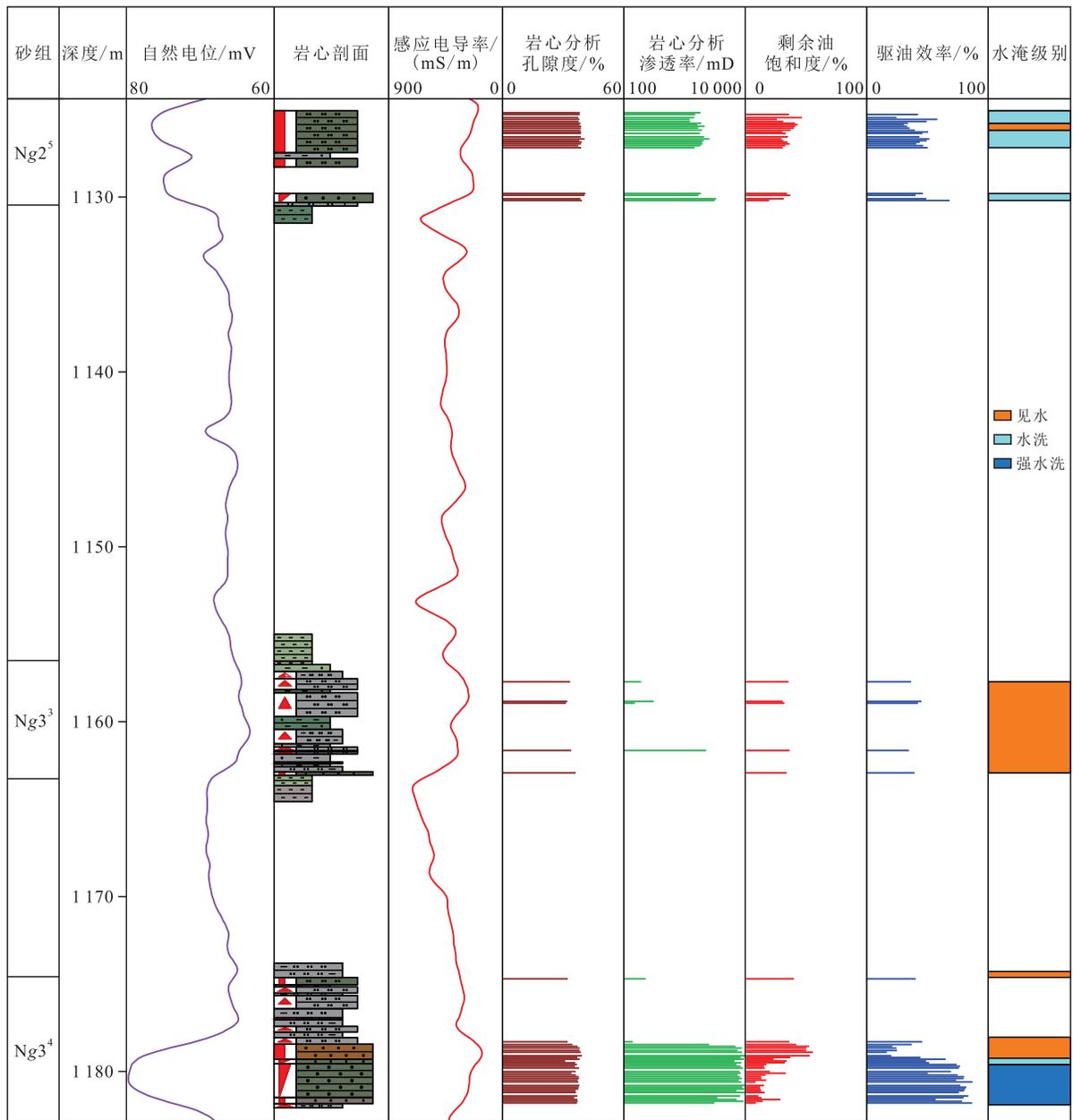


图1 埕东油田埕11-检9井岩心综合柱状图

Fig.1 Comprehensive histogram of cores from Well Cheng11-J9 in Chengdong Oilfield

### 2.3 低渗透油藏

胜利油田低渗透油藏采出程度仅为12.5%，处于低采出程度开发阶段，剩余油整体富集。受储层非均质性影响，剩余油分布特征在平面、层间和层内存在明显差异<sup>[15]</sup>。

**平面分布特征** 平面非均质性对剩余油分布的影响主要体现在影响注水井的吸水能力和水驱波及体积。一般低渗透油藏砂体中心区域物性好，呈现水淹特征，采出程度高，剩余油饱和度较低，一般约为30%；砂体边部物性差，一般呈现“注不进、采不出”开发特征，剩余油富集，剩余油饱和度一般大于50%。特低渗透-致密油藏，物性整体差，整体采

出程度低于10%，呈现“注不进、采不出”开发特征，剩余油整体富集，剩余油饱和度一般大于50%。

**层间分布特征** 低渗透油藏主要采用一套层系开发，受层间非均质性影响，层间动用程度差异大。物性好、厚度大、分布范围广的主力层，产液能力和吸水能力强，动用程度高，剩余油饱和度低，一般小于40%。物性差、厚度薄、零星分布的非主力层动用程度低，剩余油剪和度商，一般大于50%。

**层内分布特征** 因层内高渗透条带发育，水驱不平衡，剩余油分布差异大，剩余油饱和度一般为20%~60%。其中高渗透条带水洗程度高，剩余油饱和度偏低，一般为30%左右。

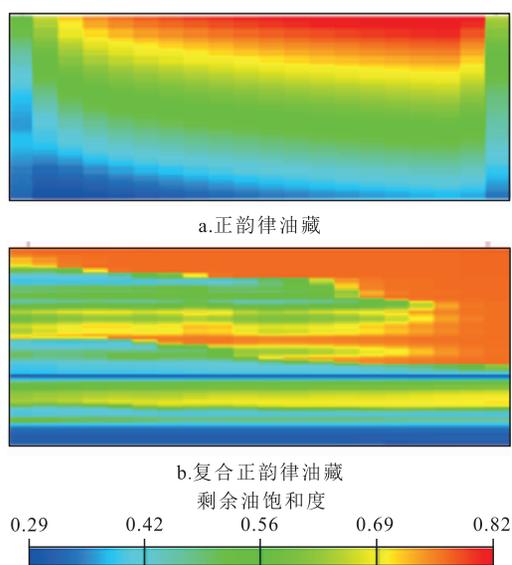


图2 正韵律和复合正韵律油藏剩余油分布

Fig.2 Remaining oil distribution in positive and composite positive rhythm reservoirs

### 3 水驱开发理论进展

#### 3.1 整装油藏

20世纪90年代,整装油藏进入特高含水开发阶段,认为剩余油“水淹严重、高度分散”。通过攻关

形成了以“分割控油”为核心的陆相水驱剩余油富集理论,认识到剩余油“总体分散、局部集中”,指导了高效井挖潜。“十一五”中期,密闭取心分析结果表明,平均剩余油饱和度为41.5%,通过室内实验认识到驱油效率能够达到70%以上,提出了“普遍分布、局部富集”的剩余油分布新认识,指导矿场井网完善性开发。“十三五”以来,整装油藏进入特高含水后期,出现极端耗水现象,矿场水驱特征曲线发现突变点,通过物理模拟与数值模拟相结合、宏观与微观相结合开展研究,形成了极端耗水层带形成机制与调控机理认识,剩余油由“普遍分布、局部富集”向“界面控油、弱驱富集”认识转变,指导了特高含水后期流场调整与均衡驱替,从而实现效益开发。

#### 3.1.1 高倍水驱相渗曲线非线性特征

研究发现,高注水量(1 000 PV)条件下,油水相对渗透率与含水饱和度关系曲线在半对数坐标下由线性变为非线性,存在突变点(图4),突变后水相渗流能力急剧增加、曲线上翘,油相渗流能力急剧减小、曲线下弯<sup>[16]</sup>。水相呈连续流动,油相高度分散为非连续流动,水相渗流阻力急剧减小,含水饱和度的微小变化造成水相渗流能力剧增,水油比快

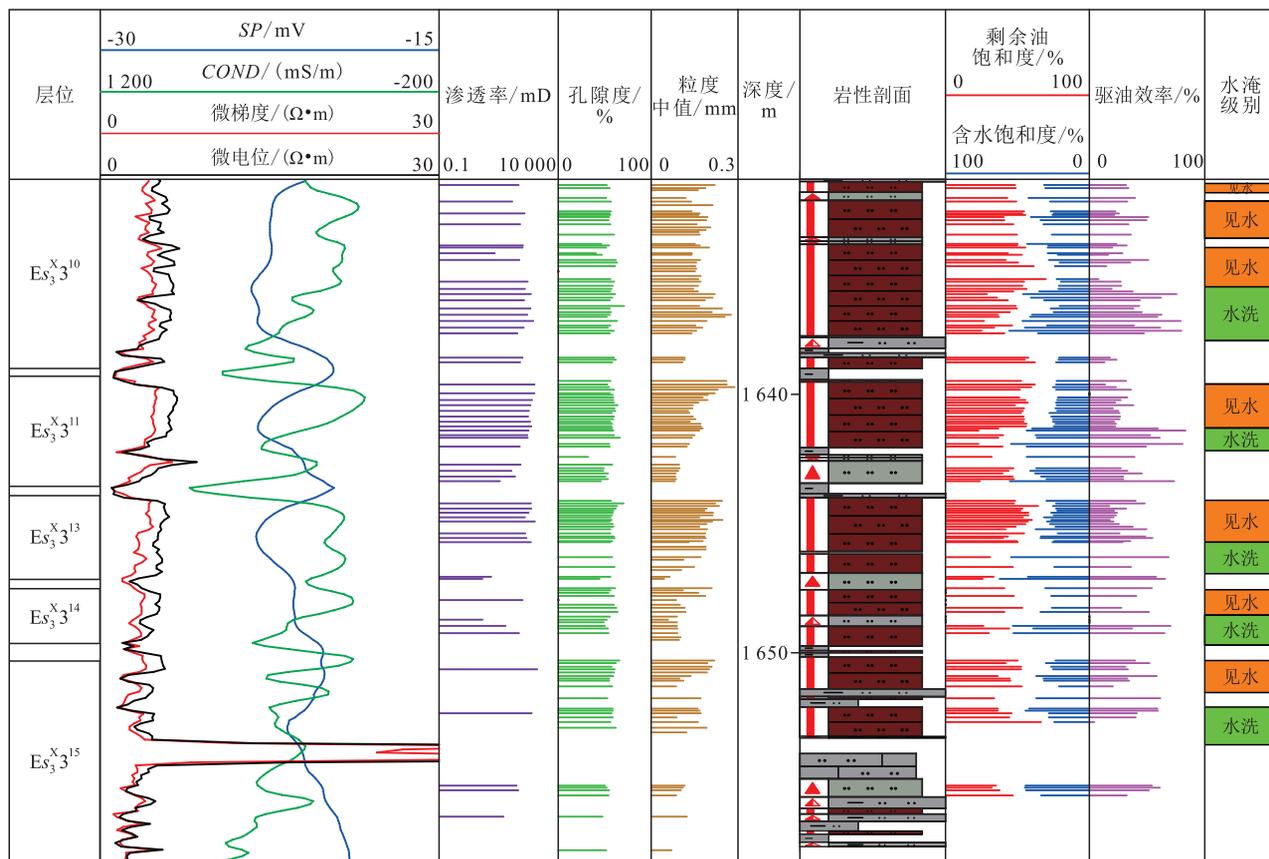


图3 盘2-检1井水淹剖面分布  
Fig.3 Saturation profile of Well P2-J1

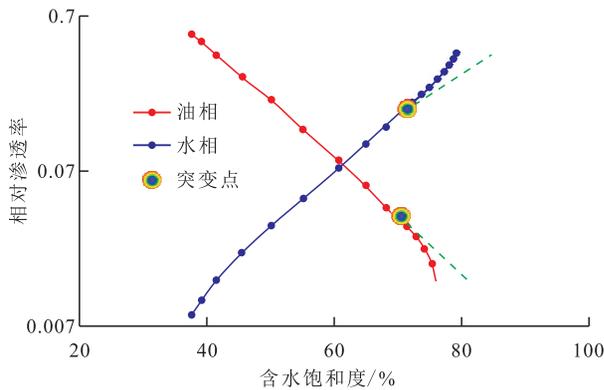


图4 注水量为1 000 PV时油水相对渗透率曲线  
Fig.4 Oil-water relative permeability curves with water injection volume of 1 000 PV

速上升,出现极端耗水现象。

### 3.1.2 极端耗水层带形成机制

水驱油微观物理模拟实验结果表明,水驱油过程是油相不断分散的过程,剩余油以不同的流动形态产出。随着水驱油过程的进行,含水饱和度逐渐增加,分散状剩余油比例增大,水相能量转换为油相能量的效率逐渐下降,当分散状剩余油比例达到30%左右时,水相能量转换效率曲线呈现非线性下降<sup>[17]</sup>,相应的油水相对渗透率比值呈非线性变化,从而出现突变点。由于储层非均质性和注采不均衡,在油藏局部高渗透区域相渗规律首先发生突变,演变发育为极端耗水层带,造成注入水低效无效循环。

### 3.1.3 极端耗水层带调控机理

发育极端耗水层带后,油藏极端耗水层带区域驱替压力梯度高,剩余油饱和度低,而非极端耗水层带区域驱替压力梯度低,剩余油饱和度高,导致油藏驱替压力梯度场与剩余油饱和度场分布不匹配<sup>[18]</sup>,开发效果变差。室内研究及矿场实践表明,通过层系井网调整,重构流场,使得驱替压力梯度场与剩余油饱和度场相匹配,提高波及体积,进一步提高采收率。

## 3.2 断块油藏

针对特高含水期断块油藏剩余油富集规模小、难以效益动用的问题,研究形成了“强边水均阻、脉冲波引流、大压差扩容”的水动力调控机制,指导了开发技术创新,为断块油藏大幅度提高采收率奠定了认识基础。

### 3.2.1 强边水均阻机制

物理模拟及数值模拟研究结果表明,边底水断块油藏采取在边外水体中注水可实现均阻驱替。由于水体中渗流阻力小,往油井方向渗流阻力大(图5),注入水优先在水体中均匀扩散形成高压水

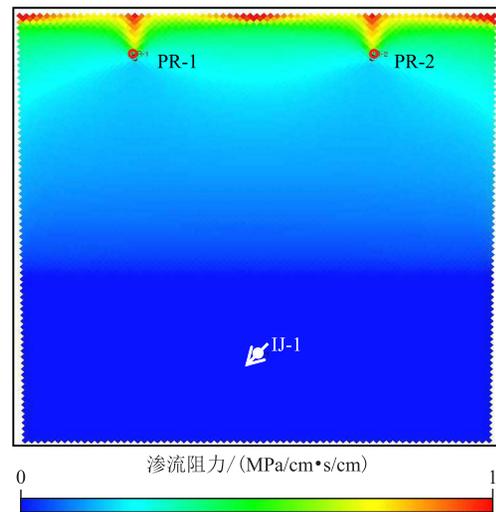


图5 边外注水渗流阻力分布  
Fig.5 Distribution of flow resistance for peripheral water injection

体后,水线再均匀向油井方向推进,波及程度较高。

### 3.2.2 脉冲波引流机制

物理模拟结果表明,通过注采交替会在油藏中形成交替变化压力场,压力场由原连续点对点释放改变为先油藏整体升压蓄能、后油藏能量体对源点释放的模式,改变了原有连续注采方式下注入水沿局部高耗水区域水窜的问题,通过只注不采在油藏整体蓄能形成高压能量体后,以及只采不注阶段断边带区域会与油井间形成新流线,进一步扩大水驱波及。

### 3.2.3 大压差扩容机制

特高含水期微观剩余油分散性增强,中、小孔喉剩余油分布比例增加。物理模拟结果表明,提高驱替压力梯度,可以提高小孔喉中微观剩余油动用程度,扩大微观波及。剩余油测试结果表明,驱替压力梯度越大,动用孔喉半径越小。当驱替压力梯度分别为0.2、0.4和0.6 MPa/m时,孔喉半径动用下限分别为25、10和5  $\mu\text{m}$ (图6)。

## 3.3 低渗透油藏

低渗透油藏储层物性差,喉道细小,“十二五”期间通过室内实验认识到“喉道控流、边界层增阻、压敏降渗”的非线性渗流机理是低渗透油藏“注不进、驱不动、采不出”的根本原因。近年来胜利油田创新提出压驱开发技术,大幅度改善了低渗透油藏的开发效果,揭示了压驱“增注、建驱、扩波及”的3大机理认识。

### 3.3.1 非线性渗流机理

非线性渗流机理主要包括3种机制:①喉道控流机制。低渗透油藏液测渗透率与气测渗透率存

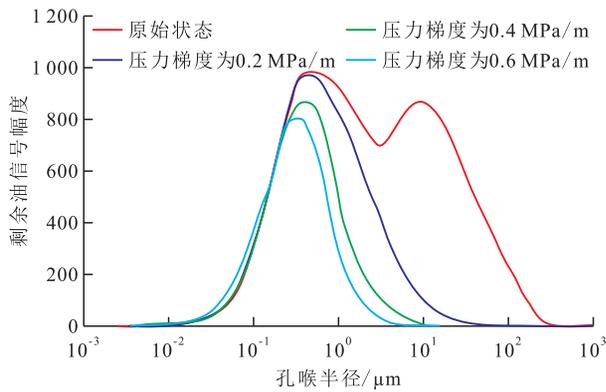


图6 孔喉半径与剩余油信号幅度的关系  
Fig.6 Relationship between pore throat radius and remaining oil sign amplitude

在较大差异,分析纯17-斜检1与樊142-301井气测渗透率近似的2块岩心,两者孔喉半径均值仅相差0.273 μm,而液测渗透率却相差7.9倍。对胜利油田渗透率小于5 mD的致密砂岩岩心进行了孔喉结构分析。不同渗透率岩心的孔喉半径,无论从分布宽度还是从孔喉的分布频率,其差异均较小;相比而言,喉道的分布则有明显的区别,喉道分布范围越宽渗透率越高,喉道半径是影响流体渗流能力的主控因素(图7)。

②边界层增阻机制。流体在固体壁面流动,根据流动速度差异可划分为边界流体和体相流体,吸附在固体表面的边界流体,不参与流动;体相流体即在驱替压力的作用力下,参与流动的流体。总的来说,边界流体的存在是由流固耦合相互作用力造成的。边界层减小喉道有效半径,可以增加渗流阻力。

③压敏降渗机制。低渗透储层喉道呈片状和反拱状,抗压能力弱,容易变形和缩小。根据压汞测试结果,净上覆压力增大时,储层平均孔喉半径减小,渗透率也降低。

### 3.3.2 压驱开发机理

压驱开发机理主要包括3种机制:①增注机制。与压裂产生的毫米级裂缝不同,压驱产生微米级微裂缝。钻取圆柱岩心样品并进行CT/SEM扫描,结果显示,裂缝宽度为10~200 μm时,呈现微米级复杂裂缝网,实现大幅增注(图8)。

②建驱机制。低渗透油藏保持较高的压力水平,可降低压敏造成的渗透率损失;越早恢复压力,渗透率保留率越高。因此,实施先压驱早补能,可以降低压敏效应,保持基质渗流能力。

③扩波及机制。数值模拟结果表明,压驱裂缝区压降大幅降低,压头前移,使得基质区域的压力梯度提高3~10倍,驱油效率提高10%,克服低速非达西效应后水相渗流能力增加9倍,油井产能得到大幅增加,提高采收率10%以上。

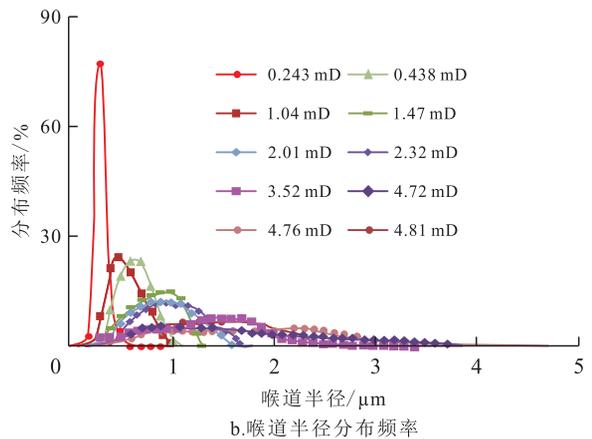
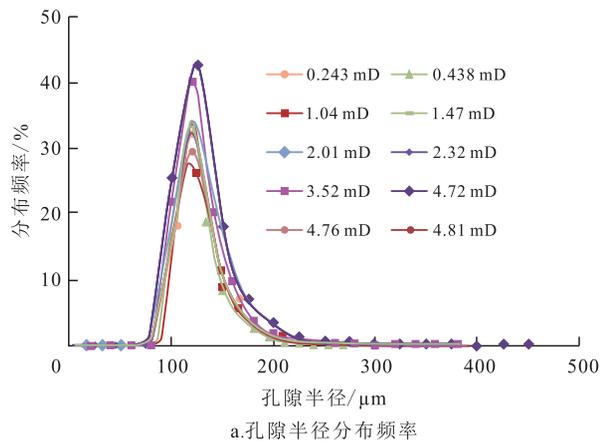


图7 不同渗透率砂岩岩心孔隙、喉道半径分布  
Fig.7 Pore and throat radius distribution of sandstone cores with different permeabilities

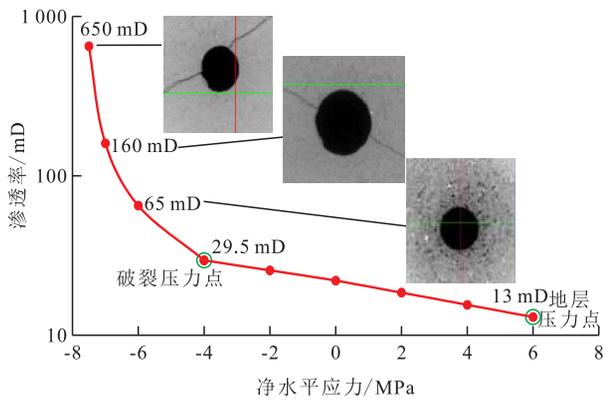


图8 压驱过程的渗透率测试实验结果  
Fig.8 Experimental results of permeability testing during pressure flooding

## 4 水驱开发技术进展

整装、断块和低渗透油藏储层地质条件不同,且处于不同的开发阶段,开发特征及剩余油分布特征差异明显,因此不同类型油藏开发机理及其指导下的开发技术方向也不相同。在开发理论创新基础上,不断转变观念,整装油藏创新形成了层系近

阻重组开发技术、特高含水油藏矢量开发技术和特高含水后期流场调整开发技术,断块油藏攻关形成了边底水断块油藏人工边水驱开发技术、复杂断块油藏立体开发技术和极复杂断块油藏注采耦合开发技术,低渗透油藏创新形成了仿水平井注水开发技术、井网适配提高采收率技术和压驱注水开发技术等。

#### 4.1 整装油藏水驱主导开发技术

##### 4.1.1 层系近阻重组开发技术

考虑特高含水后期动态非均质性,基于极端耗水层带理论新认识,定量识别极端耗水层带,针对层间差异增大和干扰严重的矛盾,引入拟渗流阻力作为动态差异表征参数,创建了“近阻组合”的特高含水油藏层系重组优化方法。研究结果表明(图9),在特高含水后期层系重组时,拟渗流阻力级差控制在4~5较合理。在胜坨油田坨七沙二3-7单元开展近阻重组调整,实施后效果明显,单元日产量由25.4 t/d增至65.7 t/d,是实施前的2.6倍,含水率下降7.0%,吨油耗水率下降52%,自然递减率下降4.4%,提高采收率1.6%。

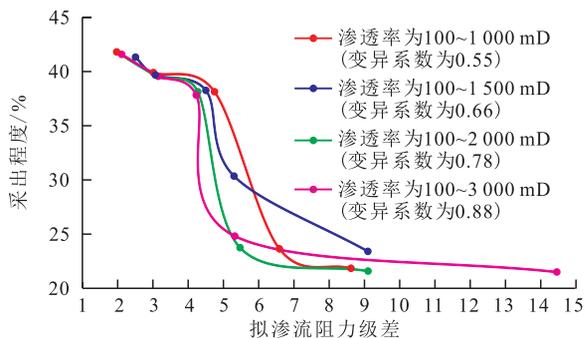


图9 不同渗透率下拟渗流阻力级差与采出程度的关系  
Fig.9 Relationship between pseudo-flow resistance level difference and recovery with different permeabilities

##### 4.1.2 特高含水油藏矢量开发技术

针对平面驱替不均衡的问题,以剩余油饱和度方差最小化为均衡驱替标准,创建了特高含水油藏矢量注采井网优化方法,抑制纵向和平面极端耗水层带,实现油藏整体均衡驱替<sup>[19-22]</sup>。针对不同类型油藏地质及开发特点,形成了不同的矢量调整模式。在胜坨油田二区沙二段9-10单元开展近阻重组矢量开发调整,实施后效果明显,单元日产量由调整前的36.0 t/d增至50.6 t/d,综合含水率由调整前的96.3%降至94.9%,自然递减率下降4.8%,提高采收率4.3%。

##### 4.1.3 特高含水后期流场调整开发技术

特高含水后期流场调整开发技术是针对规则

井网注采流线固定、极端耗水层带发育的问题,以特高含水后期极端耗水层带理论为指导,优化“潜力最大化、耗水最小化”双目标,建立了压力梯度场与剩余油饱和度场“双场匹配”的油藏流场调整优化方法,指导矿场极端耗水层带有效调控,延长老油田经济寿命期。基于现有井网,充分利用老井,改变驱替压力梯度的方向及大小,匹配压力梯度场与剩余油饱和度场,转变液流方向,创建了井网变流线流场调整技术模式、层内堵调侧钻流场调整技术模式、多层立体流场调整技术模式3种流场调整模式<sup>[20]</sup>。孤岛油田西区北馆3-4单元开展层系互换流场调整,实施后效果明显:日产液量由6 289 t/d降至5 650 t/d,下降639 t/d;日产油量由122 t/d增至176 t/d,增加54 t/d;耗水率由51.6 m<sup>3</sup>/t降至31.3 m<sup>3</sup>/t,提高采收率2.1%。

#### 4.2 断块油藏水驱主导开发技术

针对断块油藏特高含水期动态非均质性加剧、小规模剩余油难以高效动用的问题,根据不同类型断块油藏特点及开发特征,基于高效水动力调控机制认识,形成了边底水断块油藏人工边水驱开发、复杂断块油藏立体开发、极复杂断块油藏注采耦合开发等水动力调控开发技术系列<sup>[24-29]</sup>,并在东辛、现河和临盘等胜利主力断块油田规模化推广应用。

##### 4.2.1 边底水断块油藏人工边水驱开发技术

针对边底水断块油藏边内注水造成原油外溢、构造腰部分散、特高含水期高含水关停井多和近弃置状态的特点,基于“强边水均阻、大压差扩容”机制认识,提出“人造强水体、重建渗流场”的水动力调控方向,创建了“变腰部注水为边外注水、变控制注水为强化注水、变连续注水为耦合注水”的人工边水驱开发技术方法,明确了包括水体能量、油层厚度和地层倾角等因素的人工边水驱开发技术适应的油藏条件,建立了涵盖注采井网和压力保持水平等参数的人工边水驱开发技术政策。东辛油田辛1沙一段4单元应用人工边水驱开发技术,在未钻新井条件下,日产油量由应用前的0.4 t/d最高增至54.6 t/d,综合含水率由应用前的97.7%最低降至60.1%,累积增油量为8.1×10<sup>4</sup>t,采收率为47.5%,采收率增值为7.5%,盈亏平衡油价为31美元/bbl,实现了近废弃油藏的效益开发。

##### 4.2.2 复杂断块油藏立体开发技术

针对复杂断块油藏特高含水期剩余油富集规模小、效益动用难的特点,提出立体组合小规模剩余油串接开发的技术方向,攻关形成了复杂断裂系

统精细描述技术,提出了“多点优选、窄靶优先、三维优化”的多靶点设计方法,建立了“多靶点定向井组合多个小断块、跨断块水平井组合相邻断块、绕锥水平井组合水锥两侧、近断层水平井开发窄条带”等4种组合开发模式。永安油田永3-1断块应用立体开发技术,设计部署多靶点定向井、跨断块水平井、绕锥水平井和近断层水平井各1口(图10),油水井措施6井次。调整后,日产油量由3.7 t/d最高增至88.3 t/d,综合含水率由84.3%最低降至29.2%,采收率由30.3%提高至38.5%,盈亏平衡油价为35美元/bbl,实现了剩余油局部小规模富集的复杂断块油藏高效开发。

#### 4.2.3 极复杂断块油藏注采耦合开发技术

针对极复杂断块油藏断裂系统复杂、面积小、

注采井距小、一注水就淹、不注水没能量、波及面积小及合理补充能量困难等问题,基于脉冲波引流机制认识,提出了“注采不见面”的水动力调控技术方向,通过交替注采、工作周期、层系间的耦合,配套分层注采工艺技术,合理补充能量,提高水驱波及程度,实现小断块经济有效开发。制定了包括断层封堵性、储层物性等因素的技术适应油藏筛选标准,创建了“动态、井网、层系”等不同类型的油藏注采耦合模式,并建立了包括注采强度和耦合周期等参数的政策界限。东辛油田辛11斜更80断块(图11)应用了注采耦合开发技术,一注一采井网条件下,日产油量从应用前的0.2 t/d最高增至8.3 t/d,实施7个注采耦合周期,累积增油量为7 270 t,预计提高采收率12.2%。

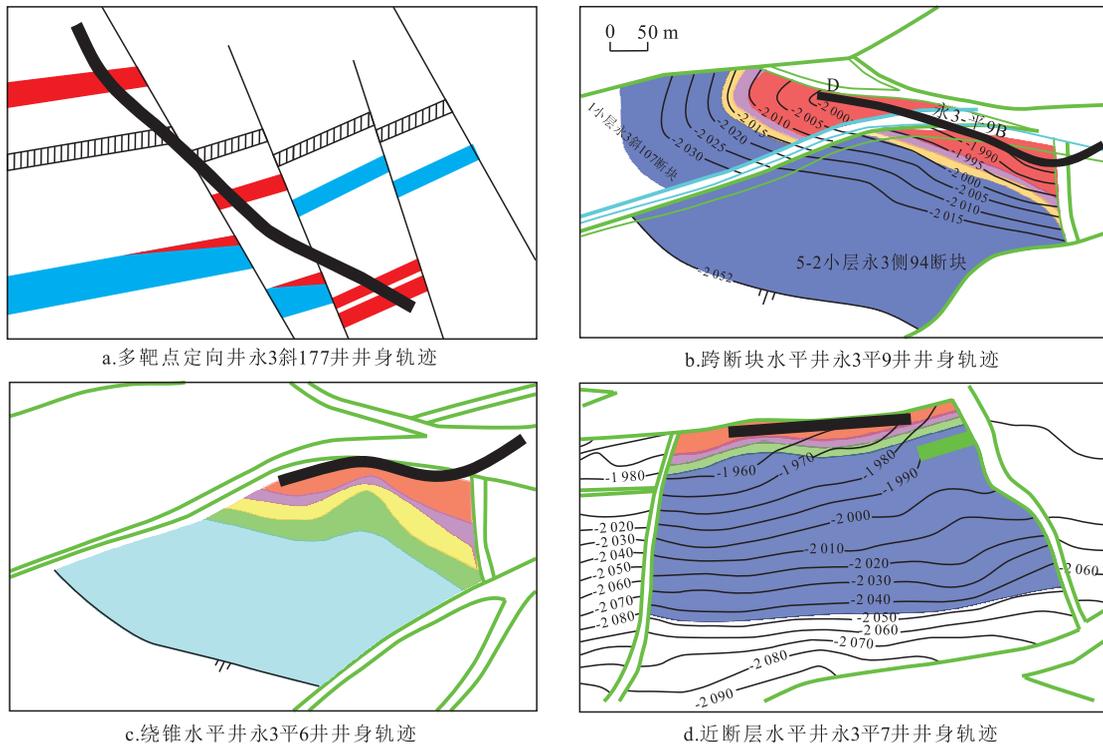


图10 复杂断块油藏立体组合开发模式

Fig.10 Stereoscopic combined development model for complex fault block reservoirs

### 4.3 低渗透油藏水驱主导开发技术

针对不同类型低渗透油藏开发特点和面临的矛盾,基于开发理论认识不断突破,开发技术不断创新<sup>[30-32]</sup>。“十二五”创新形成仿水平井注水开发技术,“十三五”创新形成井网适配提高采收率技术,“十四五”创新形成压裂注水开发技术,开发效果持续向好。

#### 4.3.1 仿水平井注水开发技术

“十二五”期间,针对特低渗透油藏物性差、经济井距开发建驱难的问题,创新形成了仿水平井注

水开发技术。其技术思路为:在经济上,油水井通过压裂造长缝拉大注采井距,增加单井控制储量;技术上,缩小排距建立驱替以提高采收率,实现低渗透油藏的效益开发。

仿水平井注水开发技术内涵是通过造压裂长缝,变“注采井距建驱替”为“注采排距建驱替”,进而可以通过长缝拉大井距;压裂裂缝与井网适配,由“点对点径向驱”变为“面对面线性驱”,扩大波及体积(图12)。根据地质特点和技术难点,创新形成了特低渗透储层及地应力预测技术、缝网适配优化技术。

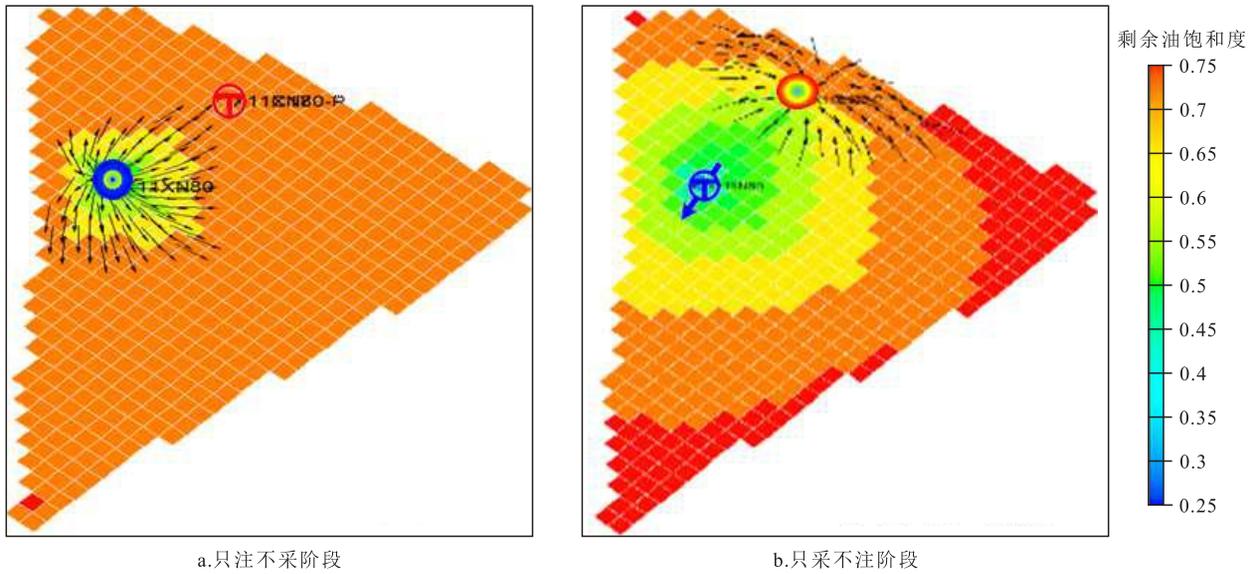


图 11 辛 11 斜更 80 断块注采耦合剩余油饱和度及流线  
 Fig.11 Oil saturation and flow line by injection-production coupling in Xin11XG80 fault block

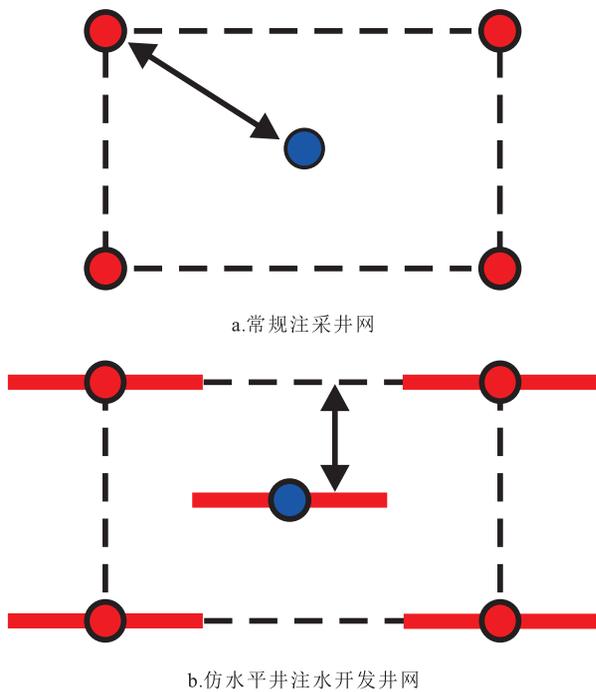


图 12 常规注采井网与仿水平井注水开发井网对比  
 Fig.12 Comparison of conventional well pattern and simulated horizontal well pattern

4.3.2 井网适配提高采收率技术

“十三五”期间,针对一般低渗透油藏层间动用差异大和局部驱替不均衡的问题,创新形成井网适配提高采收率技术。其技术思路是通过径向水力射流等工艺技术有效缩短井距,实现不同层系间井距可控,物性差的层匹配较小的井距,物性好的层匹配大的井距,实现纵向各层水驱均衡推进,扩大波及体积,进一步提高采收率(图 13)。

井网适配提高采收率技术内涵是通过层系优化与工艺适配,缩井距改渗流,建低渗透层有效驱

替;储层改造与非均质性适配,调梯度均渗流,抑突进降低高渗透层含水率;井网优化与工艺适配,变流线挖掘剩余油,扩大波及体积。根据地质特点和技术难点,形成了渗流能力表征技术、非线性模拟技术和井网适配优化技术 3 大技术系列。

4.3.3 压驱注水开发技术

“十四五”期间,针对低渗透-致密油藏“注不进、采不出”的主要开发矛盾,创建压驱注水开发技术。压驱注水开发技术突破了不能超地层破裂压力注入的传统认识,用水力压裂设备或专用压驱泵以高于或接近地层破裂压力大排量注水,单井日注入量可达 1 000 m<sup>3</sup>/d 以上,快速补充地层能量,大幅度提高油井产能及采收率。

其技术内涵是以高于或接近地层破裂压力进行大排量注水,在压驱井近井产生微裂缝带,微裂缝带渗透率增大百倍以上,从而达到增渗增注快速补能的目的;通过大幅提升地层压力,构建全域高压能量场,实现高压压驱扩大波及体积,提高采收率。

针对压驱物理模拟和数值模拟技术空白的特点,建立了压驱注水全过程一体化物理实验技术,形成了压驱流固耦合数值模拟方法,针对多层特低渗透老区,创建了“立体压驱”技术模式,实现层间协同建驱,大幅提升水驱动用程度;针对平面强非均质一般低渗透老区,创建了“差异压驱”技术模式,实现了平面均衡驱替,扩大水驱波及体积。研发了“分层压驱管柱”“抑水防窜堵调体系”“压驱前缘监测技术”“地面工程标准体系”4 项工艺技术。

牛庄油田牛 35 块通过实施差异压驱,快速恢复

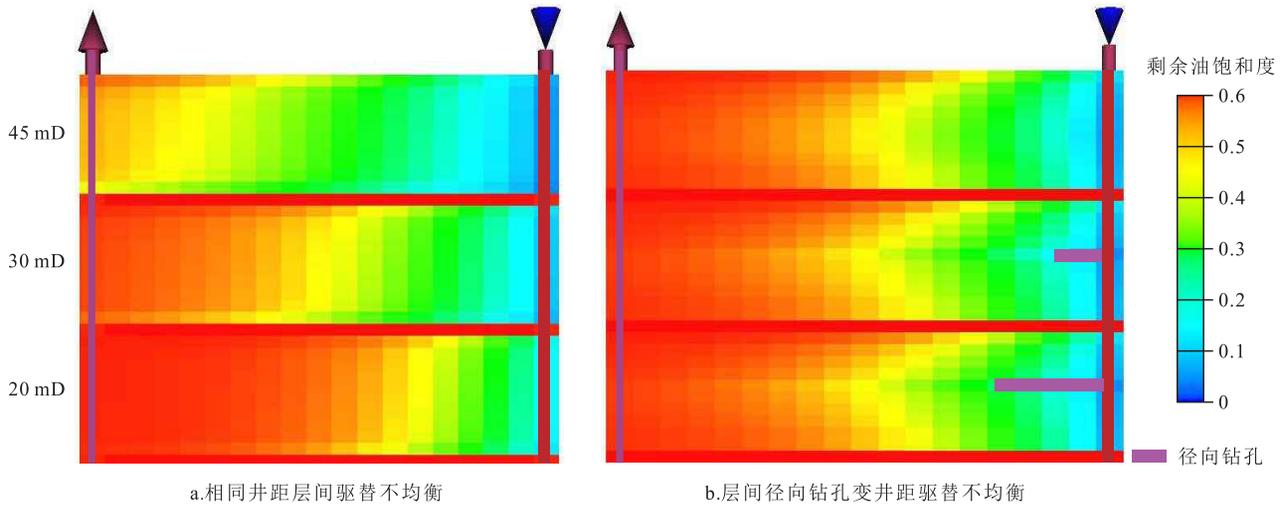


图13 直井、径向水力射流井层间剩余油饱和度分布  
 Fig.13 Distribution of interlayer remaining oil saturation in vertical and radial hydraulic jet wells

了地层能量,地层压力保持水平从0.51恢复至0.82,压驱井组日产油量从48.1 t/d最高增至87.9 t/d(图14),压驱单井见效率为94.1%,已累积增油量为 $1.96 \times 10^4$  t,提高采收率5.1%,取得了理想效果。

## 5 面临挑战及技术发展方向

### 5.1 整装油藏

整装油藏进入特高含水后期深度开发阶段,剩余油更加分散、动态非均质性更强、流场更加复杂,面临现有储层描述难以满足极致开发需求、剩余油认识不能适应大幅度提高采收率需要、单一层系井网调整难以实现剩余资源极致动用等问题与挑战,下一步需要深化储层精细描述、水驱动态波及与剩余油宏观分布规律、微观剩余油赋存特征及有效动用机制、剩余油再富集及动用机制等特高含水后期水驱开发理论研究,开展储层非均质性及动态连通性表征、基于大数据的储层精细描述及剩余油智能预测等基础研究,集成多专业、多学科,攻关多元协同水驱深度开发技术、变流线立体智能流场重构技术、地质工程一体化的低成本井网重构大幅度提高采收率技术等,实现特高含水老油田效益稳产与大幅度提高采收率,实现平均采收率达到50%。

### 5.2 断块油藏

断块油藏面临特高含水期效益精准动用更小规模的剩余油难度大、常规单一水动力调控开发效果逐渐减弱的挑战,需要持续创新发展高效开发技术。一是水动力调整开发要向精细化、集成化和智能化发展:精细化包括精细油藏地质认识、精准刻画小尺度复杂地质体,精细开发研究单元,建立以

流动单元为目标的层系井网注采调控技术等。集成化主要有集成先进的钻采工艺、低成本钻完井技术,实现更小规模剩余油的经济效益动用;集成精细分层注采及测调一体化工艺,实现层间的极致细

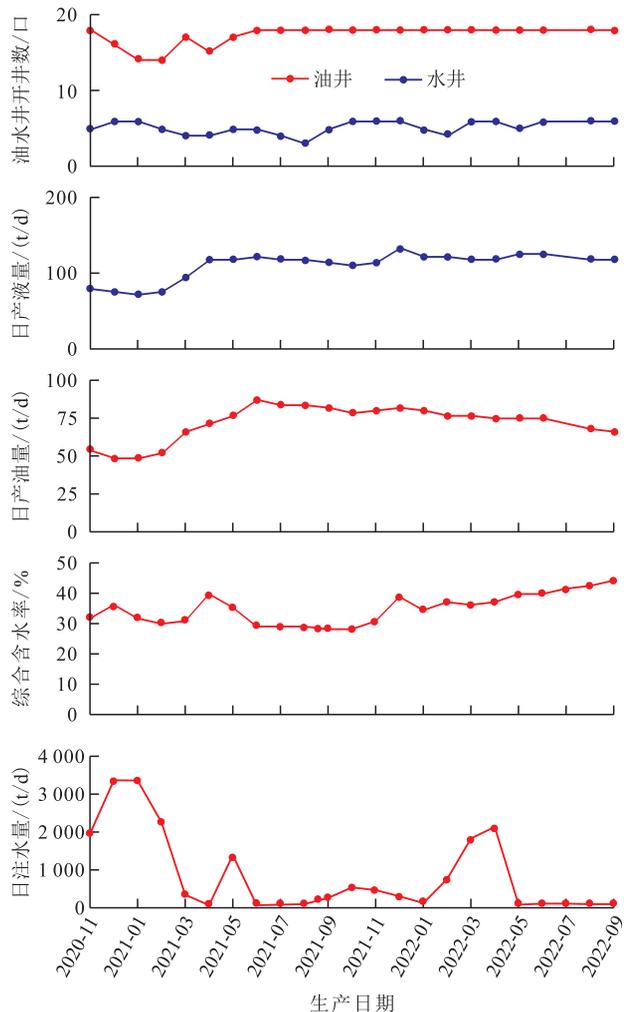


图14 牛庄油田牛35块压驱注水后综合开发曲线  
 Fig.14 Comprehensive development curve of Niu 35 block in Niuzhuang Oilfield after pressure flooding

分动用等。智能化包括攻关智能化断层识别和地层对比等技术方法,研发智能注采调控优化决策系统,实现油藏精准实时优化调控等。二是积极探索“水驱+”多介质复合调控开发技术,发挥水、气、剂、固多介质协同增效作用,包括研发利用气体超覆作用实现油藏高部位及油层顶部剩余油有效驱替的人工气顶双向驱技术,攻关利用泡沫封堵作用调堵水流通道的氮气泡沫辅助水驱开发技术,研发适应断块油藏的新一代驱油封堵开发技术,攻关纳米气泡水驱开发技术等,实现平均采收率突破40%。

### 5.3 低渗透油藏

低渗透油藏未动储量埋藏更深、丰度更低、物性更差,压驱开发构建的驱动体系压力更高。目前的非线性渗流理论难以准确描述高压条件下油水两相渗流规律,储层连通性、非均质性描述技术精度不能满足开发需求。低渗透油藏老区经过多年开发,平面纵向动用差异大,应力场、压力场与原始状态相比发生了较大改变,制约压驱效果。下一步需要深化高压非线性渗流机理研究,加强储层动态连通性表征、四维地应力演化及能场协同致效机制等基础研究,攻关形成特低渗透-致密油藏未开发储量效益动用关键技术、老区新化层系井网重构技术、压驱复合大幅提高采收率技术等,实现低渗透油藏未动储量高效建产,实现平均采收率达到30%。

## 6 结论

(1)整装油藏围绕均衡驱替目标,创新提出了特高含水后期极端耗水层带理论认识,形成了层系近阻重组、特高含水油藏矢量开发、特高含水后期流场调整等开发技术,有效控含水降递减,延长了老油田经济寿命期。下一步整装油藏将向多元协同高效驱替、立体智能流场调整、地质工程一体化低成本井网重构等方向发展,持续支撑特高含水后期油藏效益稳产与大幅提高采收率。

(2)断块油藏聚焦不同类型小规模剩余油动用目标,创新形成了水动力调控机制认识,创建了边底水断块油藏人工边水驱、复杂断块油藏立体开发、极复杂断块油藏注采耦合开发技术,实现了油藏高效动用,支撑了效益稳产。下一步断块油藏将向智能精细水驱、多介质强化水驱方向发展,不断提高油藏采收率。

(3)低渗透油藏围绕有效建驱目标,揭示了非

线性渗流机理,针对不同类型低渗透油藏开发特点和主要矛盾,创新形成了仿水平井注水开发技术、井网适配提高采收率技术和压驱注水开发技术,大幅提高了采收率。下一步低渗透油藏将围绕打造高压驱动体系,深化高压渗流机理研究,加强四维地应力、能场协同致效机制表征,攻关创新开发技术,实现大幅提高采收率。

### 参考文献

- [1] 崔传智,张涛,黄迎松,等.高含水期整装油藏剩余油分布及层井网互换可行性研究[C].西安:油气田勘探与开发国际会议,2019.  
CUI Chuanzhi, ZHANG Tao, HUANG Yingsong, et al. Feasibility study on residual oil distribution and interchange of layer and well pattern in uncompartmentalized oilfields in high water cut stage [C]. Xi'an: International Field Exploration and Development Conference, 2019.
- [2] 卜亚辉.基于适配关系的高含水油藏流场调控优化方法[J].断块油气田,2022,29(5):692-697.  
BU Yahui. Optimization method of flow field control in high water cut reservoir based on matching relationship [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(5): 692-697.
- [3] 李国永.复杂断块油藏精细描述关键技术与应用[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):152-162.  
LI Guoyong. Key technology of fine description of complex fault block reservoir and its application [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 152-162.
- [4] 孙元伟,程远方,张卫防,等.致密储层应力敏感性分析及裂缝参数优化[J].断块油气田,2018,25(4):493-497.  
SUN Yuanwei, CHENG Yuanfang, ZHANG Weifang, et al. Analysis of stress sensitivity and optimization of fracturing parameter for tight reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(4): 493-497.
- [5] 刘海成.孤岛油田层系井网互换油井致效机制及见效模式[J].油气地质与采收率,2021,37(3):109-115.  
LIU Haicheng. Study on response mechanism and mode of oil well after layer and well pattern interchange in Gudao Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 37(3): 109-115.
- [6] 王端平,杨勇,许坚,等.复杂断块油藏立体开发技术[J].油气地质与采收率,2011,18(5):54-57.  
WANG Duanping, YANG Yong, XU Jian, et al. Three-dimensional development techniques in complicated fault-block reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(5): 54-57.
- [7] 杨勇,张世明,曹小朋,等.胜利油田低渗透油藏压驱开发技术实践与认识[J].油气地质与采收率,2023,30(6):61-71.  
YANG Yong, ZHANG Shiming, CAO Xiaopeng, et al. Practice and understanding of pressure drive development technol-

- ogy for low-permeability reservoirs in Shengli Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30 (6) : 61-71.
- [8] 姚秀田,徐磊,王冉冉,等.高含水复杂断块油藏单层系边外注水开发模式[J].*油气地质与采收率*,2024,31(2):155-166.  
YAO Xiutian, XU Lei, WANG Ranran, et al. Single-layer outer edge waterflooding development model of complex fault block reservoirs with high water cut [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2024, 31(2): 155-166.
- [9] 孙晓霞.复杂断块断棱刻画技术[J].*断块油气田*,2013,20(1):59-62.  
SUN Xiaoxia. Research on fault edge depiction in complex fault block [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20 (1) : 59-62.
- [10] 杨勇,王建,王瑞,等.胜利断块油藏分类探讨及提高采收率对策[J].*西安石油大学学报:自然科学版*,2018,33(4):61-65.  
YANG Yong, WANG Jian, WANG Rui, et al. Classification of Fault Block Reservoirs in Shengli Oilfield and Countermeasures for EOR [J]. *Journal of Xi'an Shiyu University: Natural Science Edition*, 2018, 33 (4) : 61-65.
- [11] 钱川川,骆飞飞,蒋志斌,等.注空气提高低渗透油藏采收率实验及低温氧化反应特征[J].*大庆石油地质与开发*,2022,41(1):97-103.  
QIAN Chuanchuan, LUO Feifei, JIANG Zhibin, et al. EOR experiment of air injection and low-temperature oxidation reaction characteristics in low-permeability reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41 (1) : 97-103.
- [12] 王哲,曹广胜,白玉杰,等.低渗透油藏提高采收率技术现状及展望[J].*特种油气藏*,2023,30(1):1-13.  
WANG Zhe, CAO Guangsheng, BAI Yujie, et al. Development status and prospect of EOR technology in low-permeability reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(1) : 1-13.
- [13] 苏海波,张世明,孙业恒,等.基于分形理论的低渗透油藏油水相对渗透率模型[J].*油气地质与采收率*,2020,27(4):67-78.  
SU Haibo, ZHANG Shiming, SUN Yeheng, et al. Oil-water relative permeability model of low permeability reservoir based on fractal theory [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(4) : 67-78.
- [14] 刘丽杰,张先敏,魏祥祥,等.特高含水期剩余油分类评价方法[J].*油气地质与采收率*,2022,29(5):83-90.  
LIU Lijie, ZHANG Xianmin, WEI Xiangxiang, et al. Classification and evaluation method of remaining oil in ultra-high water cut stage [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(5) : 83-90.
- [15] 王光付,廖荣凤,李江龙,等.中国石化低渗透油藏开发状况及前景[J].*油气地质与采收率*,2007,14(3):84-89.  
WANG Guangfu, LIAO Rongfeng, LI Jianglong, et al. The development situation and future of low permeability oil reservoirs of SINOPEC [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(3) : 84-89.
- [16] 黄迎松.特高含水阶段油藏水驱规律研究[J].*特种油气藏*, 2018,25(1):95-99.  
HUANG Yingsong. Waterflooding performance of oil reservoir in ultra-high water-cut stage [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(1) : 95-99.
- [17] 赖书敏.特高含水后期油藏细分注水界限研究-以胜利油田整装油藏为例[J].*岩性油气藏*,2018,30(5):124-130.  
LAI Shumin. Technology policy limitation of subdivision water injection in ultra-high water cut stage: a case from Shengli un-compartmentalized reservoirs [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(5) : 124-130.
- [18] 谷建伟,任燕龙,王依科,等.基于机器学习的平面剩余油分布预测方法[J].*中国石油大学学报:自然科学版*,2020,44(4):39-46.  
GU Jianwei, REN Yanlong, WANG Yike, et al. Prediction methods of remaining oil plane distribution based on machine learning [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2020, 44(4) : 39-46.
- [19] 赵晨云,窦松江,窦煜,等.高含水期油藏剩余油聚集度表征方法[J].*新疆石油地质*,2023,44(6):690-695.  
ZHAO Chenyun, DOU Songjiang, DOU Yu, et al. A new method for characterizing remaining oil in high water-cut reservoirs [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(6) : 690-695.
- [20] 谷建伟,刘志文,于秀玲,等.基于剩余油可动潜力控制程度的井网调整研究[J].*特种油气藏*,2017,24(6):84-89.  
GU Jianwei, LIU Zhiwen, YU Xiuling, et al. Well network adjustment based on the movable potential control-level of remaining oil [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(6) : 84-89.
- [21] 孙焕泉,杨勇,王海涛,等.特高含水油藏剩余油分布特征与提高采收率新技术[J].*中国石油大学学报:自然科学版*,2023,47(5):90-102.  
SUN Huanquan, YANG Yong, WANG Haitao, et al. Distribution characteristics of remaining oil in extra-high water cut reservoirs and new technologies for enhancing oil recovery [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2023, 47(5) : 90-102.
- [22] 何逸凡,陈建波,马铃峥,等.基于动态残余油饱和度表征的特高含水期油田数值模拟[J].*中国海上油气*,2022,34(3):105-111.  
HE Yifan, CHEN Jianbo, MA Quanzheng, et al. Numerical simulation of oilfield in ultra-high water cut stage based on dynamic residual oil saturation [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(3) : 105-111.
- [23] 刘丽杰.胜坨油田特高含水后期矢量开发调整模式及应用[J].*油气地质与采收率*,2016,23(3):111-115.  
LIU Lijie. Vector development adjustment modes and its application in late extra-high water cut stage of Shengtuo Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23 (3) : 111-115.
- [24] 王瑞,袁士宝,王建,等.复杂断块油藏注采耦合技术提高采收率机理[J].*大庆石油地质与开发*,2018,37(6):38-42.  
WANG Rui, YUAN Shibao, WANG Jian, et al. Mechanism of

- the injection-production coupling technique for complex fault-block oil reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2018, 37(6): 38-42.
- [25] 李晓军, 杨维, 黄爱先, 等. 辛11水驱断块层间轮转注采水动力学挖潜措施研究[J]. *非常规油气*, 2021, 8(2): 71-79.
- LI Xiaojun, YANG Wei, HUANG Aixian, et al. Study on hydraulic dynamic potential digging measures of interlayer rotation injection and production in Xin 11 water driving fault block [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021, 8(2): 71-79.
- [26] 王建. 注采耦合技术提高复杂断块油藏水驱采收率——以临盘油田小断块油藏为例[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(3): 89-91.
- WANG Jian. Research on unstable injection-production to improve oil recovery in complicated fault block of Shengli oilfield—case study of fault block oil reservoirs in Linpan oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(3): 89-91.
- [27] 张戈, 王端平, 孙国, 等. 复杂断块油藏人工边水驱影响因素敏感性[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(2): 103-106, 111.
- ZHANG Ge, WANG Duanping, SUN Guo, et al. Sensibility study on influencing factors of artificial edge water flooding in complex fault-block reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(2): 103-106, 111.
- [28] 王建. 胜利断块油藏人工边水驱提高采收率技术研究[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(15): 3 598-3 601.
- WANG Jian. Research on technology of enhance water drive recovery by simulating strong edge-water to develop fault-block oil reservoirs [J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(15): 3 598-3 601.
- [29] 王建. 边水断块油藏层系重组的技术政策界限[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(4): 81-83.
- WANG Jian. Study on technical policy limits of layer recombination in edge water fault block reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(4): 81-83.
- [30] 陶帅, 郝永卯, 周杰, 等. 透镜体低渗透岩性油藏合理井网井距研究[J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(5): 116-123.
- TAO Shuai, HAO Yongmao, ZHOU Jie, et al. Reasonable pattern well spacing deployment of lens lithologic reservoirs with low permeability [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(5): 116-123.
- [31] 张全胜, 李明, 张子麟, 等. 胜利油田致密油储层体积压裂技术及应用[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(2): 233-240.
- ZHANG Quansheng, LI Ming, ZHANG Zilin, et al. Application of volume fracturing technology in tight oil reservoirs of Shengli oilfield [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(2): 233-240.
- [32] 凡玉梅. 基于开发技术的低渗透油藏未动用储量分类评价[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(2): 337-341.
- FAN Yumei. Classification and evaluation of undeveloped reserves in low-permeability reservoirs based on development technologies [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(2): 337-341.

编辑 何青芳