

文章编号:1009-9603(2022)04-0076-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202105021

# “益生菌”提高难采稠油采收率机理与技术实践

束青林<sup>1</sup>, 胡婧<sup>2</sup>, 林军章<sup>2</sup>, 郑昕<sup>1</sup>, 孙刚正<sup>2</sup>, 丁明山<sup>2</sup>, 陈子慧<sup>2</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257000; 2.中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院, 山东 东营 257000)

**摘要:**胜利油区大部分稠油油藏已进入中高含水开发阶段, 急需转变开发方式。微生物采油技术利用微生物菌体及其生长代谢活动在油藏原位作用原油及储层, 针对性解决多轮次热采、低效水驱、深层稠油及敏感稠油等难采稠油油藏开发难题。近5 a在胜利油区针对难采稠油油藏微生物提高采收率技术开展攻关研究, 揭示了微生物乳化嗜烃降黏、生物多糖增黏调驱、生物产气助驱、界面改性减阻及改性矿物防膨等5大微生物采油机理, 并在此基础上建立了稠油油藏微生物群落基因定量解析、原位嗜烃类驱油功能菌高效激活、生物特征预测生产动态变化及生物场动态调控4项关键技术。研究成果在胜利油区15个低效稠油油藏区块开展现场应用, 均取得明显降水增油效果, 已提高采收率3%以上。该技术在难采稠油油藏的成功推广证实微生物采油技术在稠油转换开发方式上的巨大应用潜力, 是老油田转换开发方式、提质增效的革命性技术, 推广前景广阔。

**关键词:**难采稠油; “益生菌”微生物; 提高采收率; 机理与技术; 矿场实践

中图分类号: TE345

文献标识码: A

## Mechanism and technical practice of enhancing oil recovery of hard-to-recover heavy oil reservoirs with probiotics

SHU Qinglin<sup>1</sup>, HU Jing<sup>2</sup>, LIN Junzhang<sup>2</sup>, ZHENG Xin<sup>1</sup>, SUN Gangzheng<sup>2</sup>, DING Mingshan<sup>2</sup>, CHEN Zihui<sup>2</sup>

(1. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 2. Institute of Petroleum Engineering and Technology, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

**Abstract:** As most of the heavy oil reservoirs in Shengli Oilfield enter the development stage of medium and high water cut, it is imperative to change the development mode. Microbial enhanced oil recovery (MEOR) technology can specifically tackle the difficulties in the exploitation of hard-to-recover heavy oil reservoirs, such as multiple rounds of thermal recovery, low efficiency of water flooding, deep heavy oil, and sensitive heavy oil reservoirs, through the in-situ action on crude oils and reservoirs by microorganisms and their growth and metabolism. In the past five years, research was conducted on the MEOR technology for hard-to-recover heavy oil reservoirs in Shengli Oilfield, and major mechanisms of MEOR were revealed, including degradation of heavy components by hydrocarbon-philic emulsifying microorganisms to reduce oil viscosity, viscosity increase by biopolysaccharides to regulate oil displacement, biogas production assisted oil displacement, interface modification to reduce flow resistance of oil, and swelling prevention by modified minerals. On this basis, four key technologies were developed, i.e., quantitative gene analysis of microbial community in heavy oil reservoirs, high-efficiency activation of in-situ hydrocarbon-philic microorganisms for oil displacement, prediction of production performance with microbial characteristics, and changing biological field by injection-production regulation. The research results were applied on site in 15 low-efficiency heavy oil reservoir blocks in Shengli Oilfield, all of which were highly effective in oil production increase and water cut reduction, with enhanced oil recovery (EOR) more than 3%. The successful promotion of MEOR technology in hard-to-recover heavy oil reservoirs confirms its huge application potential in the conversion and development of heavy oil reservoirs. It is a revolutionary technology for the conversion and development of mature oilfields,

收稿日期: 2021-05-10。

作者简介: 束青林(1966—), 男, 江苏丹阳人, 正高级工程师, 博士, 从事油田开发地质及提高采收率研究与管理工。E-mail: shuqinglin.slyt@sinopec.com。

通信作者: 胡婧(1980—), 女, 河南许昌人, 副研究员, 博士。E-mail: tomatohu@163.com。

基金项目: 中国石化重点科技攻关项目“水驱稠油微生物驱技术研究及示范应用”(P18087)和“普通稠油微生物复合驱油技术研究”(P21020)。

quality improvement, and efficiency enhancement, showing broad promotion prospects.

**Key words:** hard-to-recover heavy oil reservoir; probiotics; EOR; mechanism and technology; field practice

中国稠油储量约为 $200 \times 10^8$  t, 约占石油地质总储量的四分之一, 整体动用率、采收率均低于常规稀油油藏, 是未来石油勘探开发的重要潜力及产量增长点<sup>[1]</sup>。胜利油区稠油储量约为 $9.0 \times 10^8$  t, 其开发状况差异较大, 低速难采单元覆盖储量为 $3.4 \times 10^8$  t, 平均采油速度为0.5%, 主要为多轮次吞吐、低渗透敏感、强边底水及低效水驱等4种类型的稠油油藏<sup>[2]</sup>, 属于难采稠油, 存在开发方式与油藏条件不适用的矛盾, 影响开发效果, 亟待寻找变革性接替开发技术。微生物采油技术通过靶向激活油藏内源或注入采油“益生菌”, 利用菌体生长代谢活动及其产生的活性代谢产物与原油及储层高效作用, 改善油水流量比, 提高稠油原油采收率, 在难采稠油油藏转换开发方式领域展现出巨大的应用潜力<sup>[3-6]</sup>。

自1998年开始, 胜利油区不断深化研究微生物采油机理, 实现微生物采油机理从表观到本质、从定性到定量、从单一到系统的认识提升, 针对不同类型油藏开发矛盾, 开发特异性功能菌种, 研发高效激活剂体系, 建立完备的物理模拟体系, 不断完善微生物采油工艺, 现场已从先导试验进入规模化推广阶段。近5 a, 微生物驱油区块从3个增加到15个, 油藏阵地从低效水驱稠油油藏拓展到多轮次热采、敏感性、高含水稠油油藏, 年增油量从 $0.7 \times 10^4$  t/a增加到 $10 \times 10^4$  t/a<sup>[7-10]</sup>。胜利油区已形成系统的难采稠油油藏微生物提高采收率理论与技术体系<sup>[11-12]</sup>。在机理方面, 通过多机理复合针对性解决不同类型难采稠油油藏开发矛盾。其中多轮次吞吐难采稠油油藏能量亏欠、井间富集剩余油但无法有效动用, 通过微生物原位产生生物气及黏性多糖来补充地层能量并提高波及范围; 低效水驱稠油油藏由于油水流量比大, 水驱波及体积及洗油效率低, 通过微生物原位产黏性多糖及嗜烃降黏来改善油水流量比; 深层稠油油藏注汽效率低, 热损失大, 采出难度大, 通过微生物原位降黏及界面改性实现深层稠油高效采出; 低渗透敏感稠油油藏注汽效率低, 通过微生物矿物改性, 降低储层敏感性, 从根本上解决敏感油藏注采难题<sup>[13]</sup>。在现场应用方面, 形成4项关键技术; 建立稠油油藏微生物群落基因定量解析技术<sup>[14]</sup>、原位嗜烃类驱油功能菌高效激活技术<sup>[15-16]</sup>、生物特征预测生产动态变化技术<sup>[17]</sup>及生物场动态调控技术<sup>[18]</sup>, 为微生物采油技术现场应用提供了技术支撑。笔者系统总结了胜利油区近5 a在

难采稠油油藏微生物提高采收率领域的机理认识、关键技术及现场推广情况, 以期为进一步推进微生物采油技术规模化应用提供指导。

## 1 “益生菌”微生物提高采收率机理

### 1.1 微生物乳化嗜烃实现稠油改质降黏

稠油油藏最主要的开发难题是原油重质组分含量高、黏度大、流动性差。部分微生物可以利用稠油中的重质组分作为碳源生长<sup>[19]</sup>。室内实验发现黏度为 $10\ 000$  mPa·s稠油经嗜烃菌作用后, 胶质、沥青质相对分子质量明显降低, 胶质从 $1\ 410$ 降低到 $1\ 382$ , 沥青质从 $2\ 481$ 降低到 $1\ 618$ , 降黏率达到35%。利用基因组及代谢途径研究, 进一步揭示了嗜烃微生物在油藏厌氧条件下, 以硝酸盐、硫酸盐和 $\text{CO}_2$ 等为电子受体, 利用多级生物酶促反应在多环芳烃分子上进行羟基化、羧基化等反应, 实现开环和逐步降解, 破坏胶质、沥青质分子结构, 从本质上降低稠油黏度(图1)。

### 1.2 微生物产生物多糖实现增黏调驱

低效水驱稠油油藏受油水流量比大的制约, 水驱波及体积较低, 而且在长期注水开采过程中, 油藏非均质性加剧, 微生物和激活剂更倾向于进入高渗透区域, 不能有效进入渗透率较低的高剩余油分布区, 从而影响了驱替效果。研发高黏生物多糖为主体的功能性激活剂(图2), 原液黏度为 $7\ 000$  mPa·s, 有效提高驱替相黏度, 扩大波及体积, 利于微生物更好地进入低渗透区, 实现原油的高效降黏和动用。物理模拟结果表明, 注入生物多糖以后, 驱替压力明显升高, 最高达到 $1.22$  MPa, 后续二次水驱过程中含水率降低, 最大降幅为14.52%, 提高驱替效率10%以上。

### 1.3 微生物厌氧产气增能强化降黏

油藏中绝大部分是厌氧环境, 如何激活和调控厌氧微生物代谢在微生物采油过程中发挥驱油作用是技术关键<sup>[20]</sup>。通过微生物物质代谢、能量代谢途径分析, 明确了油藏厌氧条件下电子传递是厌氧代谢慢的限制性因素(图3)。通过电子受体和激活剂组分调控, 有效提高了产甲烷功能菌数量, 加快了油藏微生物厌氧代谢产气速率, 产气速率达到 $194$   $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{d})$ , 相比常规激活剂提高了42.6%, 吨激活剂产气体 $258.3$   $\text{m}^3$ , 相比常规激活剂提高了1.5

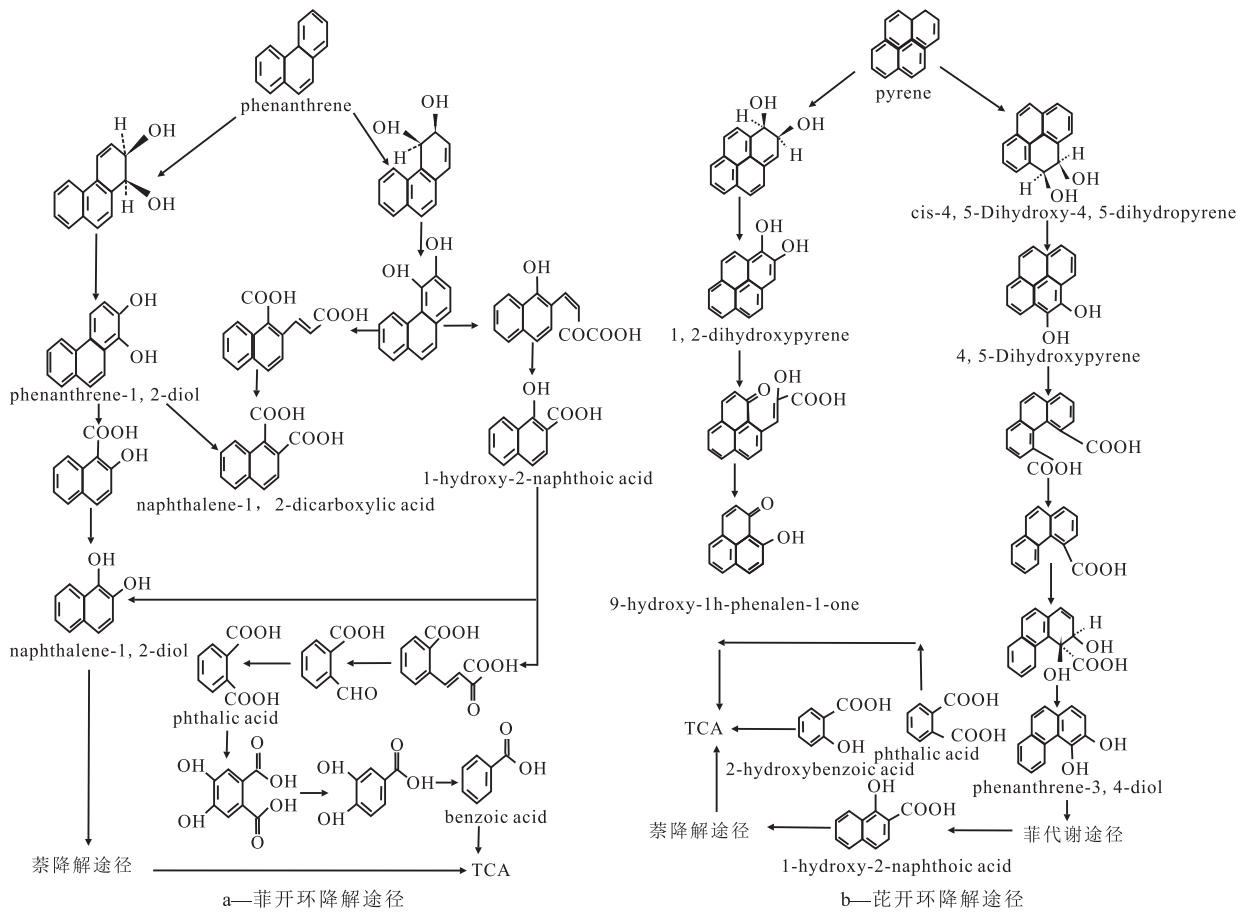


图1 微生物对多环芳烃菲和芘的开环降解途径

Fig.1 Microbial ring-opening degradation pathways of phenanthrene and pyrene

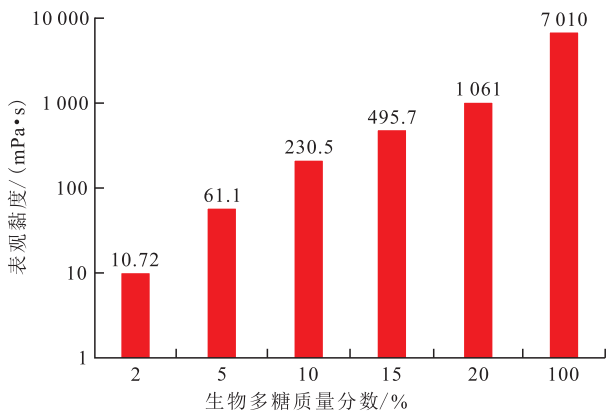


图2 不同浓度功能性激活剂的表现黏度

Fig.2 Apparent viscosity of functional activators at different concentrations

倍。电子受体调控同时提高了微生物厌氧乳化降黏能力,降黏率达到85%。厌氧微生物激活调控技术提高了微生物油藏厌氧环境的适应性,大幅提高了微生物厌氧代谢速率和驱油效率。

#### 1.4 微生物润湿改性降低油相渗流阻力

油藏环境下,微生物吸附在岩石固体表面,形成生物膜,改变储层表面性质。同时,微生物原位代谢的生物表面活性剂也会吸附在油水界面和油

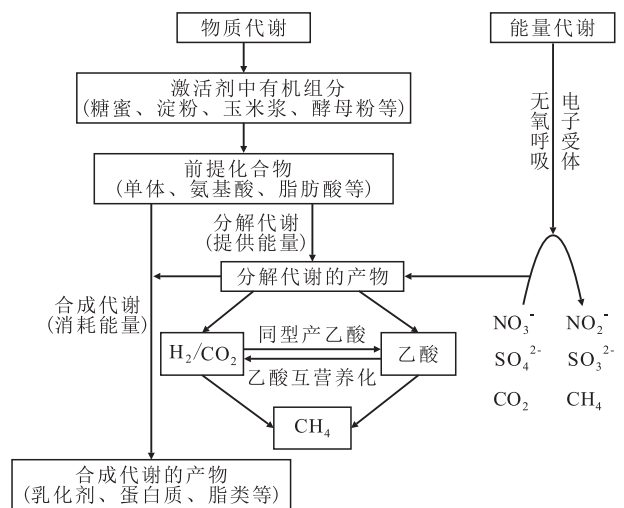


图3 电子受体介导微生物厌氧代谢产气途径

Fig.3 Electron acceptor-mediated microbial anaerobic metabolism and gas production pathway

固界面,其中油固界面上的吸附行为会改变储层岩石表面的润湿性(图4)。生物表面活性剂具有特殊的分子结构,其在岩石表面吸附后亲水基朝向水相,使亲油性岩石表面反转亲水性或弱亲水性<sup>[21-22]</sup>。润湿性的反转会显著提升油相视渗透率。研究发现,模拟储层的亲油性多孔介质经微生物作



用后,原油最大驱动压力显著下降,由 3.65 MPa 最低降至 1.08 MPa,下降幅度达 70%,大幅降低原油渗流阻力。

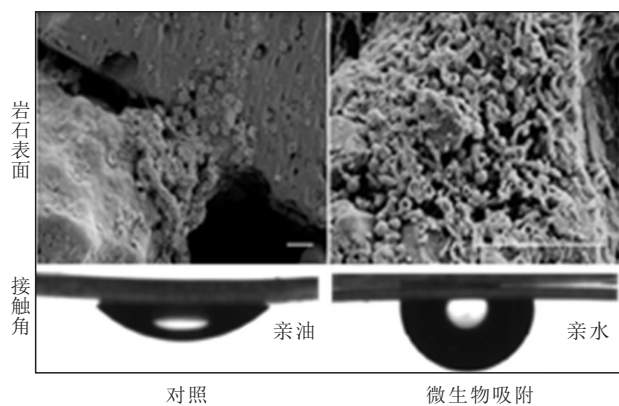


图4 微生物在固液界面吸附后的润湿性变化  
Fig.4 Wettability changes of solid-liquid interfaces after adsorption of microorganisms

### 1.5 微生物改性矿物实现生物防膨

微生物在油藏原位生长,除了高效作用原油外,对油藏储层物性也存在明显影响<sup>[13]</sup>。通过室内研究,首次证实油藏内源微生物具有改性敏感性矿物的潜力。从胜利油区分离到一株嗜热地芽孢杆菌(*Geobacillus icigianus* SL-1),该菌种可以酵母提取物为电子受体,在厌氧条件下还原蒙脱石中的 Fe<sup>3+</sup>,实现蒙脱石向伊利石的转变(图5)。矿物膨胀性较初始矿物显著降低,缩膨率达到 25.9%,有效解决敏感性油藏的水敏问题。

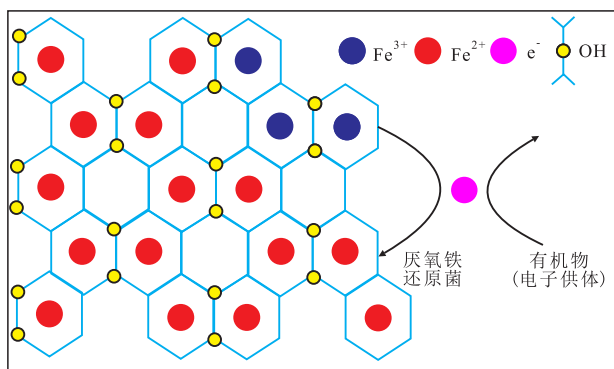


图5 微生物催化蒙脱石向伊利石转化机理示意  
Fig.5 Conversion mechanism of montmorillonite to illite under microbial catalysis

## 2 “益生菌”微生物提高采收率技术

### 2.1 稠油油藏微生物群落基因定量解析技术

稠油油藏原位生长的微生物群落是微生物采油技术的物质基础,基于高通量测序、荧光定量 PCR 及宏基因组学等分子生物学方法建立了胜利油区稠油油藏微生物群落结构和功能解析技术,以

及产脂肽菌、嗜烃菌、硝酸盐还原菌、产甲烷古菌 4 种采油关键微生物定量检测技术<sup>[14]</sup>。基于以上技术揭示了稠油油藏原位微生物群落组成特点及分布规律。甲烷嗜热杆菌(*Methanothermus*)、假单胞菌(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)、不动杆菌(*Acinetobacter*)及海杆菌(*Marinobacterium*)等微生物是稠油油藏主要的优势菌属,*Pseudomonas* 属菌株几乎存在于所有油藏样品中,是油藏的共有微生物,该类菌株具有降解芳烃、烷烃等能力,可以作为稠油油藏微生物驱油内源激活的主要对象。

### 2.2 原位嗜烃类驱油功能菌高效激活技术

原油黏度大、流动性差是稠油油藏的主要开发矛盾,稠油油藏内富含以原油组分为碳源生长的嗜烃类功能微生物,定向激活该类微生物可以实现油藏原位稠油改质降黏。从稠油油藏菌群结构出发,根据目标区块嗜烃微生物营养需求,设计嗜烃类定向激活体系<sup>[15-16]</sup>。嗜烃功能菌定向激活体系以少量有机碳源、无机氮源和磷源盐为主,同时通过添加少量生物表面活性剂和电子受体强化群落微生物嗜烃功能。该定向激活体系可实现嗜烃类微生物的高效激活,芽孢杆菌、假单胞菌、海杆菌等嗜烃功能菌在群落中的丰度提高 30%,浓度达到 10<sup>8</sup> 个/mL,内源培养 30 d 后地面原油黏度为 5 000 mPa·s 稠油的降黏率可以超过 80%,同时嗜烃菌产生的生物表面活性剂和生物乳化剂可以实现原油乳化降黏,复合嗜烃作用后整体降黏率超过 90%。

### 2.3 生物特征预测生产动态变化技术

基于室内物理模拟及现场试验的大数据分析,揭示了微生物特征与生产动态间的构效关系<sup>[18]</sup>。微生物驱油过程中每轮次激活剂注入后,细菌浓度先升高后降低,群落多样性先降低后升高,与驱油效果呈现明显的对应关系。单一激活剂多轮次注入后,每轮次细菌浓度峰值逐渐降低,多样性降幅逐渐减小,驱油效果也随之降低,证实微生物驱需在合适的时机开展动态调控。通过研究证实产甲烷古菌浓度提高 4 个数量级,多样性降幅小于 30% 后,现场生产动态开始变差,通过室内物理模拟试验可以得到目标区块激活剂注入孔隙体积倍数与产甲烷古菌浓度及多样性降幅间的关系(图6)。建立针对沾 3 区块的多样性降幅及产甲烷古菌浓度数量级的拟合公式:

$$D_{diversity} = -24.13 \ln x - 1.7688 \quad R^2 = 0.94 \quad (1)$$

$$\lg C_{Methanogens} = -46.615x^2 + 21.643x + 2.7635 \quad R^2 = 0.97 \quad (2)$$

通过上述生物指标的变化可以准确地预测微

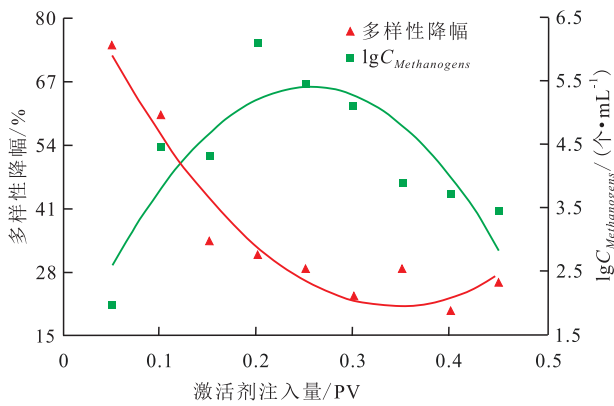


图6 生物指标预测生产动态变化

Fig.6 Prediction of production performance with biological indicators

生物驱油生产动态变化,指导及时调控。

### 2.4 生物场动态调控技术

建立适合微生物采油技术研究的三维物理模拟实验体系,在此基础上形成激活剂及注采工艺对生物场的动态调控技术<sup>[17]</sup>。前期注入高效激活剂,微生物在油藏中逐渐形成生物场,在后期注入功能性激活剂,实现油藏深部微生物的激活,进一步扩大生物场波及范围(图7)。通过三维物理模拟研究,证实激活剂注入地层后油藏内部生物场发育呈现明显的延滞期、对数生长期、稳定期和衰减期特征,不同阶段调整注采强度,缩短延滞期,延长稳定期,可实现微生物驱油快速见效、长期有效(图8)。

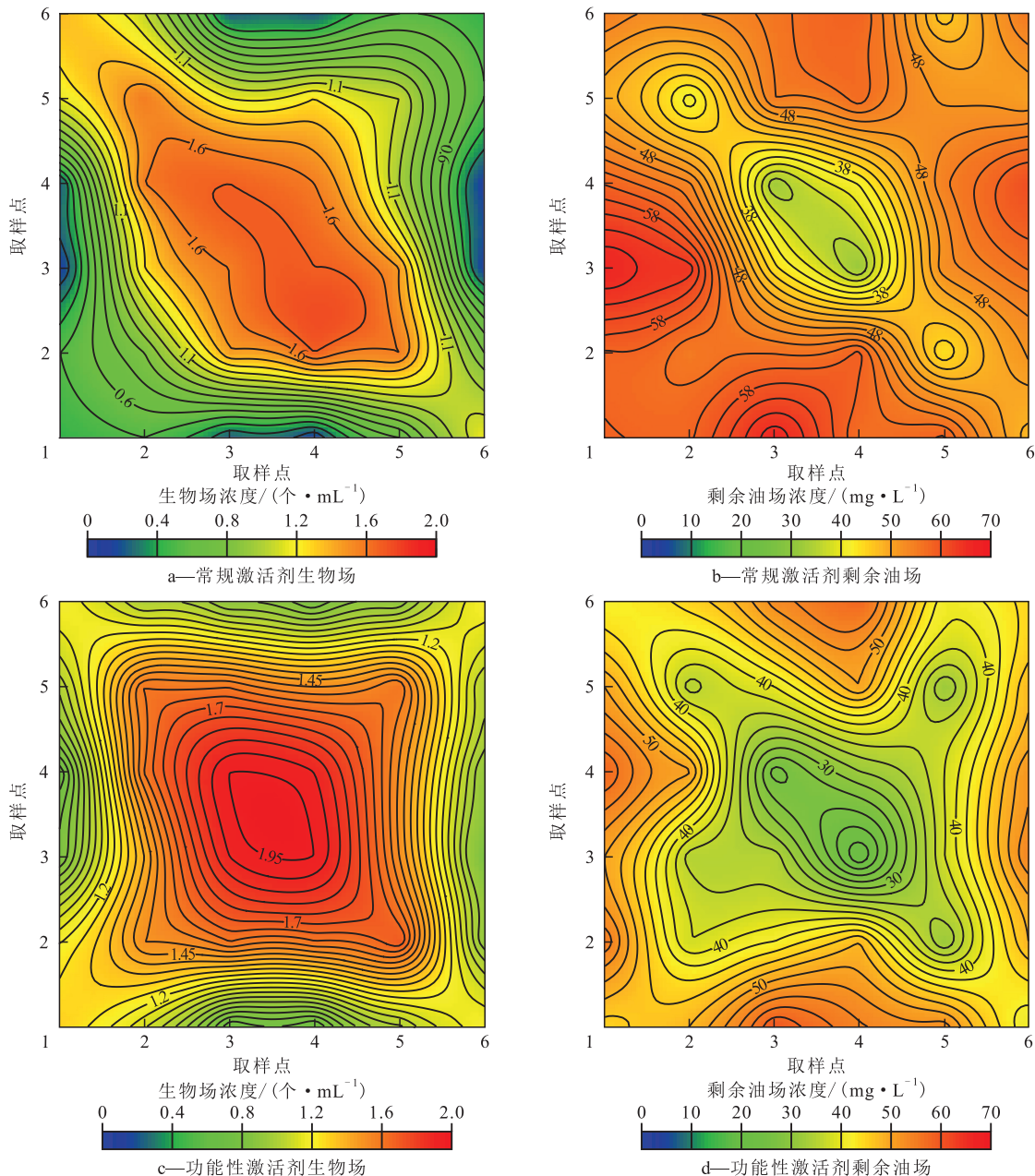


图7 功能性激活剂扩大生物场

Fig.7 Biological field expansion by functional activators



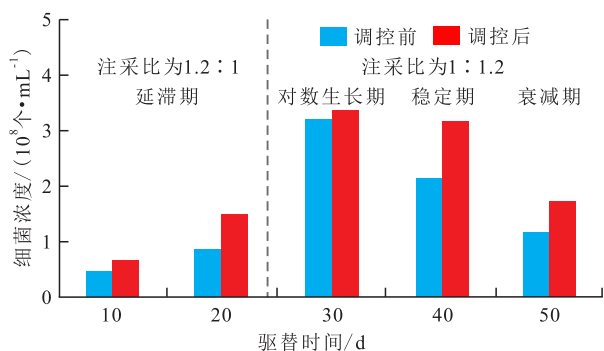


图8 通过注采调控强化不同阶段生物场发育

Fig.8 Development strengthening of biological field at different stages by injection-production regulation

### 3 示范区块矿场实施效果

#### 3.1 低效水驱稠油沾3区块微生物驱技术

沾3区块微生物驱技术实施前含水率为93.8%,属于特高含水水驱油藏。长期水驱后油藏菌群丰度高,采用内源菌选择性激活采油技术,提高水驱效率。方案激活剂总注入量为0.3 PV,采用前期段塞后期连续注入方式,预计提高采收率5.75%。2011年开始实施,截至2021年6月已累积增油量为 $7.69 \times 10^4$  t,阶段提高采收率为4.37%。

#### 3.2 深层稠油辛68区块微生物驱技术

辛68区块属于高温高盐深层稠油油藏,油水流速度比大、非均质性强、水驱效率低,采用功能性激活剂长效激活油藏深部嗜热功能菌群,拓宽微生物驱油藏适应界限。方案设计注入功能性激活剂0.25 PV,截至2021年7月底完成设计量的67.6%,预计提高采收率8.5%。自2016年6月开始注入,实施后峰值日产油量增加12.5 t/d,综合含水率最大降幅为14.9%,截至2021年3月,累积增油量为 $1.36 \times 10^4$  t,阶段提高采收率为3.48%。

#### 3.3 热采稠油草13区块沙四段微生物驱技术

草13区块属于低渗透敏感稠油油藏,热采效率低,转水驱开发快速失效,采用外源功能菌复合采油技术,改善区块开发效果。方案设计注入量为0.3 PV,菌液注入浓度为0.45%,预测提高采收率8.75%。2019年6月实施后,外源菌比例从5%提高到60%,日产油量由23 t/d升至30 t/d,综合含水率最大降幅为8%,累积增油量为3 571 t。

#### 3.4 敏感性稠油金8-30区块微生物吞吐技术

金8-30区块属于敏感稠油油藏,其泥质含量高无法实施热采开发,2019年开始探索微生物矿物改性复合氮气吞吐工艺,通过微生物改性矿物,降低储层敏感性,另一方面通过氮气扩大微生物在油藏中作用半径,提高微生物与原油的接触效率和降黏

效率。2020年金8-30区块实施9口井,年增油量为5 300 t/a,提高采油速度0.26%,周期增油量为8 700 t,该技术下步可覆盖金家油田 $1 500 \times 10^4$  t储量。

## 4 结论

通过近年的研究,不仅深化了胜利油区微生物提高稠油油藏采收率的机理,在现场应用方面也实现了较大的突破,共得到以下3点认识:①微生物通过多机理复合作用提高稠油油藏开发效率,但不同类型油藏应根据开发矛盾明确其微生物采油主导机理。②油藏菌群的全面认识是调控的基础,嗜烃降黏等功能菌高效激活是核心,扩大生物场波及范围是动用剩余油的关键,生物特征准确预测生产动态变化并及时开展生物场动态调控是稳定现场效果的保障。③微生物与其他体系复合、微生物与其他工艺集成,都大幅提高了微生物采油技术的油藏适用范围及现场应用效果,未来需要进一步加强“微生物+”概念的创新。研究成果为同类型难采稠油油藏转换开发方式提供了理论及技术借鉴。

#### 符号解释

- $C_{Methanogens}$ ——产甲烷古菌浓度,个/mL;  
 $D_{diversity}$ ——产出液微生物群落多样性;  
 $R$ ——拟合优度;  
 $x$ ——激活剂注入孔隙体积倍数,PV。

#### 参考文献

- [1] 于连东.世界稠油资源的分布及其开采技术的现状与展望[J].特种油气藏,2001,8(2):98-103.  
YU Liandong. Distribution of world heavy oil reserves and its recovery technologies and future [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2001, 8(2): 98-103.
- [2] 安洁.胜利稠油开发技术及未来发展[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(17):202-203.  
AN Jie. Shengli heavy oil development technology and its future development [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40(17): 202-203.
- [3] SHU F C, SHE Y H, WANG Z L, et al. Mechanism analysis of indigenous microbial enhancement for residue oil recovery [J]. Advanced Materials Research, 2012, 365: 305-311.
- [4] 孙刚正,胡婧,刘涛,等.油藏物性及采出程度对内源微生物驱油效果的影响[J].油气地质与采收率,2021,28(2):41-48.  
SUN Gangzheng, HU Jing, LIU Tao, et al. Effects of reservoir physical properties and recoveries on oil displacement of endogenous microbes [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(2): 41-48.
- [5] 汪卫东.微生物采油技术研究进展与发展趋势[J].油气地质与

- 采收率,2021,28(2):1-9.
- WANG Weidong. Research advance and development trend in microbial enhanced oil recovery technology [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(2): 1-9.
- [6] 侯兆伟,李蔚,乐建君,等.大庆油田微生物采油技术研究及应用[J].*油气地质与采收率*,2021,28(2):10-17.
- HOU Zhaowei, LI Wei, LE Jianjun, et al. Research and application of microbial enhanced oil recovery technology in Daqing Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(2): 10-17.
- [7] 郭辽原,张玉真,杨年文,等.邵家油田沾3块内源微生物驱激活剂优化及现场试验[J].*油气地质与采收率*,2012,19(1):79-81.
- GUO Liaoyuan, ZHANG Yuzhen, YANG Nianwen, et al. Experimental study on activator optimization of indigenous microorganisms flooding and field tests in Zhan3 block, Shaojia oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(1): 79-81.
- [8] 林军章,汪卫东,胡婧,等.胜利油田微生物采油技术研究与应用进展[J].*油气地质与采收率*,2021,28(2):18-26.
- LIN Junzhang, WANG Weidong, HU Jing, et al. Progress in research and application of microbial enhanced oil recovery technology in Shengli Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(2): 18-26.
- [9] 刘涛,赵凤敏,林军章,等.胜利油田辛68区块内源微生物驱油现场试验[J].*石油与天然气化工*,2018,47(2):71-74.
- LIU Tao, ZHAO Fengmin, LIN Junzhang, et al. Field test of indigenous microbial flooding in block Xin68 in Shengli oilfield [J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 2018, 47(2): 71-74.
- [10] 巴燕,胡婧,刘涛,等.中高温油藏内源微生物驱油现场试验[J].*生物加工过程*,2016,14(3):57-62.
- BA Yan, HU Jing, LIU Tao, et al. Experiment of indigenous microbe oil displacement technology in high temperature reservoir [J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2016, 14(3): 57-62.
- [11] 宋永亭,胡婧,吴晓玲,等.室温条件下油藏采出液微生物群落结构稳定性[J].*应用与环境生物学报*,2017,23(3):495-501.
- SONG Yongting, HU Jing, WU Xiaoling, et al. Stability of microbial community structure in reservoir water samples at room temperature [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2017, 23(3): 495-501.
- [12] 汪卫东,李越,吴晓玲,等.油藏环境与物理模型中的微生物群落比较研究[J].*应用与环境生物学报*,2019,25(2):358-364.
- WANG Weidong, LI Yue, WU Xiaoling, et al. Comparative study of microbial communities in a reservoir and physical models [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2019, 25(2): 358-364.
- [13] 胡小丽,张蔚,刘邓,等.油藏嗜热菌与膨润土的相互作用及其对储层防膨的意义[J].*微生物学报*,2019,59(6):1 197-1 208.
- HU Xiaoli, ZHANG Wei, LIU Deng, et al. Effect of interaction between pristine thermophilic bacteria and bentonite on anti-swelling of oil reservoir [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2019, 59(6): 1 197-1 208.
- [14] 胡婧,吴晓玲.内源微生物驱油功能菌定量分析技术[J].*生物加工过程*,2016,14(3):23-26,32.
- HU Jing, WU Xiaoling. Quantification of bacteria responsible for endogenous microbial enhanced oil recovery [J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2016, 14(3): 23-26, 32.
- [15] 李彩凤,宋永亭,谭晓明,等.激活剂对油藏微生物群落及其驱油能力的影响[J].*西安石油大学学报:自然科学版*,2013,28(6):77-81,98.
- LI Caifeng, SONG Yongting, TAN Xiaoming, et al. Effect of activator on community structure and oil displacement ability of reservoir microbial [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2013, 28(6): 77-81, 98.
- [16] 王静,段传慧,李彩凤,等.中高温油藏内源微生物好氧激活技术研究[J].*生物加工过程*,2016,14(3):39-45.
- WANG Jing, DUAN Chuanhui, LI Caifeng, et al. Aerobic activation of endogenous microorganisms in middle and high temperature reservoir [J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2016, 14(3): 39-45.
- [17] 胡婧,束青林,孙刚正,等.油藏内源微生物演替规律及其对驱油效果的影响[J].*中国石油大学学报:自然科学版*,2019,43(1):108-114.
- HU Jing, SHU Qinglin, SUN Gangzheng, et al. Succession of indigenous microbe in reservoirs and its effect on displacement efficiency [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2019, 43(1): 108-114.
- [18] SUN G, HU J, WANG Z, et al. Dynamic investigation of microbial activity in microbial enhanced oil recovery (MEOR) [J]. *Petroleum Science & Technology*, 2018, 36(16): 1-7.
- [19] 李彩凤,束青林,韩保锋,等.嗜烃乳化功能菌在多孔介质中的生长规律及驱油机理[J].*油气地质与采收率*,2021,28(2):27-33.
- LI Caifeng, SHU Qinglin, HAN Baofeng, et al. Study on growth law and oil displacement mechanism of hydrocarbonophilic emulsifying bacteria in porous media [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(2): 27-33.
- [20] 李忠洋,林军章,钱钦,等.一株采油用地衣芽孢杆菌厌氧生长代谢[J].*中国石油大学学报:自然科学版*,2018,42(6):179-184.
- LI Zhongyang, LIN Junzhang, QIAN Qin, et al. Study on anaerobic growth metabolism of a *Bacillus licheniformis* strain [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2018, 42(6): 179-184.
- [21] 丁明山,王静,林军章,等.鼠李糖脂发酵液驱油性能研究[J].*西南石油大学学报:自然科学版*,2019,41(5):112-119.
- DING Mingshan, WANG Jing, LIN Junzhang, et al. Oil displacement performance of rhamnolipid fermentation broths [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2019, 41(5): 112-119.
- [22] 宋智勇,张君,马继业,等.微生物菌液的界面特性[J].*油气地质与采收率*,2008,15(3):73-75.
- SONG Zhiyong, ZHANG Jun, MA Jiye, et al. Interface behaviors of bacterial cultures [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2008, 15(3): 73-75.