

文章编号:1000-4092(2022)03-486-07

新疆陆9井区砂岩油藏廉价营养体系筛选与评价*

王红波¹, 连泽特¹, 曹强¹, 范赛华², 刘晓丽¹, 马挺³

(1. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 2. 中国石油新疆油田分公司陆梁油田作业区, 新疆 克拉玛依 834000; 3. 南开大学生命科学学院, 天津 300071)

摘要:针对陆梁油田陆9井区砂岩油藏主要采油功能菌的营养需求,以工业发酵副产品和农业废弃物为激活剂的主要原料,辅助添加关键性营养生长因子组成营养体系。通过单因素实验筛选出最佳碳源、氮源、磷源,初步确定各组分浓度;以此为基础再通过Plackett-Burman实验和去因子实验分析各分组的显著性影响因素,确定各分组的浓度;然后通过响应面实验,根据响应因素对各组分进一步优化,获得最终配方;最后模拟陆9井区油藏条件开展物理模拟驱油实验。结果表明,筛选出的营养体系高效、价廉,配方组成为0.15%农副产品加工废料、0.6%无机盐(含氮量为16.47%)、0.25%无机盐(含氮量为26.16%)。该体系乳化原油效果较好,可激活主要采油功能基因炔氧化基因拷贝数达到 10^7 copies/mL。物理模拟驱油实验中注入0.4 PV营养体系,同时按气液体积比8:1注入空气,可提高采收率11.65个百分点。与现场在用配方相比,优化配方可降低成本20.25%。激活体系的筛选和评价方法流程为营养体系的筛选评价提供借鉴。

关键词:砂岩油藏;营养体系;筛选与评价;采收率

文献标识码:A DOI:10.19346/j.cnki.1000-4092.2022.03.018

中图分类号:TE357.9

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



新疆陆梁油田位于准噶尔盆地腹部古尔班通古特沙漠北部。其中,陆9井区某油藏为具有基本统一油水界面的薄层、低幅度、高渗透和边底水砂岩油藏。随着采出体积的增大,注水量增幅较小,注采比不断下降。根据该油藏特征与储层物性,结合油水井动态数据分析,发现储层非均质性严重,导致油藏平、剖面矛盾突出,同时受油藏边底水和 CaCl_2 水型的限制,有效提高采收率的方法比较单一,增产措施少。这样的砂岩油藏在新疆油田具有一定的代表性,目前从整体上还缺少抑制含水上升的有效技术手段。然而油藏剩余储量丰富,因此寻找新的技术手段就成了该区块提高油藏采收率和稳油控水的主要途径。

微生物采油技术是生物工程技术在油田开发领域的应用,具有低成本、适应性强、作业简单、无环境问题等优势^[1]。微生物驱油技术即通过注入采油功能菌及其营养激活剂,使其在油藏中产生代谢作用和代谢产物,并与原油/岩石/水相互作用,从而提高水驱效率,达到提高油藏最终采收率的目的,具有油藏适应好、作用途径多、协同作用强、工艺简单、成本低等优势^[2]。激活剂是决定微生物驱油效果的重要因素之一。因此,本文以工业发酵副产品和农业废弃物为激活剂的主要原料,筛选评价了适合于陆9井区油藏的激活体系配方,定向激活油藏中的主要采油功能菌,发挥微生物驱的优势,实现陆9井区油藏的稳油控水和经济有效开发。

* 收稿日期:2021-04-20;修回日期:2021-08-22。

作者简介:王红波(1981—),男,工程师,长江大学生物工程专业学士(2004),从事微生物采油技术研究,电话:0990-6879153, E-mail: wanghongb@petrochina.com.cn。马挺(1977—),男,教授,本文通讯联系人,从事石油微生物方向的研究,通讯地址:300071 天津市南开区卫津路94号南开大学生命科学学院321室, E-mail: tingma@nankai.edu.cn。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

豆饼粉、C₁(农副产品加工废料, 有机氮质量分数 7.31%)、C₂(农副产品加工废料, 有机碳质量分数 20.21%)、豆粕、颗粒状肥料等, 工业级, 天津市利发隆化工科技有限公司; 乙酸钠、红糖、蔗糖、甘油、N₁(含氮无机盐, 含氮量 26.16%)、N₂(含氮无机盐, 含氮量 16.47%)、尿素、磷酸氢二胺、磷酸二氢铵、正十二烷, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 荧光定量 PCR 分析试剂组成: 溶菌酶、十二烷基硫酸钠 (SDS)、Tris 饱和酚、氯仿、乙醇、Roche 荧光定量试剂盒, 北京鼎国生物技术有限责任公司; 超纯水; PCR 引物, 北京奥科生物技术有限责任公司; 环氧树脂胶结驱油用岩心, 取自中国石油新疆油田分公司岩心库; 油水样采集自新疆某砂岩油藏油田陆 9 井区某一层位油藏, 地层水矿化度 10298.89 mg/L, 主要由 Na⁺、Cl⁻、HCO₃⁻ 等离子组成。

ZQZY-70 BS 摇床, 上海知楚仪器有限公司; Yamato SQ 510 C 灭菌锅, 日本大和科学株式会社; JJ-4 A 水浴锅, 金坛市城东新瑞仪器厂; Vortex 2 振荡器, 美国 Scientific Industries 公司; BCD-195 冰箱, 河南新飞电器集团有限公司; 物模驱油装置、HKY-1 型岩石超声波综合测试仪, 海安石油科研仪器公司; 氮气瓶; 不锈钢耐压容器 1、2 L 各 1 个; 油水分离计量器, 天津市泰源工业气体有限公司; MyuQTM2 Opitics Module 实时荧光定量 PCR 仪、Bio-Rad iQ 5 PCR, 美国伯乐生命医学产品(上海)有限公司; JIN26 高速冷冻离心机, 美国贝克曼库尔特 (Beckman Coulter) 有限公司; Universal 320 R 台式高速冷冻离心机, 德国 Hettich 科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

微生物提高原油采收率主要通过微生物本身及其代谢产物两方面作用^[3]。为了便于室内激活体系配方的优化, 依据激活剂激活效果评价方法, 本着简单易行、有效合理的原则, 确立了以激活前后水样总菌数变化、硫酸盐还原菌 (SRB) 数量变化和对原油的乳化作用效果作为评价激活效果的主要指标。

(1) 乳化评级方法

激活剂乳化评级方法参照代学成等^[4]描述的油

水乳化效果评分标准, 主要观察微生物激活培养后分散乳化原油的能力。该方法简单易行, 用肉眼根据经验判定营养配方的乳化效果, 判定结果存在人为因素的误差^[5]。

(2) 排油圈法

排油圈法是公认的简便准确的评估样品乳化效果的实验方法^[6]。具体步骤为: 在培养皿 (直径=90 mm) 中加入 60 mL 的热水, 再加入 10 mL 经苏丹 III 染色的正十二烷 (需过滤除菌); 待正十二烷铺满整个平板后, 在其表面加入 1 mL 待测样品, 用刻度尺测量排油圈直径大小, 若排油圈直径大于 3 cm, 即认为培养液中存在表面活性剂。

(3) 荧光定量 PCR 方法

荧光定量 PCR 是通过荧光信号不断累积而实现实时监测 PCR 全程, 然后通过标准曲线对未知模板进行定量分析的方法^[7]。对于油藏环境而言, 烃氧化菌、硝酸盐还原菌及表面活性剂产生菌这几类功能微生物与微生物采油技术密切相关, 因此定量分析这些功能基因有助于更加清晰地认识和判断油藏环境中的微生物群落。选择与原油乳化分散效果密切相关的编码鼠李糖脂的鼠李糖基转移酶 *rhlAB* 基因、脂肽类表面活性剂合成酶 *urfA* 基因、与烷烃降解相关的烷烃加氧酶 *alkB* 基因进行群落相关功能菌的定量 PCR 分析。引物序列见表 1。

表 1 实时荧光定量 PCR 引物

功能基因	引物名称	引物序列
16S rRNA	8F	5'-GCTSAGCGACGAACTGACCT-3'
	338R	5'-GCTGCCTCCCGTAGGAGT-3'
<i>urfA</i>	<i>urfF</i>	5'-CAAAAKCGCAKCATACCAAKTTGAG-3'
	<i>urfR</i>	5'-AGCGGCAYATATTGATGCGGYTC-3'
<i>rhlAB</i>	<i>rhlF</i>	5'-GCTSAGCGACGAACTGACCT-3'
	<i>rhlR</i>	5'-GRCTGCCCTGMTTCGAGRAAG-3'

因编码烷烃加氧酶的 *alkB* 基因包含细胞色素 P450 氧化酶和细菌颗粒状烷烃羟化酶两大类, 因此在设计 *alkB* 基因的 PCR 引物时, 需设计多对特异性引物及接头引物。用实验室构建的 CPY153 标准质粒绘制标准曲线, 以设置优化出最佳的多对特异性引物添加量以及接头引物的添加量, 具体设计方法和 15 对引物序列见参考文献 [8], 扩增运行程序见

表2。其中,16S rRNA、*srfA*、*rhlAB* 基因的体系组成为:10 μL SYBRGreen Mastermix、9 μL 超纯水、引物1和引物2各0.05 μL 、1 μL DNA模板;*alkB* 基因的体系组成为:10 μL SYBRGreen Mastermix、9 μL 超纯水、0.05 μL 引物、1 μL DNA模板。其中,*alkB* 基因体系配制的第1步按表2进行;第2步在每个体系中加入0.8 μL 的接头引物(JP),用台式高速冷冻离心机混匀后使用荧光定量PCR仪进行定量分析。

表2 4类功能基因PCR扩增运行程序

<i>rhlAB</i>		<i>srfA</i>		16S rRNA		<i>alkB</i>			
						第一步		第二步	
温度/ °C	时间/ s	温度/ °C	时间/ s	温度/ °C	时间/ s	温度/ °C	时间/ s	温度/ °C	时间/ s
95	300	95	300	95	300	94	300	94	60
95	30	95	30	95	300	94	30	94	30
58	40	55	30	55	300	52	30	65	50
72	60	72	60	72	60	72	40	72	30
80	10	82	10	80	100	72	120	80	10
95	60	95	60	95	60	4	120	55~ 95	10
66	60	55	60	55	60	16	60	熔解曲线	
55~ 95	10	55~ 95	10	55~ 95	100	熔解曲线			

(4) Plackett-Burman 实验

参照参考文献[9]进行 Plackett-Burman (简称 P-B) 实验。P-B 实验设计建立在平衡的非完全区组基础上,通过 N 个实验 (N 为 4 的倍数) 来分析 $N-1$ 个变量的两水平实验设计方法。和传统的单因素实验相比,可以利用最少的实验次数快速有效地在众多考察因素中列出重要性排名,找出主要影响因素。

在初步优化营养剂配方的基础上,利用 Minitab 软件(美国宾夕法尼亚州州立大学)进行 P-B 实验设计^[10]。选择 Stat>Factorial>Analysis Factorial Design,生成的实验设计如表3所示。依照 Minitab 设计的 12 水平配方进行显著性分析实验,每个水平设置 3 个平行,在 37 °C、180 r/min 条件下培养 7 d。实验结束后,取 2 mL 激活后的油水样提取基因组,采用荧光定量 PCR 技术对基因组中的 *rhlAB* 和 *srfA* 进行定量分析。

表3 Plackett-Burman 实验设计表

编号	C ₁	C ₂	颗粒状肥料	N ₂	N ₁
1	-1	-1	1	-1	-1
2	-1	-1	1	1	1
3	1	-1	1	1	-1
4	-1	-1	-1	1	1
5	1	-1	1	-1	-1
6	1	-1	-1	-1	1
7	-1	1	-1	-1	1
8	1	1	-1	1	1
9	-1	1	1	1	-1
10	1	1	1	-1	1
11	1	1	-1	1	-1
12	1	1	1	-1	1

注:-1 水平为基础水平 \times 87.5%,1 水平为基础水平 \times 125%。

(5) 物模驱油实验

参照常规的物模驱油实验^[11],向岩心中注入地层水,直至出口含水率为 98% 为止,记录出水量、出油量以及相对应的时间与压力。第 1 次水驱结束后注入 0.5 PV 菌株发酵液,注入速度为 1 mL/min,密封岩心夹持器后培养 7 d,再将地层水注入岩心,直至出口含水率为 98% 为止,计算提高采收率值。

2 结果与讨论

2.1 廉价营养体系的初筛及单因素实验

根据油藏水质分析结果、微生物群落组成和生长的营养需求,结合当前国内外已报道的激活体系组成,以及现场配方的组成分析(0.275% C₂、0.125% C₁、0.6% N₂、0.25% N₁),确定基础配方为 0.25% C₂、0.2% 豆饼粉、0.25% N₁、0.6% N₂。综合考虑激活体系筛选原则和激活对象的实际情况,以碳源、氮源、磷源、生长因子和 SRB 抑制因子为出发点,进行单因素实验初步确定基础激活配方。用 250 mL 三角瓶进行好氧培养,培养温度 37 °C,摇床转速为 180 r/min,培养时间 7 d。培养结束后进行乳化性能评价和功能菌的检测。可以根据激活体系激活后的原油乳化效果及功能菌激活的总菌数评价激活体系的好坏^[4]。

碳源的筛选。在现场激活配方基础上,以乙酸钠、红糖、C₂、蔗糖、甘油、原油(唯一碳源)为碳源进

行水样激活实验, 控制其他营养成分和组成不变。结果表明, 乙酸钠和 C_2 的激活效果最好, 激活后油水样微生物 16S rRNA 基因拷贝数达到了 10^{12} copies/mL 以上, 乳化评级也达到+++ (+的数量对应于参考文献[4]中乳化评级方法的 0~5 分); 蔗糖、红糖的激活效果稍差, 乳化评级为++; 甘油和原油的激活效果最差, 乳化评级为+。

氮源的筛选。在现场激活配方基础上, 以 N_1 、 N_2 、豆饼粉、 C_1 、尿素、豆粕为氮源进行水样激活实验, 控制其他营养成分和组成不变。结果表明, N_1 、 N_2 、豆饼粉、 C_1 4 组氮源的微生物 16S rRNA 基因拷贝数均达到了 10^{12} copies/mL 以上, 乳化评级达到+++ (C_1 为++++)。尿素、豆粕的激活效果较差, 乳化评级为+。

磷源的筛选。在现场激活配方基础上, 以颗粒状肥料、磷酸氢二铵、磷酸二氢铵、 C_1 为磷源进行水样激活实验, 控制其他营养成分和组成不变。结果表明, 磷酸氢二铵、磷酸二氢铵等无机磷源(添加量为 0.2%) 与陆 9 井区氯化钙型地层水形成不溶性沉淀, 会造成地层堵塞, 无法应用于该区块的激活。 C_1 、颗粒状肥料 2 种磷源都达到了出色的乳化效果, 微生物 16S rRNA 基因拷贝数大于 10^{12} copies/mL, 乳化评级为++++。

综合单因素实验结果和激活配方筛选原则, 确定初步配方为: 0.10% C_1 、0.25% C_2 、0.15% 颗粒状肥料、0.6% N_2 、0.3% N_1 。

2.2 Plackett-Burman 实验

依据表 3 设计开展营养剂激活实验, 培养结束后提取基因组, 对 *rhlAB* 和 *srfA* 进行定量分析, 将上述功能基因拷贝数输入软件获得乳化效果综合得分拟合方程:

$$Y=2.85+1.4 \times 10^{-5}(\text{rhlAB copies})+1.8 \times 10^{-4}(\text{srfA copies}) \quad (1)$$

在 Minitab 软件菜单中选择 Stat>Facterial>Facterial Plots, 生成各因素对输出变量(Y 值)的影响图。通过分析主要影响图可知各因素的显著性^[10], 结果见表 4。

由表 4 可见, C_1 、颗粒状肥料的效应为正, 加量增大对乳化效果为正响应, 即适当增大加量可提高乳化评级分数; C_2 、 N_2 、 N_1 的效应为负, 加量减少对乳化效果为正响应, 即适当减少加量可提高乳化评级

表 4 响应值(乳化评分)的估计效应和系数

项目	效应	系数	t	P
常量		0.06833	8.46	0.000
C_1	0.00468	0.00234	0.29	0.782
C_2	-0.03054	-0.01527	-1.89	0.108
颗粒肥料	0.01841	0.00920	1.14	0.298
N_2	-0.02645	-0.01322	-1.64	0.153
N_1	-0.02566	-0.01283	-1.59	0.163

注: $R^2=62.86\%$, 系数标准差均为 8.079×10^{-3} 。 R^2 衡量回归方程解释观测数据变异的能力, 其数值越接近于 1 代表模型拟合越好。 $t=(\text{样本平均值}-\text{总体平均值})/\text{标准误差}$; 当 P 小于 0.05 时表示具有显著性。

分数。但 5 个营养因子的 P 值不具有统计学意义 ($P>0.05$), 因此无法通过 Plackett-Burman 实验得出各营养因子对乳化效果的显著性结果。

在颗粒状肥料加量为 0.1% 时能有效激活陆 9 井区地层水中的功能微生物, 激活后的油水样品能达到良好的乳化效果。颗粒状肥料来源为工业肥料回收再利用, 虽然价格低廉, 激活效果良好, 但颗粒为直径 3~5 mm 的实心球状体, 溶解较为困难, 而碾碎溶解后, 有较多不溶性片状杂质(长度约为 5 mm), 在地层中易造成非选择性封堵。因此, 在后续实验中, 不再使用颗粒状肥料进行实验。而 C_1 含磷量为 2.4%, 在单因素结果中, C_1 作为磷源表现了良好的乳化效果, 因此在后续实验中使用 C_1 作为磷源。

2.3 去因子实验

2.3.1 营养配方设计

由于不同水平的营养因子添加量下, 激活后样品总菌数和功能基因的数量级无显著性差异 ($P<0.05$), 无法准确判断各因素的最佳水平。另外, 考虑工业成本的可行性, 由单因素实验得到的初步配方出发, 在 Plackett-Burman 实验的基础上进行更为直观的去因子实验, 在保证激活效果的同时节约成本, 实现最优的资源利用。设计的 7 组配方见表 5。在 37 °C、180 r/min 条件下培养 7 d。培养结束后进行乳化评级、功能基因定量 PCR 分析。

2.3.2 营养配方优化结果

用乳化评级和排油圈法共同测定不同营养配方的乳化效果, 结果见表 6。配方 C 的乳化效果最好, 排油圈直径 4.0 cm。

表5 去因子实验营养配方组成

成分	加量/ %	配方编号						
		A	B	C	D	E	F	G
C ₂	0.25	+	+	-	-	-	-	-
C ₁	0.15	+	-	+	-	-	+	+
N ₂	0.60	+	+	+	+	+	+	+
N ₁	0.25	+	+	+	+	+	-	+
豆饼粉	0.25	-	-	-	+	-	-	-
乙酸钠	0.25	-	-	-	-	+	+	+

注：“+”—添加，“-”—不添加。

表6 7组营养配方去因子实验结果

测试项目	配方编号						
	A	B	C	D	E	F	G
乳化评级	4	2	5	3	1	4	5
直径/cm	2.5	0.2	4	2.5	0	3	3.6

用实时荧光定量 PCR 技术分别测定 7 组营养配方的 16S rRNA 基因、*alkB* 基因、*srfA* 基因、*rhlAB* 基因,分别测定解烃基因、脂肽基因、鼠李糖脂基因的拷贝数,结果见表 7。

表7 实时荧光定量检测功能基因拷贝数

营养配方 编号	功能基因/(copies·mL ⁻¹)			
	16S rRNA	<i>alkB</i>	<i>srfA</i>	<i>rhlAB</i>
A	1.70×10 ¹⁰	4.43×10 ⁸	8.88×10 ⁵	1.79×10 ⁵
B	8.04×10 ⁹	7.01×10 ⁸	2.33×10 ⁶	1.50×10 ⁵
C	2.42×10 ¹⁰	5.96×10 ⁸	3.60×10 ⁵	4.77×10 ⁵
D	8.29×10 ⁹	1.11×10 ⁹	1.65×10 ⁶	3.20×10 ⁵
E	8.67×10 ⁸	1.32×10 ⁸	2.91×10 ⁵	4.78×10 ⁴
F	1.96×10 ¹⁰	7.37×10 ⁸	3.01×10 ⁵	3.59×10 ⁵
G	2.05×10 ¹⁰	6.51×10 ⁸	6.55×10 ⁵	1.71×10 ⁵

综上,7组去因子实验激活结果表明,配方 C 和配方 G 的激活效果显著,无沉淀与不溶性杂质出现,配方与水样的配伍性良好,乳化评级均为 5 分。功能基因定量结果显示解烃菌 *alkB* 基因均达到了 10⁷ copies/mL,脂肽产生菌 *srfA* 基因均达到了 10⁵ copies/mL,鼠李糖脂产生菌 *rhlAB* 基因均达到了 10⁴ copies/mL。

2.4 响应面分析结果

响应面法是通过近似构造一个具有明确表达形式的多项式来表达因式功能的函数^[12]。借助

Minitab 5.0 软件,采用二次回归的旋转中心组合设计,进行实验设计和激活体系配方优化。对实验数据进行回归拟合,对拟合方程作显著性检验和方差分析^[13]。选择配方 C,并以 0.15% C₁、0.6% N₂、0.25% N₁作为 0 水平进行 3 因素 20 水平响应面分析。分析结果(表 8)表明,C₁和 N₁为负响应因素,可适当减少添加量;而 N₂为正响应因素,可适当增加添加量。

表8 响应面分析结果

项目	系数	系数标准误差	t	P
常量	3.79444	0.2021	18.776	0.000
C ₁	-0.10091	0.1494	-0.676	0.521
N ₂	0.15393	0.1494	1.031	0.337
N ₁	-0.06861	0.1494	-0.459	0.660
C ₁ ×C ₁	-0.33870	0.2885	-1.174	0.279
N ₂ ×N ₂	0.51275	0.2885	1.777	0.119
N ₁ ×N ₁	-0.50360	0.2885	-1.745	0.124
C ₁ ×N ₂	0.08700	0.1670	0.521	0.618
C ₁ ×N ₁	0.02993	0.1670	0.179	0.863
N ₂ ×N ₁	0.04496	0.1670	0.269	0.795

为了更为准确地评估不同水平的添加量响应结果,进行了 20 水平的荧光定量 PCR 分析(图 1)。实验结果表明,20 水平的配方加入量对功能基因数量级的响应在 1 个数量级之内,表明 3 个因素的 3 个水平任意组合均不会对激活效果造成较大波动。N₂不仅作为优良氮源,同时还可以促进硝酸盐还原菌的生长代谢。由于硝酸盐还原菌的生态位在硫酸盐还原菌之上,且硝酸盐还原菌的适当富集可以有效抑制硫酸盐还原菌的生长,因此不降低 N₂的添加量。C₁作为辅助氮源之外,更重要的作用是提供微生物生长代谢所必须的磷源(C₁中的无机磷含量为 0.7%),因此不降低 C₁的添加量。与 0 水平的 N₁(0.25%)相比,低水平 N₁(0.2%)的激活效果及功能基因的数量级并无明显差异,因此可以适当降低 N₁的加量。当 N₁的加量为 0.25%时,配方成本为 27.43 元/方,已较现场配方降低了 20.25%。为了更好地确保激活效果,N₁的加量不再降低。最终激活体系配方为:0.15% C₁、0.6% N₂、0.25% N₁。与徐兵等^[13]对陆 9 井区内源微生物优化后的激活配方相比,成本已大大降低。

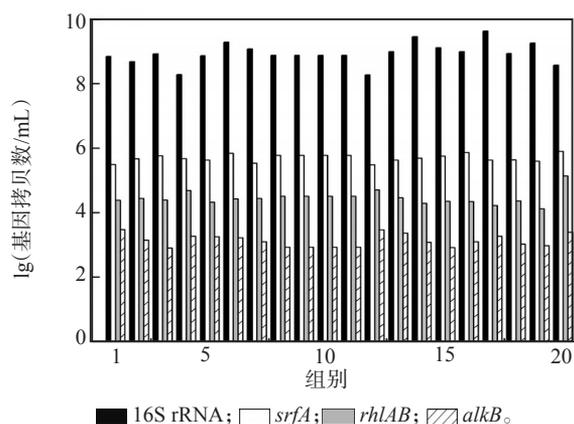


图1 荧光定量PCR 16S rRNA、*srfA*、*rhlAB*、*alkB*基因每毫升拷贝数

2.5 物模驱油结果

模拟陆9井区油藏条件开展物理模拟驱油实验,结果见表9。当优化配方注入量为0.1~0.6 PV时,驱油效率提高2.65百分点~5.92百分点。在注入0.6 PV的实验过程中,注入量达到0.55 PV时出现激活体系突破。从物理模拟提高采收率效果来看,0.6 PV提高驱油效率5.92百分点,仅比0.4 PV多0.55百分点。表明在驱替突破后,后续激活剂的注入并没有进一步提升地层微生物乳化原油的能力,而突破后的激活体系则造成浪费,因此选择0.4 PV作为最佳注入量。在相同条件(0.4 PV,优化配方)下,进行注气量的优化实验。优化配方不注气的条件下提高驱油效率5.37百分点。优化配方注气(气液体积比8:1)的条件下提高驱油效率11.65百分点,高于代学成等^[4]制定的激活配方筛选评价指标(6百分点~9百分点)。

表9 物模驱油实验结果

注入条件	岩心气测 渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	一次水驱 出油量/ mL	水驱采收 率/%	最终采收 率/%	提高采收 率/%
0.4 PV	1102	17.6	52.54	57.91	5.37
0.1 PV	1108	17.5	51.62	54.28	2.65
0.2 PV	1039	18.4	54.12	57.94	3.82
0.6 PV	1032	17.9	52.96	58.88	5.92
注气1:2	1105	18.3	53.67	61.88	8.21
注气1:4	1145	17.6	51.01	60.87	9.86
注气1:8	1179	17.8	53.13	64.78	11.65

2.6 现场应用

陆9油藏微生物驱先导试验于2017年11月开始现场实施,应用的营养体系为本文所筛选的激活体系。试验区4口注入井,设计注入营养体系 $21.75 \times 10^4 \text{ m}^3$ (折算孔隙体积0.1 PV),预计增油4.98万吨,提高采收率3.5%。截至2020年10月25日,试验区注剂 $15.13 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。完成总方案的69%。目前现场试验效果处于高峰期,陆9微生物驱矿场试验累积核实增产 $1.8 \times 10^4 \text{ t}$,阶段提高采收率1.3%,平均单井日产油3.1 t,微生物驱效果明显。

3 结论

针对陆9井区砂岩油藏主要采油功能菌的营养需求,筛选出一套高效而廉价的营养体系。该体系乳化原油效果较好,激活主要采油功能基因烃氧化基因达到 10^7 copies/mL ,脂肽产生菌*srfA*基因均达到了 10^5 copies/mL ,鼠李糖脂产生菌*rhlAB*基因均达到了 10^4 copies/mL ;物模驱油实验提高采收率11.65百分点。

体系选取工业发酵副产品和农业废弃物为激活剂的主要原料,与现场在用配方相比,注入药剂成本显著降低20.25%。配方成分廉价易得、便于运输和储存,适合油田低成本开发的需要,具有良好的应用价值。

通过单因素试验、Plackett-Burman实验、去因子实验、响应面实验等,并结合微生物激活评价方法,形成一套微生物激活剂筛选评价方法流程,为今后开展微生物驱激活剂筛选评价提供借鉴。

参考文献:

- [1] 汪卫东. 我国微生物采油技术现状及发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(6): 87-90.
- [2] 冯庆贤, 郭海莉, 倪方天, 等. 本源微生物驱油技术研究与应用[J]. 特种油气藏, 2001, 8(4): 84-86.
- [3] ZHAN Y L, WANG Q H, CHEN C M, et al. Potential of wheat bran to promote indigenous microbial enhanced oil recovery [J]. J Ind Microbiol Biotechnol, 2017, 44(6): 845-855.
- [4] 代学成, 王红波, 许念, 等. 内源微生物驱油激活配方筛选评价指标探讨[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 37-40.
- [5] 高配科. 油藏内源微生物高效激活剂筛选与评价[D]. 天津: 南开大学, 2011: 15-24.
- [6] MASAKORALA K, YAO J, CAI M, et al. Isolation and characterization of a novel phenanthrene (PHE) degrading strain

- Pseudomonas* sp. USTB-RU from petroleum contaminated soil [J]. *J Hazard Mater*, 2013, 263(pt 2): 493–500.
- [7] 安钢力. 实时荧光定量PCR技术的原理及其在应用[J]. 中国现代教育装备, 2018(21): 19–21.
- [8] LI G Q, GAO P K, ZHI B, et al. The relative abundance of alkane-degrading bacteria oscillated similarly to a sinusoidal curve in an artificial ecosystem model from oil-well products [J]. *Environ Microbiol*, 2018, 20(10): 3772–3783.
- [9] 蒋晗, 赵进, 方结红. Plackett-Burman设计和响应面法在食品专业综合实验教学中的应用[J]. 食品工程, 2017(2): 10–14.
- [10] AHUJA S K, FERREIRA G M, MOREIRA A R. Application of Plackett-Burman design and response surface methodology to achieve exponential growth for aggregated shipworm bacterium [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2004, 85(6): 666–675.
- [11] 宋智勇, 郭辽原, 高光军, 等. 内源微生物驱油物模实验及其群落演变研究[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(1): 89–93.
- [12] 胡永红, 沈树宝, 欧阳平凯. 响应面分析法用于微生物培养基浓度的优化[J]. 工业微生物, 2002(1): 9–12.
- [13] 徐兵, 修建龙, 崔庆锋, 等. 陆梁水驱油藏内源微生物激活配方优化及性能[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(10): 104–110.

Screening and Evaluation of Cheap Nutrient System for Sandstone Reservoir in Lu 9 Well Block of Xinjiang

WANG Hongbo¹, LIAN Zete¹, CAO Qiang¹, FAN Saihua², LIU Xiaoli¹, MA Ting³

(1. Research Institute of Experimental Detection, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, P R of China; 2. Luliang Oilfield Operation Area, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, P R of China; 3. College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, P R of China)

Abstract: According to the nutrient requirement of the main oil recovery functional bacteria in the sandstone reservoir of Lu 9 well block, by-products of fermentation and agricultural wastes were selected as the main component of the nutrient medium, which also contained some auxiliary microbial growth factors. The optimum carbon source, nitrogen source and phosphorus source were selected through single factor experiment. The concentration of each component was preliminarily determined. On this basis, the significant influence factors of each component were analyzed by Plackett-Burman experiment and factor removal experiment, then the concentration of each component was determined. Finally, response surface test was used to further improve the concentration of each component. Moreover, oil displacement experiment was performed under simulated reservoir condition. The results showed that the nutrient system was efficient and cheap. The nutrient medium contained 0.15% by-products of fermentation and agriculture, 0.6% mineral salt with nitrogen content of 16.47%, and 0.25% mineral salt with nitrogen content of 26.16%. The oil emulsifying effect of the system was good. The copy number of hydrocarbon oxidation gene, which could activate the main oil recovery function gene, reached 10^7 copies/mL. In the physical simulation oil displacement experiment, the recovery factor could increase 11.65 percentage points after injecting 0.4 PV nutrient system and air at a gas-liquid volume ratio of 8:1. Compared with the formula used in the field, the optimum formula could reduce the cost by 20.25%. The screening and evaluation process of activation system could provide reference for the screening and evaluation of nutritional system.

Keywords: sandstone reservoir; nutrient system; screening and evaluation; recovery factor