

# 龙虎泡油田微生物驱油评价实验

毕永强<sup>1,2</sup>, 伊丽娜<sup>3</sup>, 齐义彬<sup>1,2</sup>, 王天源<sup>1,2</sup>, 黄立信<sup>3</sup>, 俞理<sup>3</sup>

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 廊坊 065007
2. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049
3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊 065007

**摘要** 为了在大庆龙虎泡油田应用微生物采油技术, 进行室内评价实验。从龙虎泡油田地层水中筛选到一株内源菌 DH8, 经鉴定为 *Geobacillusstearothermophilus*, 另外从菌种库中挑选一株适合该油藏条件生长的外源菌 SL21, 经鉴定为 *Bacillus licheniformis*。室内对 DH8 和 SL21 的乳化性能、降解能力和驱油效率进行了评价。研究发现, 菌株 DH8 和 SL21 发酵液的比毛管数分别为 0.0239 s/m 和 0.0332 s/m; 菌株 DH8 和 SL21 分别使原油黏度降低 19.02% 和 26.08%; 气相色谱分析表明菌株 DH8 主要降解 C<sub>13</sub>~C<sub>27</sub> 内正构烷烃, 而菌株 SL21 主要降解 C<sub>19</sub>~C<sub>37</sub> 内正构烷烃, 经 DH8 和 SL21 降解后, C<sub>13</sub> 之前烷烃含量占比分别增加了 5.33% 和 11.00%; 物模实验表明, 菌株 SL21 和菌株 DH8 的驱油效率分别为 7.11% 和 5.50%。综合分析得出外源菌 SL21 的各项驱油性能指标均优于内源菌 DH8。

**关键词** 微生物采油; 性能评价; 气相色谱; 物模实验

**中图分类号** Q939.97, TE39

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.09.008

## Experimental evaluation of the microbial oil displacement in Longhupao oilfield

BI Yongqiang<sup>1,2</sup>, YI Lina<sup>3</sup>, QI Yibin<sup>1,2</sup>, WANG Tianyuan<sup>1,2</sup>, HUANG Lixin<sup>3</sup>, YU Li<sup>3</sup>

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China
2. School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, China

**Abstract** In order to apply the technology of the microbial enhanced oil recovery in the Longhupao oilfield of Daqing, a series of experiments are conducted in our laboratory. Two strains of microbes are considered in the experiment. The endogenous microbe DH8 is screened from the Longhupao oilfield formation water, identified as the *Geobacillusstearothermophilus*; the inoculating microbe SL21 is selected from the strain library, identified as the *Bacillus licheniformis*. Their emulsification property, degradation ability and oil displacement efficiency are studied. It is shown that the specific capillary numbers of the DH8 and the SL21 are 0.0239 s/m and 0.0332 s/m, respectively; the viscosity reductions of the oil are 19.02% and 26.08% after the applications of the DH8 and the SL21. The linear Alkanes in the C<sub>13</sub>~C<sub>27</sub> are mainly degraded by the DH8, and the linear Alkanes in the C<sub>19</sub>~C<sub>37</sub> are mainly degraded by the SL21, but the short-chain n-alkanes before the C<sub>13</sub> are both increased by 5.33% and 11.00% after the applications of the DH8 and SL21. The physical flooding simulation experiments show that the oil displacement efficiency of the SL21 and the DH8 are 7.11% and 5.5%, respectively. Therefore, the oil displacement performance of the SL21 is better than that of the DH8.

**Keywords** microbial enhanced oil recovery; performance evaluation; gas chromatography; physical simulation experiment

收稿日期: 2015-02-09; 修回日期: 2015-03-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA064402)

作者简介: 毕永强, 博士研究生, 研究方向为微生物采油, 电子信箱: bicheng929@163.com; 俞理(通信作者), 高级工程师, 研究方向为微生物提高采收率, 电子信箱: yuli3058@163.com

引用格式: 毕永强, 伊丽娜, 齐义彬, 等. 龙虎泡油田微生物驱油评价实验[J]. 科技导报, 2015, 33(9): 50-53.

微生物采油技术(MEOR)是一种三次采油技术,美国于1991年将其列为热采、化学驱、气驱之后的第4类提高原油采收率方法,并应用于现场的油田开发<sup>[1]</sup>。根据菌种的来源不同,微生物提高采收率技术细分为内源微生物驱油技术和外源微生物驱油技术<sup>[2,3]</sup>。内源微生物采油技术是通过将筛选出的具有驱油性能的内源微生物回注地层并补充营养物,或直接添加营养物质定向激活油藏中固有的驱油功能微生物,使其大量繁殖,产生大量有利于驱油的代谢产物,通过菌体和代谢产物的作用提高原油采收率<sup>[4]</sup>。外源微生物驱油技术是通过将各类环境中筛选分离的具备驱油功能的微生物引入地层,利用其繁殖效应和代谢产物提高原油采收率<sup>[5]</sup>。内源微生物成本低、外源微生物来源广,二者都各具优缺点<sup>[6,7]</sup>。

龙虎泡油田为典型的三低油田,构造位置位于松辽盆地中央拗陷区齐家—古龙凹陷西侧,是龙虎泡—红岗阶地北端一个轴向近于南北的短轴三级背斜构造。开采层位主要是萨尔图油层、葡萄花油层和高台子油层,以开采萨尔图油层为主,主要含油层位为孔隙型储集层,润湿性亲水,地层温度65℃,平均孔隙度21%,含水饱和度40%,绝对渗透率 $87 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。地质储量 $1316 \times 10^4 \text{t}$ ,可采储量 $500 \times 10^4 \text{t}$ ,含油面积 $27.5 \text{km}^2$ 。目前注水开发调整主要依靠层段或全井周期注水、调剖手段,但调整效果逐渐变差,提高剩余油动用难度越来越大。针对中高温油藏,有研究证明了微生物采油的可行性<sup>[8,9]</sup>。本文分析内源菌株和外源菌株所具备的驱油性能。

## 1 材料与方 法

### 1.1 仪器与材料

恒温箱、美国ISCO高精度柱塞泵、真空泵、玻璃转子流量计、高压活塞式中间容器、压力表、自制油水分离计量装置、超净台、恒温摇床、BROOKFIELD DV-II型黏度计、奥立龙“868”pH酸度计、HP-6890GC气相色谱仪、美国BECKMAN高速冷冻离心机等。

所用原油和地层水样品来自大庆龙虎泡油田。地下原油黏度 $2.48 \text{mPa}\cdot\text{s}$ ,经脱水脱气处理后,在65℃条件下测定原油黏度为 $10.2 \text{mPa}\cdot\text{s}$ ;产出水总矿化度平均为 $6702 \text{mg/L}$ 。

### 1.2 培养基

无机盐培养基:( $\text{NH}_4$ )<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 4.0 g/L、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3.4 g/L、Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 1.5 g/L、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.7 g/L、酵母粉0.1 g/L,原油10%(质量分数),pH值7.2~7.4。

LB液体培养基:蛋白胨10 g/L、酵母粉5 g/L、NaCl 10 g/L,pH值7.2。

LB固体培养基:蛋白胨10 g/L、酵母粉5 g/L、NaCl 10 g/L,pH值7.2,配置成溶液后加入2%琼脂粉。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 油藏内源微生物的分离和筛选

用地层水配制无机盐培养基,在65℃油藏温度、120 r/min下进行培养,培养7 d后观察原油乳化效果,选取乳化效果较好的油水混合培养物为接种源,划线涂布于LB固体培

养基平板,65℃下静置培养,挑取单菌落于LB固体培养基平板上纯化,接种于液体LB培养基中,65℃下120 r/min培养24~48 h,将发酵液接种于无机盐培养基中,65℃、120 r/min培养7 d,观察原油乳化效果。

#### 1.3.2 微生物发酵液表面张力、pH值及黏度测定

将菌株DH8和SL21分别接种于无机盐培养基,置于摇床中,65℃、120 r/min振荡培养7 d后,将油水混合溶液置于BECKMAN高速离心机,9000 r/min离心20 min,去除上层原油和下层菌体,收集中层发酵液。应用JK99C表面张力仪测定发酵液的表面张力值;应用奥立龙“868”pH酸度计测定发酵液的pH值;应用BROOKFIELD DV-II型黏度计测定发酵液的黏度。

#### 1.3.3 原油及其乳状液黏度测定

乳化原油黏度的测定:将脱水脱气原油和下层发酵液按体积比1:1混合,65℃、120 r/min作用30 min后,发酵液和原油形成稳定乳状液,测定稳定65℃乳状液的黏度。

降解原油黏度的测定:将离心后的上层原油收集,应用BROOKFIELD DV-II型黏度计测定65℃下原油黏度。

#### 1.3.4 原油组分的测定

使用HP-6890GC气相色谱仪对未处理原油和微生物作用后原油进行全烃气相色谱分析,响应信号用归一化法求得各组分的质量分数,分析原油中烷烃组分的变化。色谱分析条件为:柱长30 m,内径0.22 mm,柱温50~310℃;气化温度310℃;检测温度320℃;氢火焰离子化检测器载气为氮气,燃气为氢气(流速30 mL/min)和空气(流速300 mL/min)。

#### 1.3.5 物理模拟驱油评价实验

依据油藏渗透率填制模型并气测渗透率,将模型抽真空4h后饱和地层水,饱和完成后计量孔隙体积并计算出孔隙度 $\Phi$ ,通过油驱水建立束缚水,计算束缚水饱和度 $S_{wc}$ ,水驱油至极限含水率98%停止水驱,计算采收率,注入微生物驱油体系,65℃条件下静止培养7 d,后续水驱至含水98%时结束实验,计算驱油效率。物模实验装置流程图如图1所示。

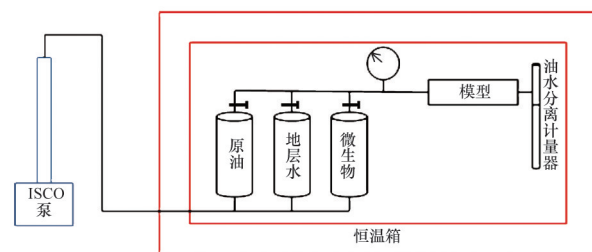


图1 岩心驱替模拟实验装置示意

Fig. 1 Core displacement experiment device

## 2 结果与讨论

### 2.1 发酵液的驱油能力分析

将筛选获得的内源菌DH8和菌种库挑选的外源菌SL21分别置于无机盐培养基中进行发酵,待菌株发酵结束后,取

离心收集的新鲜发酵液,测定 pH 值、表面张力值和黏度值,结果如表 1 所示, DH8 和 SL21 发酵液的 pH 值均有不同程度的降低,说明产生了酸性物质,有实验研究是产生了低分子有机酸<sup>[10]</sup>,酸性物质能够改善油藏孔隙结构,利于原油在油藏中的流动。表面张力值都有不同程度的降低,而发酵液的黏度有一定程度的提高。表面张力的降低体现发酵液中有生物表面活性剂产生,生物表面活性剂具有乳化作用,从而提高洗油效率;而黏度的提高表明微生物生长过程中代谢生成一些大分子物质,这些物质往往能有一定程度的增加水相的黏度,既能提高波及体积,又能提高乳液的稳定性。为了综合体现生物表面活性剂和生物聚合物的综合驱油作用,可以用黏度和表面张力的比值,即比毛管数说明其驱油作用的优劣<sup>[11]</sup>,通过计算, DH8 的比毛管数为 0.0239 s/m,而 SL21 的比毛管数为 0.0332 s/m,比毛管数的值越大驱油性能越好。因此,菌 SL21 的驱油性能强于菌 DH8。

表 1 发酵液的物性参数

Table 1 Physical parameters of microbial fermentative liquid

菌株	pH 值	表面张力/ (mN·m <sup>-1</sup> )	黏度/ (mPa·s)	比毛管数/ (s·m <sup>-1</sup> )
空白	7.68	67.477	0.92	0.0136
DH8	7.31	55.322	1.32	0.0239
SL21	5.75	43.979	1.46	0.0332

## 2.2 微生物对原油的降黏能力分析

目前的研究表明,微生物可以通过生长代谢降解原油中的重质组分,同时产生表面活性剂乳化原油,从而改善原油流动性,提高原油采收率<sup>[12]</sup>。为了研究微生物对于原油的降黏能力,分别对乳化原油黏度和降解后原油的黏度进行测定,实验结果如表 2 所示。实验发现, DH8 和 SL21 发酵液与原油 1:1 混合形成稳定乳状液,测定乳状液黏度分别为 2.10 和 1.37 mPa·s,相对于原油黏度分别降低 79.41% 和 86.57%,这种降黏效果主要是由菌体代谢产物的作用,如生物表面活性剂可以降低油水界面张力,使油水形成 O/W 型乳状液<sup>[13]</sup>,因此,黏度大幅度降低;另一方面,微生物在生长过程中以原油为唯一碳源,具有降解原油的作用,从而使原油黏度降低, DH8 和 SL21 分别使原油黏度降低 19.02% 和 26.08%。综上所述,微生物对于原油的降黏作用是乳化和降解共同作用的结果,乳化作用大于降解作用, SL21 的乳化降解能力均强于 DH8。

表 2 微生物对原油的降黏作用

Table 2 Efficiency of microorganisms in reducing viscosity of crude oil

菌株	黏度/(mPa·s)		降黏率/%	
	乳化原油	降解原油	乳化作用	降解作用
空白	—	10.20	—	—
DH8	2.10	8.26	79.41	19.02
SL21	1.37	7.54	86.57	26.08

## 2.3 微生物对原油的降解能力分析

微生物在生长代谢过程中能够以原油为碳源,将长链烷烃降解为低碳链的烃类化合物,改变原油组分,从而实现降解原油,提高流动性的能力<sup>[14~16]</sup>。通过对原油和降解后的原油进行气相色谱分析,分析全烃组分变化。实验结果如图 2 所示。菌株的作用下全烃组分发生了明显变化,其中, DH8 降解后原油组分曲线与初始原油组分曲线有两个明显的交点 C<sub>15</sub> 和 C<sub>27</sub>,说明 DH8 主要降解 C<sub>13</sub>~C<sub>27</sub> 内烷烃,从而使该段烷烃组分含量下降;而 SL21 对原油的作用主要集中在 C<sub>19</sub>~C<sub>37</sub>,相比于 DH8 的作用范围更大,碳链更长; DH8 和 SL21 降解后原油,低碳烷烃含量的增加主要集中在 C<sub>13</sub> 之前,原油在未经处理之前 C<sub>13</sub> 之前烷烃含量占比 11.68%,而分别经 DH8 和 SL21 处理后,烷烃含量占比分别为 17.01% 和 22.68%,相比作用前分别增加了 5.33% 和 11.00%。综上所述, SL21 对原油的降解作用强于 DH8。

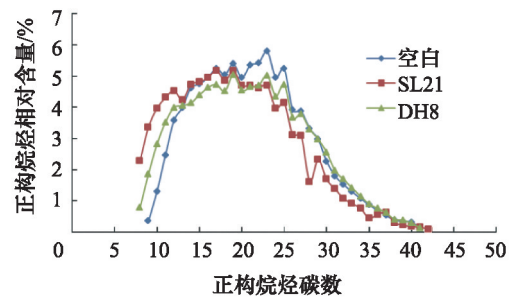


图 2 微生物作用前后原油中正构烷烃相对含量变化

Fig. 2 Variation of relative amount of n-alkane composition by bacteria degradation

## 2.4 物理模拟驱油性能评价

物理模拟驱油实验是评价菌株驱油效率的一种有效手段<sup>[17,18]</sup>。实验选用圆管填砂模型,实验涉及到的渗透率、含油饱和度等油藏参数的一致性较好。实验模型参数如表 3 所示, 3 岩心尺寸均为 2.5 cm×20 cm。K<sub>r</sub> 为氮气测定的渗透率, Φ 为孔隙度, S<sub>oi</sub> 为初始含油饱和度。

表 3 岩心基本参数

Table 3 Basic parameters of the model

岩心编号	K <sub>r</sub> /(10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> )	Φ/%	S <sub>oi</sub> /%
D-1	133	30.19	83.38
D-2	118	30.69	87.49
D-3	128	31.00	85.48

通过对比表 4 中的实验结果发现:空白对照岩心,累积提高采收率 0.85%,由于模型在 7 d 静止培养期,油水重新分布,从而使采收率有所提高,但是由于原油为稀油,水驱过程中,将大部分原油采出,残余油较少,油水分布作用对于采收率提高的作用有限;在注入 SL21 和 DH8 段塞过程中,由于段塞中含有稀释的微生物发酵液,使采收率均有所提高,但是提高幅度很小;经历 7 d 静止培养期之后, SL21 和 DH8 的累积提高采收率分别为 7.96% 和 6.53%, SL21 的最终采收率高于

DH8; 排除油水分布对于采收率的贡献, 计算求得 SL21 和 DH8 的驱油效率分别为 7.11% 和 5.50%, 两种菌株均具有良好的驱油效果, 其中外源菌株 SL21 显著高于内源菌株 DH8。

考虑到施工成本、微生物注入性和配伍性, 该实验结果可为现场施工方案的编制提供参考。

表 4 物理模拟驱油实验结果

Table 4 Results of oil displacement experiment

岩心编号	体系配方	注入量/PV	水驱/%	微生物段塞注入/%	后续水驱/%	累积提高采收率/%	微生物驱油效率/%
D-1	空白	—	48.22	—	49.07	0.85	—
D-2	3%SL21	0.5	49.91	50.85	57.87	7.96	7.11
D-3	3%DH8	0.5	49.23	51.35	55.58	6.35	5.50

### 3 结论

1) 内源菌株 DH8 和外源菌株 SL21 的发酵液 pH 值和表面张力值均有不同程度降低, 黏度值均有不同程度提高, 但菌株 SL21 的发酵液驱油能力强于菌株 DH8。

2) 微生物对于原油的降黏作用可以分为乳化作用和降解作用, 乳化降黏作用强于降解降黏作用, 外源菌株 SL21 降黏作用强于内源菌株 DH8 的降黏作用。

3) DH8 主要降解 C<sub>13</sub>~C<sub>27</sub> 内烷烃, SL21 主要降解 C<sub>19</sub>~C<sub>37</sub> 内烷烃, 但它们同样使 C<sub>13</sub> 之前的低碳烷烃含量增加。

4) 经物理模拟驱油实验获得外源菌株 SL21 的驱油效率为 7.11%, 内源菌株 DH8 的驱油效率为 5.5%。

### 参考文献 (References)

[1] 赵寿增. 微生物采油技术[J]. 油气采收率技术, 1996, 3(1): 14-22.  
Zhao Shouzeng. Microbial enhanced oil recovery (MEOR) technology[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 1996, 3(1): 14-22.

[2] Gullapalli I L, Bae J H, Hejl K, et al. Laboratory design and field implementation of microbial profile modification process[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2000, 3(1): 42-49.

[3] 高配科, 马挺, 赵玲侠, 等. 胜利油田沾 3 区块内源微生物激活剂的筛选, 优化及效果评价[J]. 化工学报, 2011, 62(7): 2005-2012.  
Gao Peike, Ma Ting, Zhao Lingxia, et al. Screening, optimization and evaluation of indigenous microorganism activation system in Zhan3 block, Shengli Oilfield[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2011, 62(7): 2005-2012.

[4] 谢昆, 夏文杰, 董汉平, 等. 内源微生物激活体系在多孔介质中的吸附规律研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(29): 7510-7514.  
Xie Kun, Xia Wenjie, Dong Hanping, et al. Adsorption mechanism of indigenous microbial activator in porous medium[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(29): 7510-7514.

[5] 郭英. 国内外源微生物驱矿场试验状况分析[J]. 科技导报, 2011, 29(22): 51-54.  
Guo Ying. Exogenous microbial enhanced water-flooding plot tests in China[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(22): 51-54.

[6] 高配科, 马挺, 刘如林. 油藏微生物的代谢特征和生态结构调控[J]. 微生物学报, 2011, 51(6): 711-717.  
Gao Peike, Ma Ting, Liu Rulin. Microbial metabolic characteristics and ecological controlling in petroleum reservoir[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2011, 51(6): 711-717.

[7] 雷光伦, 郭云尧, 郑家朋, 等. 高温微生物提高采收率实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(4): 15-16.  
Lei Guanglun, Guo Yunyao, Zheng Jiapeng, et al. Laboratory research of improving oil recovery by microbe at high temperature[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(4): 15-16.

[8] 乐建君, 陈星宏, 王蕊, 等. 敖古拉中高温油田微生物驱油可行性分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 20(34): 9158-9162.  
Le Jianjun, Chen Xinghong, Wang Rui, et al. Feasibility analysis of microbial enhanced oil recovery of Augulamid-high temperature oil field[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 20(34): 9158-9162.

[9] 张明露, 马挺, 李国强, 等. 一株耐热石油烃降解菌的细胞疏水性及乳化、润湿作用研究[J]. 微生物学通报, 2008, 35(9): 1348-1352.  
Zhang Minglu, Ma Ting, Li Guoqiang, et al. Cell-surface hydrophobicity, emulsification and wetting property of a high temperature hydrocarbon-degrading strain[J]. Microbiology China, 2008, 35(9): 1348-1352.

[10] 包木太, 袁书文, 宋智勇, 等. 不同碳源激活剂对胜利油田中一区油藏内源菌激活效果评价[J]. 化工学报, 2011, 62(3): 786-791.  
Bao Mutai, Yuan Shuwen, Song Zhiyong, et al. Evaluation on effects of different carbon source on activating indigenous bacteria in Zhongyi block of Shengli Oilfield[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2011, 62(3): 786-791.

[11] 吴超, 黄立信, 俞理, 等. 本源微生物激活体系筛选与优化方法研究[J]. 石油天然气学报, 2008, 29(6): 103-107.  
Wu Chao, Huang Lixin, Yu Li, et al. Selection of indigenous microorganism activation system and its optimization[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 29(6): 103-107.

[12] 郑承纲, 俞理, 吴庆红, 等. 一株烃降解菌 Rhodococcus ruber Z25 研究[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2009, 26(3): 234-239.  
Zheng Chenggang, Yu Li, Wu Qinghong, et al. Rhodococcus ruber Z25, a hydrocarbon-degradating strain[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2009, 26(3): 234-239.

[13] 齐义彬, 曹美娜, 黄立信, 等. 嗜热解烃菌的组合降黏降解机理[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(24): 18-22.  
Qi Yibin, Cao Meina, Huang Lixin, et al. Mechanism of crude oil viscosity reduction and degradation by the thermophilic hydrocarbon-degrading bacteria combination[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(24): 18-22.

[14] 夏文杰, 董汉平, 俞理, 等. 铜绿假单胞菌 WJ-1 降解原油特性[J]. 化工学报, 2011, 62(7): 2013-2019.  
Xia Wenjie, Dong Hanping, Yu Li, et al. Oil degradation characteristics of Pseudomonas aeruginosa WJ-1[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2011, 62(7): 2013-2019.

[15] 高配科, 王燕森, 张宏祚, 等. 两株嗜热解烃菌对原油的降黏机制[J]. 化工学报, 2013, 64(11): 4240-4245.  
Gao Peike, Wang Yansen, Zhang Hongzuo, et al. Mechanism of crude oil viscosity reduction by two thermophilic hydrocarbon-degrading bacteria[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2013, 64(11): 4240-4245.

[16] 齐义彬, 王大威, 吴萌萌, 等. 胶质降解和生物乳化在稠油降黏中的作用[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 670-675.  
Qi Yibin, Wang Dawei, Wu Mengmeng, et al. Effect of resin degradation and biological emulsification on the viscosity break of heavy oils[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 670-675.

[17] 刘涛, 宋智勇, 曹功泽, 等. 中一区 Ng3 区块微生物驱油物模实验研究[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(2): 335-341.  
Liu Tao, Song Zhiyong, Cao Gongze, et al. Laboratory study on enhancing recovery by microbial oil displacement in laboratory study on enhancing recovery by microbial oil displacement in Ng3[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2013, 19(2): 335-341.

[18] 于登飞, 俞理, 黄立信, 等. 不同培养时间微生物驱油效率研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(23): 5735-5738.  
Yu Dengfei, Yu Li, Huang Lixin, et al. Experimental study of microbial enhanced oil recovery in different incubation time[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(23): 5735-5738.

(责任编辑 刘志远)