

# 微生物提高原油采收率研究进展

杨双春, 韩颖, 王世栋, 潘一\*

(辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁抚顺 113001)

**摘要:**介绍了近年来研究较多的提高驱油率的6类菌种,分别是烃降解菌、产表面活性剂菌、发酵菌、产甲烷菌、还原菌和它们可以应用于微生物驱油的细菌。综述了6种驱油微生物的驱油机理、生理特征、代谢产物及应用现状。

**关键词:**微生物驱油; 表面活性剂; 细菌; 采收率

**中图分类号:** TE355

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2016)02-0037-05

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.02.010

## Research progress of microbial enhanced oil recovery

YANG Shuang-chun, HAN Ying, WANG Shi-dong, PAN Yi\*

(College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

**Abstract:** Six microbial strains for enhanced oil recovery have been introduced, including hydrocarbon degradation bacteria, production surfactant bacteria, fermentation bacteria, methane-producing bacteria, sulfate-reducing bacteria and other bacteria that can be used in the microbial flooding. The oil displacement mechanism, physiological characteristics, metabolites and application status of six microbial strains are also summarized.

**Key words:** microbial oil displacement; surfactant; microbe; EOR

自1926年美国学者 Beckmann 最先提出微生物采油技术后,俄罗斯、荷兰、罗马尼亚、日本等国家近年来都进行了微生物采油的相关研究<sup>[1-2]</sup>,其中日本已经进行了筛选微生物的现场试验。我国自1990年开始在新疆、大庆、扶余、大港、冀东、辽河、江汉等油田进行了微生物驱油的应用性试验<sup>[3]</sup>。总的来说,该技术主要利用生物化学交互作用控制石油流动度、扩大波及效率,从而提高驱油效果。目前国内外提出的微生物驱油机理<sup>[3-4]</sup>主要有:①通过改善水驱的洗油效率及波及率提高原油采收率;②微生物可以通过产生酸、气体、生物表面活性剂、生物聚合物及有机溶剂等改善原油性质,以提高原油的采收率;③由于产生胞外多糖形成生物膜,可渗流到油藏深部,增强剩余油流动性;④部分微生物可以产聚合物生物胶,该物质补偿地层压力,利于原油的开采。本文中综述了烃降解菌、产甲烷菌等微生物的生理特点、驱油原理、油藏适应性、应用现状等相关内容,以期为其他学者提供参考。

## 1 烃降解菌

烃降解菌是一类能够利用烃类作为碳源和能源物质进行生长代谢的微生物,大多数烃氧化菌属于

好氧菌种,少数烃氧化菌为兼性厌氧菌种。烃降解菌的代谢作用可以产生烃类降解酶,可以将烃类的长碳链烃转换为短碳链烃,从而降低原油黏度,改善原油的流动性能,部分菌种还可产生表面活性剂和乳化剂。烃降解菌若受油藏压力驱动会有富集现象,故可用于油气藏勘探开发。何新等<sup>[5]</sup>从胜利油田中筛选出一株能在60℃高温条件下以原油为唯一碳源的烃类降解菌——芽孢杆菌D-1。在pH=6.0,培养温度60℃,盐度为0.2%时,烃降解率可提升为64.3%,该菌种对盐离子具有耐受性。该菌种培养10d后,采用段塞注入的方式进行了物理模拟驱油实验,结果表明,采收率可提高5.6%。谢英等<sup>[6]</sup>从塔里木油田污染土壤中分离得到一株高效烃降解耐温菌——马红球菌BIT-BS001。在温度40~55℃,pH=7.0时,对原油的烃降解率高达62%;室内驱油实验显示,水驱效率67.2%,发酵液驱油效率74.0%。作者建议该菌种发酵液可以作为注水井调驱和油井单井吞吐工艺的前置液,将普通水驱中难动的原油从狭小的孔隙或喉道中剥离出来,从而提高采收率。梁勇等<sup>[7]</sup>从辽河油田原油中分离出由3种菌株组成的微生物混合菌,其中菌株2<sup>#</sup>具有较强的抗碱能力,可以适用于碱性油藏。该

收稿日期:2015-07-21;修回日期:2015-12-09

基金项目:辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划(LJQ2015063)

作者简介:杨双春(1976-),女,博士,副教授,从事油气田开发研究,024-56868120;潘一(1976-),男,博士,副教授,从事油气井工程和油气田开发研究,通讯联系人,024-56865313,panyi\_bj@126.com。

菌株对烷烃的降解能力依次为短链正构烷烃 > 长链正构烷烃 > 异构烷烃, 28 d 后, 正构和异构组分完全降解, 说明该混合菌种具有良好的生物降解能力。对渗透率为 0.3D 的岩心的室内模拟微生物驱油实验表明, 原油采收率能提高 15.9%。但作者发现辽河油田现场水配置的菌液的驱油采收率较低, 具体机理有待研究。Hemalatha<sup>[8]</sup> 从尼日利亚油田污染土壤中分离得到 2 种石油烃降解菌属—假单胞菌属和黄杆菌属。其中在 pH = 6 ~ 7, 温度小于 15℃ 时, 假单胞菌属使石油降解率提升了 40%; 黄杆菌属烃降解率提高了 45%。另外, 还发现 2 种菌属均具有高效耐药性和抗重金属性。作者建议这 2 类菌种可运用于探井采油, 具有良好的发展前景。Hassanshahian 等<sup>[9]</sup> 针对石油产品泄露的问题, 进行微生物驱油研究。结果表明, 分离出 8 种烃降解菌菌群—红球菌属、铜绿假单胞菌属等, 它们以十六烷为唯一碳源, 碳源最佳质量分数 2.5%, 7 d 后都能降解十六烷 50% 以上, 可见该 8 种烃降解菌群都具有良好的烃降解效果。张洁等<sup>[10]</sup> 研究了从长庆、延庆油田油泥中分离出的高效石油烃氧化菌 PDA2 (红球菌属) 和 PDB3 (假单胞菌属) 降解正十六烷的特性。PDA2 在温度为 30℃, 初始 pH = 7, 最高可降解 89.4% 正十六烷。PDB3 在最适温度 30℃, pH = 7, 正十六烷降解度最高可达到 98.5%。PDB3 具有耐受性。但 PDA2 在产生表面活性剂的同时菌种表面疏水性未变化, 具体机理有待研究。张莹等<sup>[11]</sup> 对来自四川省普光气田和湖北省江汉油田的土壤样品中

的丁烷氧化菌进行丁烷选择培养法探讨烃氧化菌数量等差异。该菌以丁醇为唯一碳源, 在 30℃ 下的固体培养基分离进行纯培养。纯化丁烷氧化菌的 16S rRNA 经 PCR 扩增实验后表明, 相关种属细菌相似性均接近 100%。可见该菌对两地区的地理环境具有较好的适应能力, 可应用于微生物勘探。Hassanshahian 等<sup>[12]</sup> 通过研究烃氧化菌的疏水化过程, 发现有效的氧化烃类细菌固定化可为微生物提供营养物质。该菌群对正十六烷氧化效率为 51%, 生长 10 d 就能增加油层疏水性和流动性, 扩大扫油面积, 增加驱油效率。

烃降解菌能够有效降解长碳链烃, 降低原油黏度, 增加原油流动性, 进而提高原油采收率。该菌自发合成的表面活性物质具有吸附滞留量小、稳定性高、部分菌种具有耐盐及抗污染等优点, 能够提高原油采收率主要是由于菌种使烃类乳化, 增加水相和油包水乳液液滴接触面积, 降低张力, 改变岩石表面憎水性, 扩大油层孔隙, 但培养优势菌种的过程复杂, 有待研发。

## 2 产表面活性剂菌

产表面活性剂菌是指一类可以产生表面活性剂的微生物。于晓明<sup>[13]</sup> 从油田污染土壤中获得产表面活性剂能力较强的菌株 BS8-17, 并鉴定该菌株为枯草芽孢杆菌。该菌种以原油为唯一碳源, 在 37℃, 摇床振荡 96 h 后经过离心、沉淀、萃取、蒸发, 最终带电性测定表明, 该菌种的产物是脂肽类生物

(上接第 36 页)

[15] Li Yanfang, Han Juan, Yan Yongsheng, *et al.* Simultaneous extraction and determination of sulfadiazine and sulfamethoxazole in water samples and aquaculture products using [Bmim] BF<sub>4</sub> / (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub> C<sub>6</sub> H<sub>5</sub> O<sub>7</sub> aqueous two-phase system coupled with HPLC [J]. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 2010, 96: 150 - 157.

[16] Han Juan, Wang Yun, Yu Cui-lan, *et al.* Extraction and determination of chloramphenicol in feed water, milk, and honey samples using an ionic liquid/sodium citrate aqueous two-phase system coupled with high-performance liquid chromatography [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, 399 (3): 1295 - 1304.

[17] Tan Zhijian, Li Fenfang, Xu Xuelei. Isolation and purification of alio anthraquinones based on an ionic liquid/salt aqueous two-phase system [J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 98: 150 - 157.

[18] 张中杰, 卢昶雨, 黄威, 等. 醇与离子液体二元双水相体系萃取四环素[J]. *应用化工*, 2014, 43(1): 37 - 41.

[19] 关卫省, 黎文娟, 韩娟. 醇与离子液体二元双水相体系萃取盐酸多西环素[J]. *分析测试学报*, 2012, 31(5): 600 - 604.

[20] Xie X, Wang Y, Han J, *et al.* Extraction mechanism of sulfamethoxazole in water samples using aqueous two-phase systems of poly(propylene glycol) and salt [J]. *Anal Chim Acta*, 2011, 687(1): 61 - 66.

[21] Jorge F B Pereira, Filipa Vicente, Valéria C Santos-Ebinuma. Extraction of tetracycline from fermentation broth using aqueous two-phase systems composed of polyethylene glycol and cholinium-based salts [J]. *Process Biochemistry*, 2013, 48(4): 716 - 722.

[22] Jorge F B Pereira, Valéria C Santos, Hans-Olof Johansson, *et al.* A stable liquid-liquid extraction system for clavulanic acid using polymer-based aqueous two-phase systems [J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 98: 441 - 450.

[23] Tan Zhijian, Wang Chaoyun, Yi Yongjian, *et al.* Extraction and purification of chlorogenic acid from ramie (*Boehmeria nivea* L. Gaud) leaf using an ethanol/salt aqueous two-phase system [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 132: 396 - 400.

[24] 关卫省, 邓江华, 韩娟. 醇和小分子有机物二元双水相体系萃取盐酸多西环素[J]. *应用化工*, 2012, 41(6): 995 - 999.

[25] 关卫省, 邓江华, 韩娟. (乙醇 + 丙酮) - 硫酸铵二元双水相分离萃取盐酸四环素[J]. *环境化学*, 2013, 32(3): 513 - 517. ■

表面活性剂。该表面活性剂具有较好的耐受性,因此 BS8-17 的乳化稳定性良好,可增大排油圈面积,提高采收率。王大威<sup>[14]</sup>从大庆油田经复筛和分析鉴定得到一种枯草芽孢杆菌 ZW-3,该菌种以十六烷为最佳碳源,在温度 50℃, pH = 4 ~ 9 油层环境中,能够产生脂肽类的生物表面活性剂。向该菌种再加入  $\alpha$ -endosulfan 和  $\beta$ -endosulfan 溶液缓冲剂后,可提高生物降解速率达 35% 左右,进而降低油层表面张力,提高原油采收率。马飞等<sup>[15]</sup>研究了产生物表面活性剂降解菌的石油降解能力,结果表明,糖脂类的生物表面活性剂修复污染土壤时能提高烃降解能力 2 ~ 3 倍,原油的降解效率达到 57%。作者还提出生物表面活性剂有分子结构多样性和特殊性的特点,目前的生物表面活性剂修复研究尚处于初级阶段。Pornsunthorntaweew 等<sup>[16]</sup>从泰国石油污染土壤中提取出 2 株产表面活性剂的菌种—枯草芽孢杆菌 PT2 和铜绿假单胞杆菌 SP4。2 菌种的表面活性剂都以棕榈油为唯一碳源,在最佳温度 37℃ 时,分别降低油层表面张力 26.4、28.3 mN/m; 临界胶束浓度分别为 25、120 mg/L,油层表面张力的降低有助于提高原油采收率。胶束浓度高有利于油层疏水,使驱油效果更明显。因此枯草芽孢杆菌 PT2 更适合驱油。Zou 等<sup>[17]</sup>发现不动杆菌具有产生生物表面活性剂的特性,可应用于强化采油。研究表明,该不动杆菌产表面活性剂的有效范围在 pH = 4 ~ 9, 盐度低于 8%; 最稳定范围在 pH = 6 ~ 7, 盐度低于 4%。该菌种可降低油层表面张力 15 mN/m; 降低水层表面张 35 mN/m。Chandankere 等<sup>[18]</sup>从东北石油水库分离出可产生表面活性剂的菌种—芽孢杆菌。该菌种以原油为唯一碳源,在温度为 35℃, 2% 的盐介质中,表面活性剂的产量为 1.8 g/L, 乳化性高达 78%。油层表面张力能下降 28 mN/m, 该菌种产的表面活性剂有助于提高原油采收率。

生物表面活性剂具有低毒、无污染、廉价等优点。产表面活性剂菌产生的生物表面活性剂可以降低油水界面张力,改变岩石的润湿性,进而提高原油采收率,如可大大提高 ASP 三元复合驱油效果。产生物表面活性剂菌也可应用于油田土壤污染的治理,但是目前仍处于起步阶段,适用范围局限于室内模拟,有待进一步研究。

### 3 产甲烷菌

产甲烷菌是极端的厌氧古菌,其代谢产物主要

为甲烷气体。主要包括 4 个种属,甲烷杆菌属、甲烷八叠球菌属、甲烷球菌属和甲烷螺菌属。李凯平<sup>[19]</sup>研究了不同底物培养出的产甲烷菌体系。实验表明,在 22℃ 下,以纽卡斯尔戴恩河底沉积物培养的菌群结构由 86% 的氢营养型产甲烷菌和 13% 的乙酸氢营养型产甲烷菌等组成;在 37℃ 下以 C<sub>15</sub> ~ C<sub>20</sub> 混合烷烃接种胜利油田产出液,经 274 d 培养的菌群由 32% 的氢营养产甲烷菌和 68% 的甲基化合物组成;作者提出产甲烷体系随底物、温度变化的特点适用油藏残余油气化的应用。胥元刚等<sup>[20]</sup>进行克拉玛依油田采集的产甲烷菌富集产物接种原油的实验,结果表明,饱和烃的质量分数由 70.14% 下降为 63.91%; 芳烃的质量分数由 15.10% 下降为 18.04%; 胶质基本无变化; 沥青由 2.68% 上升到 6.42%。原萘系类化合物的质量分数由 67.20% 降为 66.18%; 菲的质量分数由 20.15% 上升至 21.00%; 芴的质量分数由 3.8% 上升至 4.02%, 表明产甲烷菌对石油降解效果更明显,且富集产物对原油作用表现出选择性。金锐等<sup>[21]</sup>从产甲烷原油厌氧物中获得 4 株产甲烷菌,甲烷囊菌属、嗜热甲烷囊菌属及 2 株新菌。结果表明,最适温度 50℃ 下,以原油为唯一碳源,培养 60 d, 甲烷体积分数 26.115%, 二氧化碳体积分数 24.405%; 培养 240 d, 甲烷体积分数 72.731%, 二氧化碳体积分数 1.443%。可见产甲烷菌将二氧化碳转化为甲烷,从而将难开采的油藏变为气藏,进而提高采收率。Ivanov 等<sup>[22]</sup>在罗马什金油田进行了内源微生物产甲烷菌接种原油实验。实验结果表明,盐度适中,该菌种代谢产物由甲烷、表面活性剂以及有机酸组成,原油的采收率可提高 32.9%, 原油总回收量高达 41.08 t。

产甲烷菌在不同底物、不同温度下培养的产物结构有差异,对原油具有选择性作用,部分该菌种可产生甲烷、表面活性剂等代谢产物提高采收率。还可以利用产甲烷菌进行深度调剖。甲烷菌的分离和培养需要在特殊环境下进行,过程烦琐,但“余油转甲烷有效化”仍是今后一段时间研究的重点,期待该技术的发展能缓解能源短缺问题。

### 4 厌氧发酵菌

厌氧发酵菌是微生物采油技术中非常重要的一类微生物,由于油藏环境属于无氧环境,因而能够在无氧状况下进行发酵代谢的微生物往往在油藏条件

下有更好的代谢活性。胥元刚等<sup>[20]</sup>从克拉玛依油田提取分离发酵菌,通过培养基培养该菌种后进行降解石油的室内模拟实验,结果表明,经富集后发酵菌作用的原油中芳烃的质量分数由 15.10% 上升至 16.00%; 饱和烃的质量分数由 70.14% 到 70.67%; 沥青质量分数下降最为明显,由 2.68% 下降至 0.67%。其中针对芳烃化合物而言,在多环芳烃未发生降解的条件下,杂环芳烃的质量分数也有所下降。可见,发酵菌富集培养物的石油降解作用明显。郑承纲<sup>[23]</sup>进行了厌氧发酵产气型微生物驱采油的室内模拟实验。研究表明, *Rhodococcus ruber* 2-25 菌株(厌氧发酵菌)以葡萄糖为唯一碳源,在 pH = 4 左右,温度达到 76.67℃ 时,对原油降解率可达到 76.91%。同时, *Rhodococcus ruber* 2-25 还具有产表面活性剂的能力,可通过降低石油黏度,改善水驱波及效率,增加油相渗透率。She 等<sup>[24]</sup>从大庆油田聚合驱中分离提取出发酵菌属短棒杆菌,并进行了聚合物驱实验。该菌种以糖类为唯一碳源和氮源,在温度为 45℃ 时,盐度范围在 10% 以下时,进行驱油发酵液接种 5% 的原油,结果表明,该菌种可使原油降解率达到 50% 之上,最大可达到 84%,研究表明,该菌种与其他菌种以 1:1 混合时,降解率可提高到 90%。Grassia 等<sup>[25]</sup>对来自油田生产水中的多形性杆状、包杆状以及古生菌发酵性微生物进行了不同储层深度下的接种石油实验。该种发酵菌种具有较好的耐温性。油田储层深度由 396 m 逐步增加至 3 048 m,温度为 21 ~ 130℃,盐度为 2.8 ~ 128 g/L, pH = 6.0 ~ 8.5 时,测出发酵菌种可提升原油降解率为 47%,且能减少采油过程中污染程度。

由于发酵菌具有油藏适应性强、繁殖速度快等优点,经富集培养可运用于需要降解石油的工艺中,其产气效率的提高和与其他菌种的协同作用是今后研究的重点。

## 5 硝酸盐还原菌

硝酸盐还原菌可以通过在油藏中的生化作用,间接提高原油的采收率。马莎莎等<sup>[26]</sup>从克拉玛依油田油井口采集接近于硝酸盐还原菌和硫酸盐还原菌的样品。二者经富集培养后分别接种 5% 的原油,在 25℃ 下培养 120 d;提取遗传物质对比表明,已有 16SrDNA 序列同源性 > 97%。可见二者产物存在差异,但它们都具有石油烃降解能力。驱油用水解聚丙烯酰胺溶液的黏度的变化会影响石油降解

率,赵波等<sup>[27]</sup>通过研究硫酸盐还原菌(SBR)的理化性质,提出了用硝酸盐还原菌(NBR)抑制硫酸盐还原菌生长繁殖的生物抑菌法。在实验中,注入亚硝酸盐 100 mg/L 时,硫离子浓度低至 2 mg/L, NBR 对 SBR 作用 12 d 后抑制作用可达到 90%。该方法具有增加原油流动性,提高采油率等优点,但渗透率会下降 20%,具体机理有待研究。Lin 等<sup>[28]</sup>研究从胜利油田采集的微生物样本,高温脱硫弧菌属的硫酸盐还原菌群,其中嗜盐菌种含量为 37%,嗜热菌种占 48%,其余菌种在 15% 左右。在油藏温度 91℃,盐度 3 000 ~ 20 000 mg/L,反硝化假单胞菌可有效地抑制硫酸盐还原菌的生长繁殖。

首先硝酸盐还原菌可以通过厌氧呼吸提高某些采油微生物的代谢活性,如加入硝酸盐能提高芽孢杆菌、地芽孢杆菌等种属微生物在兼性厌氧条件下的代谢活性,从而间接提高原油的采收率,其次硝酸盐还原菌可以竞争性抑制硫酸盐还原菌的代谢活性,从而减少硫酸盐还原菌的有害作用。

## 6 其他

由于微生物的多样性以及微生物驱油机理较为复杂,除了研究较多的各类驱油微生物,人们也发现了一些特殊的机理可以用于微生物驱油,同时可以利用基因工程改造的方法为微生物驱油提供新型的微生物种类。Sun 等<sup>[29]</sup>利用可生产生物聚合物的阴沟肠杆菌菌株和嗜热的土芽孢杆菌菌株构建了 1 株产胞外多糖生物工程菌 GW3-3.0。在 54℃ 时,该菌在糖浆培养基中胞外多糖产量可以达到 8.83 g/L。同时该工程菌具有稳定的遗传性状。Sun 等<sup>[30]</sup>利用最佳温度为 30℃ 可以产生不溶于水的生物聚合物的阴沟肠杆菌菌株 JD 和嗜热的土芽孢杆菌属菌株,通过原生质体融合合成了可以在高温下产生胞外多糖的融合体 ZR3。该融合可以在 45℃ 时产生胞外复合物,其最佳生长温度为 35℃。在 pH 7.0 ~ 9.0 时,融合体 ZR3 的胞外多糖产量为 7.5 g/L。在 40℃ 时的砂包试验中证明了该融合体在微生物提高采收率的可行性。该研究也为传统的微生物采油揭示了一个新的方向。

## 7 结论

国内各油田已开展微生物采油先导性试验约 2 000 井次,其中以注入激活剂的菌群实验效果最佳。美国、巴西等国已进入推广微生物驱油的应用

阶段。目前,该技术已成为老油田提高采收率的重要方法之一。笔者建议今后在以下几个方面进行重点研究。

(1) 根据油田地质特性和微生物特性的不同,研发不同的微生物采油装置。

(2) 利用基因工程开发可用于驱油的新型菌种。

(3) 深入研究油藏微生物将余油转化为甲烷的作用机理。

### 参考文献

- [1] 刘兆江,彭伟,王东生. 微生物驱油技术研究与发展[J]. 科技创新导报,2010,23(28):53-53.
- [2] 刘骊川. 微生物驱油技术的研究进展和应用前景[J]. 中外能源,2009,14(3):41-44.
- [3] Le J, Wu X, Wang R, *et al.* Progress in pilot testing of microbial-enhanced oil recovery in the Daqing oilfield of north China[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 97(7): 188-194.
- [4] 孙举. 微生物驱油技术应用研究[J]. 科技创新导报,2013,26(16):93.
- [5] 何新,何翠香,徐登霆,等. 一株高温解烃菌的筛选及性能评价[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2010,25(6):74-75.
- [6] 谢英,付步飞,王平,等. 马红球菌的高温烃降解特性及其驱油效果[J]. 新疆石油地质,2012,33(6):716-719.
- [7] 梁勇,黑华丽,田春雨,等. 高效原油降解菌的生物降解作用与室内模拟岩心驱油研究[J]. 石油地质与工程,2010,24(2):125-129.
- [8] Hemalatha S. Characterization of aromatic hydrocarbon degrading bacteria from petroleum contaminated sites[J]. Journal of Environmental Protection, 2011, 2(3): 243-254
- [9] Hassanshahian M, Ahmadinejad M, Tebyanian H, *et al.* Isolation and characterization of alkane degrading bacteria from petroleum reservoir waste water in Iran (Kerman and Tehran provenances) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 73(1): 300-305.
- [10] 张洁,王卫卫,郭欣,等. 两株高效石油烃氧化菌的正十六烷降解特性[J]. 西北大学学报:自然科学版,2013,43(3):404-410.
- [11] 张莹,李宝珍,杨金水,等. 油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究[J]. 环境科学,2012,33(1):300-304.
- [12] Hassanshahian M, Cappello S. Isolation and characterization of crude-oil-degrading bacteria from the Persian Gulf and the Caspian Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(1): 7-12.
- [13] 于晓明. 产生物表面活性剂菌株的筛选[D]. 济南:山东轻工业学院,2012:21-25.
- [14] 王大威. 高产脂肽类生物表面活性剂菌株及其驱油机理研究[D]. 大庆:大庆石油学院,2009:68-77.
- [15] 马飞,潘科,陶文,等. 一株产表面活性剂的高效烃降解菌的筛选[J]. 广东石油化工学院学报,2012,22(1):23-25.
- [16] Pomsunthornatwee O, Artaweeporn N, Paisanjit S, *et al.* Isolation and comparison of biosurfactants produced by *Bacillus subtilis* PT2 and *Pseudomonas aeruginosa* SP4 for microbial surfactant-enhanced oil recovery [J]. Biochemical Engineering Journal, 2008, 42(2): 172-179.
- [17] Zou C, Wang M, Xing Y, *et al.* Characterization and optimization of biosurfactants produced by *Acinetobacter baylyi* ZJ2 isolated from crude oil-contaminated soil sample towards microbial enhanced oil recovery applications [J]. Biochemical Engineering Journal, 2014, 90(9): 49-58.
- [18] Chandankere R, Yao J, Choi M M F, *et al.* An efficient biosurfactant-producing and crude-oil emulsifying bacterium *Bacillus methylotrophicus* USTBa isolated from petroleum reservoir [J]. Biochemical Engineering Journal, 2013, 74(9): 46-53.
- [19] 李凯平. 长链烷烃厌氧降解产甲烷体系的菌群组成及变化[D]. 上海:华东理工大学,2012.
- [20] 胥元刚,何延龙,张凡,等. 厌氧微生物对新疆中中区稠油的降解特性[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2012,27(3):68-71.
- [21] 金锐,任南琪,郭婉茜,等. 利用微生物降解原油产甲烷气能力和群落构成研究[J]. 科技风,2013,(18):54-59.
- [22] Ivanov M V, Belyaev S S, Borzenkov I A, *et al.* Additional oil production during field trials in Russia [J]. Developments in Petroleum Science, 1993, 39(7): 373-381.
- [23] 郑承纲. 微生物提高采收率技术研究[D]. 安徽:中国科学院研究生院渗流流体力学研究所,2010:49-69.
- [24] She Y H, Zhang F, Xia J J, *et al.* Investigation of biosurfactant-producing indigenous microorganisms that enhance residue oil recovery in an oil reservoir after polymer flooding [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2011, 163(2): 223-234.
- [25] Grassia G S, McLean K M, Glénat P, *et al.* A systematic survey for thermophilic fermentative bacteria and archaea in high temperature petroleum reservoirs [J]. Fems Microbiology Ecology, 1996, 21(1): 47-58.
- [26] 马莎莎,张凡,舒福昌,等. 新疆低温稠油油藏厌氧硝酸盐还原菌与硫酸盐还原菌富集产物菌群分析[J]. 化学与生物工程, 2011, 28(4): 32-35.
- [27] 赵波,贺承祖,李冬菊,等. 硫酸盐还原菌的微生物防治[J]. 科技导报,2012,30(23):74-79.
- [28] Lin J Z, Hao B, Cao G Z, *et al.* A study on the microbial community structure in oil reservoirs developed by water flooding [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 122(10): 354-359.
- [29] Sun S S, Zhang Zhongzhi, Luo Yijing, *et al.* Exopolysaccharide production by a genetically engineered *Enterobacter cloacae* strain for microbial enhanced oil recovery [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10): 6153-6158
- [30] Sun S S, Luo Y J, Cao S Y, *et al.* Construction and evaluation of an exopolysaccharide-producing engineered bacterial strain by protoplast fusion for microbial enhanced oil recovery [J]. Bioresource Technology, 2013, 144(7): 44-49. ■