

微生物产表面活性剂提高原油采收率研究进展

丁明山^{1,2}, 张本华³, 林军章^{1,2}, 白海涛⁴, 陈子慧^{1,2}, 王静^{1,2}, 汪卫东^{*1,2}

1 中国石化微生物采油重点实验室, 山东 东营 257000

2 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 石油工程技术研究院, 山东 东营 257000

3 中国石油化工股份有限公司, 山东 东营 257001

4 中国石油化工股份有限公司 孤东采油厂, 山东 东营 257237

丁明山, 张本华, 林军章, 白海涛, 陈子慧, 王静, 汪卫东. 微生物产表面活性剂提高原油采收率研究进展[J]. 微生物学通报, 2025, 52(3): 905-916.

DING Mingshan, ZHANG Benhua, LIN Junzhang, BAI Haitao, CHEN Zihui, WANG Jing, WANG Weidong. Research advances of microbial surfactants in enhanced oil recovery[J]. Microbiology China, 2025, 52(3): 905-916.

摘要: 由微生物代谢产生的生物表面活性剂类型多、功能丰富, 在提高采收率方面展现了广阔的应用前景。本文综述了鼠李糖脂、槐糖脂和脂肽等采油用生物表面活性剂的产率、耐温抗盐性能、临界胶束浓度、胶束直径、吸附能力、润湿性和驱油性能, 以及矿场应用情况。从采油用生物表面活性剂的应用成本、应用场景和驱油机理等 3 个方面分析了面临的挑战, 并提出下一步要解决的关键问题和发展方向。

关键词: 提高采收率; 生物表面活性剂; 驱油性能; 矿场试验

Research advances of microbial surfactants in enhanced oil recovery

DING Mingshan^{1,2}, ZHANG Benhua³, LIN Junzhang^{1,2}, BAI Haitao⁴, CHEN Zihui^{1,2}, WANG Jing^{1,2}, WANG Weidong^{*1,2}

1 Key Laboratory of Microbial Enhanced Oil Recovery, SINOPEC, Dongying 257000, Shandong, China

2 Research Institute of Petroleum Engineering and Technology, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, Shandong, China

3 SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying 257001, Shandong, China

4 Gudong Oil Production Plant, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying 257237, Shandong, China

Abstract: Microbial surfactants (biosurfactants) are diverse and have rich functions, demonstrating broad application prospects in enhanced oil recovery. This article provides an

资助项目: 国家重点研发计划(2022YFC2105200)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFC2105200).

*Corresponding author. E-mail: wangweidong168.slyt@sinopec.com

Received: 2024-06-16; Accepted: 2024-12-04; Published online: 2025-01-02

overview of the yields, temperature and salt tolerance, critical micelle concentrations, micelle diameters, adsorption capacity, wettability, oil displacement performance, and field applications of oil-displacing biosurfactants such as rhamnolipid, sophorolipid, and lipopeptides. In addition, this article analyzes the challenges in application costs, application scenarios, and oil displacement mechanisms, and proposes the key problems to be addressed and future development directions.

Keywords: enhanced oil recovery; biosurfactants; oil displacement; field test

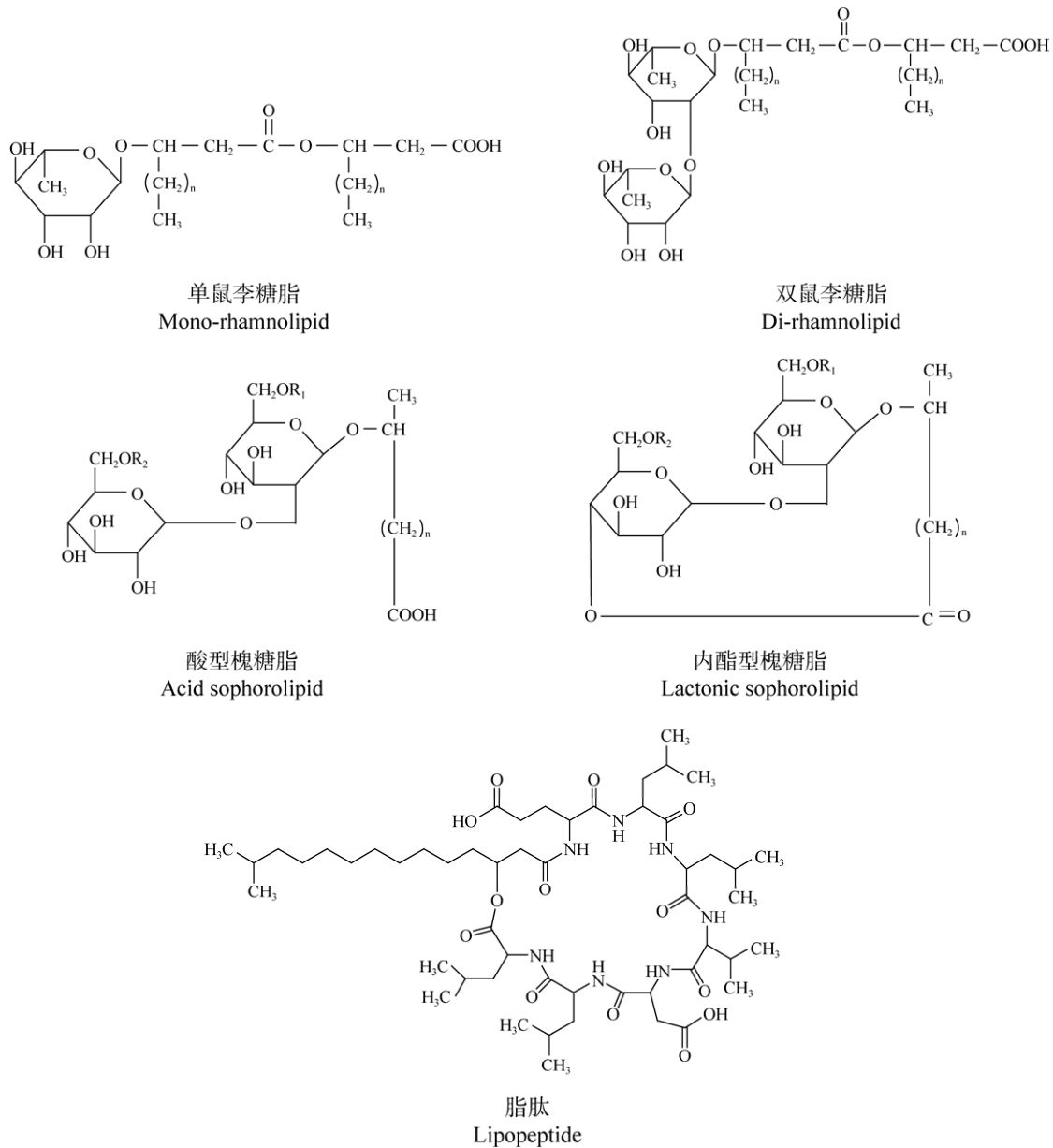
经过数十年的注水开发,我国东部的胜利、大庆、大港等老油田均已进入特高含水开发阶段,综合含水量超过 90%^[1],而采出程度不到 40%,亟须攻关进一步提高采收率技术。以石油磺酸盐和聚丙烯酰胺等为主剂的化学驱是目前最主要的提高采收率技术,其中 2022 年大庆油田化学驱产量占其总产量 37.4% (<https://m.gmw.cn/baijia/2022-12/21/1303230983.html>),胜利油田化学驱产量占其总产量的 11% (http://www.dongying.gov.cn/art/2022/10/21/art_38796_10359290.html),为我国原油稳产增产提供了强有力的技术支撑。随着化学驱对 I、II 类油藏的全覆盖,新的资源接替阵地正逐渐向更高温、高矿化度的 III、IV 类油藏转移,而这类水驱油藏的地质储量超过 10×10^8 t^[2]。传统的化学驱油剂类型单一、适应性差,在 III、IV 类油藏应用面临效能低的挑战^[3],亟须开发适应这类严苛油藏条件的驱油剂产品。

化学驱阵地的变化对驱油剂的性能提出新的要求,而能源结构和环保政策对驱油剂的加工制造提出了新的挑战。一方面,传统驱油剂等油田化学品以石油为原料合成获得,制造过程伴随着高耗能、高排放等问题;另一方面,碳达峰、碳中和事关国计民生,变革化工制造模式、建立先进的生物制造技术,对于我国走新型工业化道路,实现经济社会可持续发展具有重要意义^[4]。因此,基于生物制造的低成本绿色驱油剂开发,是进一步提高化学驱生命力

和竞争力的重要手段。生物制造是利用微生物及廉价可再生农副产品进行加工和制造的绿色生产方式^[5],其在油田提高采收率方面涉及的产品类型主要包括生物聚合物、生物表面活性剂和生物酶等^[6-7]。其中,生物表面活性剂以其性能突出、应用场景广泛、潜力大而备受关注^[8]。在油田提高采收率应用中,相较于向油藏注入产生物表面活性剂的外源微生物原位代谢,地面发酵法效率更高、应用成本更低^[9]。因此,本文将主要针对地面制备生物表面活性剂的驱油性能、产量和矿场应用等最新进展进行综述,并对其面临的挑战和发展方向进行展望。

1 生物表面活性剂的类型

生物表面活性剂主要包括糖脂、脂肽和脂蛋白、脂肪酸和磷脂、聚合物、全细胞表面本身等 5 类^[10-11],由细菌、酵母菌、真菌等产表面活性剂的菌株产生。目前,已在油田应用或具备应用前景的生物表面活性剂包括脂肽、鼠李糖脂和槐糖脂等 3 类,这方面已有大量的文献报道^[12-13]。对于几种典型的采油用生物表面活性剂的分子结构已有较为清楚的认识,图 1 给出了 3 种生物表面活性剂的分子结构^[12,14]。由图 1 可见,不同种类生物表面活性剂的结构差异很大,糖脂类生物表面活性剂带有亲水性的糖环结构,脂肽类生物表面活性剂带有亲水性的肽环结构。相较于传统的石油磺酸盐、聚氧乙烯醚等化学驱油剂,生物表面活性剂的分子

图 1 采油用生物表面活性剂的结构^[12,14]Figure 1 Structure of the oil-displacing biosurfactants^[12,14].

结构更为复杂，分子上的亲水头基更大，所以在耐温抗盐^[15]、油水^[14,16]、油固^[17]、水固^[18]等界面上呈现出优异的性能。

生物表面活性剂由微生物发酵产生获得，是这类微生物发酵液中主要的活性物质。由于生物表面活性剂的提取步骤复杂、成本高，提

取成本占总成本的 60%以上^[19]。因此在提高采收率应用中多直接使用其发酵液^[20-21]。

2 生物表面活性剂的产率

目前，受发酵产率低等影响，生物表面活性剂未在油田形成规模化应用。因此，提高发

醇产率、降低生产成本是面临的主要挑战。表 1 给出了国内外公开报道生物表面活性剂的产率。从研究报告来看,鼠李糖脂、槐糖脂和脂肽分别由铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)^[22-23]、酵母菌^[24-25]和枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)^[26-27]产生,不同类型生物表面活性剂的产量受微生物菌株类型、发酵底物、发酵工艺等影响差异较大,其中槐糖脂产率最高,达到 400.00 g/L^[25],脂肽产量 0.95–34.00 g/L^[26-27]。

2.1 基因工程改造提高产率

为了提高生物表面活性剂的产率,最直接有效的做法是对产生菌株的基因工程改造^[28-29],此外,还有优化发酵原料^[21,30]和发酵工艺^[26,31]等方法。近几年,代谢工程和合成生物学技术的进步,推动了基因工程技术在提高产率方面的应用,主要方法包括菌株的诱变选育、代谢通路改造、酶工程等^[28]。顾生辉等^[29]诱变铜绿假单胞菌 RG-14,以甘油为碳源生产鼠李糖脂,产率由 13.6 g/L 提高到 16.5 g/L,突变菌株经过 5 次传代培养后仍能稳定产生鼠李糖脂,表现出较好的遗传稳定性。王苗苗等^[26]从强诱导型启动子构建、合成酶表达等方面对产脂肽菌株 THBS-2 进行改造菌株,产率大幅提升,达到 34 g/L,是目前报道的最高水平。

菌株的基因工程改造不仅能够提高生物表面活性剂的产量,还能够调控产物中有效物的组分组成^[32]。巩志金等^[33]将带有不同强度组成型

合成启动子的鼠李糖脂转移酶基因在大肠杆菌(*Escherichia coli*)中异源表达,产率提高 1.17 倍。另外,改造后工程菌缺少鼠李糖脂转移酶 2 基因 *rhlC*,无法合成双鼠李糖脂,所以产物中以单鼠李糖脂为主。Kusuma 等^[32]指出 *rhlAB* 基因片段表达产生单鼠李糖脂,而 *rhlABC* 基因片段表达产生双鼠李糖脂,基于此将 *rhlABC* 基因片段酶切后植入大肠杆菌,从而获得高产率的双鼠李糖脂。分析发现,目标产物的乳化指数、界面张力和临界胶束浓度等指标均优于石油磺酸盐^[32]。这一研究结果,应引起石油工作者的充分重视,通过基因工程技术调控现有菌株的代谢表达,从而实现特定功能产物的定制生产,获得一系列驱油功能产品,来满足复杂油藏应用场景需求。而有关于基因工程改造提高有效物占比这方面工作,有大量的文献报道^[34-35]。

2.2 使用廉价原料降低生产成本

研究者使用廉价的发酵底物来降低生产成本^[27,36]。厉芳^[37]指出,生物表面活性剂的发酵原料成本占生产成本的 50%,而生产生物表面活性剂需要 10 倍量的原料。因此,使用廉价的农副产品、工业废弃物是降低成本的有效手段之一。Satpute 等^[38]较为全面地介绍了生产不同类型生物表面活性剂的廉价原料,并就降低成本给出了建议。黄翔峰等^[23]介绍了使用地沟油制备鼠李糖脂的方法,阐述了菌种、氮源、微量元素和发酵工艺等对产量的影响,并对研究

表 1 不同类型生物表面活性剂的产率

Table 1 Yield of different types of biosurfactants

Type	Yield (g/L)	Carbon source	Strain
Rhamnolipid	112.00	Soybean oil	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> DSM 7107 ^[22]
	24.61	Hogwash oil	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> zju.u1M ^[23]
Sophorolipid	53.70	Lignocellulose	<i>Wickerhamiella domercqiae</i> var CGMCC 1576 ^[24]
	400.00	Grease	<i>Candida</i> ^[25]
Lipopeptide	34.00	Brown sugar	<i>Bacillus subtilis</i> THBS-2 ^[26]
	0.95	Soybean meal	<i>Bacillus subtilis</i> ATCC 21332 ^[27]

方向提出了几点建议。陈光等^[24]总结了使用纤维素制备槐糖脂的研究进展,论述了纤维素预处理、酶的水解、水解液的脱毒和发酵等几个关键步骤,并对存在的几个技术问题进行了讨论。可以看出,随着生物化工技术的进步,纤维素糖化过程的处理成本会进一步降低,生物表面活性剂的发酵成本也会随之降低。

3 生物表面活性剂的驱油性能

3.1 耐温抗盐性能

从图 1 可以看出,生物表面活性剂的分子结构上带有阴离子和非离子官能团,属于典型的阴、非离子表面活性剂,而这类表面活性剂通常具有较好的耐温抗盐性能^[39]。罗志刚等^[15]、Elshafie 等^[40]、王静等^[41]、Martins 等^[42]分别报道了鼠李糖脂、槐糖脂和脂肽的耐温抗盐性能,其中,鼠李糖脂耐温 121 °C、矿化度 25 000 mg/L,槐糖脂耐温 100 °C、矿化度 150 000 mg/L,脂肽耐温 120 °C、矿化度 200 000 mg/L。3 种生物表面活性剂的耐温抗盐性能良好,均能够应用在高温高盐油藏。

3.2 临界胶束浓度 (critical micelle concentration, CMC) 和胶束直径

由于生物表面活性剂的亲水头基大、支链

多(图 1),并且亲水基和亲油基在分子链上交替出现,因此这类表面活性剂的 CMC 显著低于化学合成表面活性剂。从表 2 中可见,生物表面活性剂的 CMC 普遍较低,其中脂肽粗提物最低,为 22.3 mg/L^[48],而化学表面活性剂的 CMC 较高,磺酸盐粗提物的 CMC 在 1 000 mg/L 以上^[49]。对于这种生物基和化学基表面活性剂 CMC 数量级上的差异,与其分子结构之间有着直接的关系。闫乐乐等^[43]测定了鼠李糖脂的 CMC,随后利用 Gibbs 公式计算了鼠李糖脂在气液界面上的最大吸附量(Γ_{\max})和单分子界面吸附面积(A_{\min}),结果显示鼠李糖脂的 Γ_{\max} 明显小于十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)、C₁₂E₅ 等典型的阴、非离子表面活性剂,而 A_{\min} 是 SDS 的 1.5 倍,表明具有较大空间结构的鼠李糖脂在气液界面上吸附占据更大的空间体积。类似的实验现象在文献[51]中也有报道。

表 2 还给出了不同类型表面活性剂的胶束直径。可以看出,相较于磺酸盐,生物表面活性剂的胶束直径至少高一个数量级,达到 100 nm 量级。这主要是因为生物表面活性剂带有更大空间结构的亲水基团,其在水相形成胶束排列更为疏松,胶束直径远大于 SDS^[50]。具有更大

表 2 不同类型表面活性剂的基本性质

Table 2 Basic properties of different types of surfactant

Type	Class	CMC	Micellar diameter (nm)	Surface tension (mN/m)
Rhamnolipid	Crude extract ^[43]	0.13 mmol/L	100–180	30.0
	Crude extract ^[14]	80 mg/L	–	28.0
	Crude extract ^[44]	60.31 mg/L	50–1 000	29.1
	Mono-rhamnolipid ^[44]	43.82 mg/L	50–400	31.6
	Di-rhamnolipid ^[44]	115 mg/L	10–1 000	28.8
Sophorolipid	Lactonic sophorolipid ^[30,45]	0.13 mmol/L	90	36.1
	Acid sophorolipid ^[46]	–	50–100	–
Lipopeptide	Crude extract ^[47]	30 mg/L	–	35.5
	Crude extract ^[48]	22.3–26.2 mg/L	94.6	28.2
Sulfonate	Crude extract ^[49]	1 000–7 500 mg/L	–	31.4
	Sodium dodecyl sulfate (SDS) ^[50]	–	1.84	–

–: No data.

胶束直径的表面活性剂的一个显著特征是对油相的增容能力变强,而这种特征在采油、环境修复^[44]中显得尤为重要。而文献[52-53]中有大量关于表面活性剂增容疏水有机物的介绍。

3.3 表面张力

如果单独将生物表面活性剂和化学表面活性剂的表面张力进行比较,则这两大类表面活性剂无明显区别(表 2)。考虑到生物表面活性剂有着更低的 CMC,也就具有更低的使用浓度,其在采油、环保中的应用广受关注。

3.4 抗吸附能力

驱油剂在油藏多孔介质中的吸附滞留会造成其浓度下降,造成不同驱油剂组分的色谱分离^[54],最终影响驱油效率。因此,抗吸附性能是评价驱油剂的重要指标之一。Li 等^[55]研究了不同驱油剂在地层砂表面的吸附量,鼠李糖脂、石油磺酸盐、NaOH 和聚合物的饱和吸附量分别为 1.4、2.1、1.1 和 0.4 mg/L。从实验结果可以看出,不同注剂抗吸附能力的差异会造成地层运移过程色谱分离现象。潘洪哲等^[56]以石英砂为吸附材料考察了内酯型槐糖脂的吸附性能,结果显示在质量浓度分别为 100 mg/L 和 1 000 mg/L 条件下,槐糖脂的饱和吸附量分别为 0.343 mg/g 和 0.529 mg/g。Imanivarnosfaderani 等^[57]使用颗粒分配法(particles partition test)研究了不同表面活性剂的吸附性能,结果显示鼠李糖脂在老化方解石表面的吸附能力弱于十二烷基苯磺酸钠(sodium dodecylbenzene sulfonate, SDBS)。Hou 等^[58]研究发现十六烷基三甲基溴化铵(cetyltrimethylammonium bromide, CTAB)、SDS、TX-100、槐糖脂和鼠李糖脂等类型表面活性剂在 55 °C、矿化度 5 000 mg/L 条件下,在碳酸盐表面的吸附量分别为 18.0、14.0、7.0、3.5 和 25.0 mg/L。可以看出,生物表面活性剂的抗吸附性能优于化学表面活性剂。另外,实

验的条件特别是吸附材料的表面性质(如电负性)对表面活性剂吸附量的影响极大。因此,在比较不同类型表面活性剂的吸附量时,要给出明确的测试条件,避免得出片面的结论。

3.5 润湿性能

润湿性是影响采收率的重要因素。大量的研究报道指出,鼠李糖脂、脂肽等生物表面活性剂能够将亲油性的储层表面转变为亲水性,这类储层包括碳酸盐^[59]、碳酸盐裂缝^[60]、砂岩^[61-62]等类型。近年来,伴随着新的研究方法和手段的引入,生物表面活性剂的润湿机理认识逐渐清晰。本质上来讲,生物表面活性剂的储层润湿作用是其能在岩石壁面发生吸附的结果。陈子慧等^[63]借助分子模拟和原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)扫描等技术,发现鼠李糖脂通过氢键作用吸附在亲水性 SiO₂ 表面,而在亲油性表面则通过竞争吸附替换疏水有机物,实现界面的润湿改性。Salehi 等^[64]详细描述了脂肽、月桂醇醚硫酸钠(sodium laureth sulfate, SLS)和十二烷基三甲基溴化铵(dodecyltrimethylammonium bromide, DTAB)等 3 种不同类型表面活性剂在界面上的吸附行为。然而,对于这种润湿改性的结果及对于提高原油渗流能力的内在机制,相关的研究者从力学角度给予了充分的阐述^[65]。

3.6 生物表面活性剂的驱油效率

林军章等^[14]比较了不同生物表面活性剂的界面张力、乳化、润湿和驱油效率,发现不同类型生物表面活性剂的驱油性能差异较大,其中脂肽和鼠李糖脂具有良好降低界面张力的能力和润湿性能,而槐糖脂具有较好的乳化性能。也是由于不同生物表面活性剂驱油功能不同,所以适用不同的驱油场景。实际上,油田开发到中后期面临的矛盾更为复杂,非均质性加剧,要求驱油剂具有扩大波及体积、提高洗油效率

的效能,而功能单一或功能不强的表面活性剂需要进行复配,以进一步提升驱油性能。童正新等^[66]将鼠李糖脂发酵液与助剂 OP10 复配后,体系的界面张力比单一表面活性剂降低一个数量级,驱油效率大幅提升,水驱基础上提高了 15.7%。陈金凤^[67]使用脂肽部分替代石油磺酸盐建立了生化三元复合驱油体系,超低界面张力窗口扩大,成本降低 11%,先导试验降水增油效果显著。近年来,生物表面活性剂复合纳米颗粒制备驱油剂取得较大的进展,这种复合作用体现在降界面张力^[68]、润湿^[69]等方面,所以表现出良好的驱油性能。

4 生物表面活性剂的矿场应用

生物表面活性剂的矿场应用工艺主要包括井组驱替和单井吞吐 2 种方式。Osman 等^[70]介绍了世界范围内生物表面活性剂矿场应用情况,包括中国、美国、加拿大、俄罗斯、澳大利亚等 13 个国家进行了规模的矿场试验。其中,我国的大庆油田和胜利油田分别开展了卓有成效的技术研究和现场推广工作,技术增油量分别达到 21.9 万 t 和 6.4 万 t,这也使得中国在过去的十几年引领着生物采油技术的发展方向。

大庆油田开展了世界范围内最大规模的生物表面活性剂现场试验,其主要工作包括了地面发酵、地下激活、井组驱替和单井吞吐等,取得了较好的增油效果和效益^[71]。针对延长杏子川特低渗透油田产能低、含水上升快和水驱效率低问题,洪玲等^[72]开发了一种界面张力低、润湿性能强、驱油效率高的生化复合驱油体系,现场开展了 9 注 43 采井组试验,注入 0.41 PV 后,油井见效率 90%,区块产量由 74.88 t/d 升至 105.18 t/d,累计增油 1.36 万 t,投入产出比为 1:5。

在单井吞吐方面,Sun 等^[73]从中高温、低

渗透油藏筛选了 2 株产糖脂类表面活性剂的外源菌株,将菌株在地面发酵生产后注入油井,实施后单井油量由 2.2 t/d 升至 3.5 t/d,取得较好的应用效果。Ariadji 等^[74-75]在印度尼西亚 Melibur 油田火山岩油藏开展了 2 口单井吞吐试验,实施后单井含水量从 85% 下降至 70%,油量由 0.4 t/d 增加至 0.96 t/d,增油成本 113.7 usd/t。Wang^[76]针对卫星油田油井有机堵塞问题,开展了 10 口单井生物解堵试验,注入脂肽发酵液后,油井液量由 28.2 t/d 升至 63.4 t/d,油量由 9.7 t/d 提升至 25.0 t/d,有效期 8 个月,增油 2 048 t,投入产出比为 1:4.9。

生物表面活性剂在页岩油开发中也展现了良好的应用效果。据 Shumway^[77]发布在世界石油网站上的报道,利用脂肽降界面张力、润湿和分散增溶性能,先后在美国特拉华盆地、威利斯顿盆地和阿巴拉契亚盆地页岩油开发过程使用了脂肽生物表面活性剂,措施成功率 100%,最快 34 d 收回处理成本,投资收益率 (return on investment, ROI) 最大超过 4 倍,取得了良好的经济效益。

5 面临的挑战和发展方向

生物表面活性剂以其活性高、用量低、类型多、功能多等特征,在油田开发中展示了良好的应用前景,但也存在以下几个方面的挑战。

(1) 生物表面活性剂的发酵产率普遍偏低,其中槐糖脂的产量最高^[25],有效物在发酵液中占比也仅为 40% 左右。因此,即使在工作浓度更低的条件下,其应用成本相较于化学合成表面活性剂,也无明显的成本优势。为此,首先通过菌株改造、发酵工艺优化等方式来提高发酵效率,使用廉价的发酵底物降低生产成本。其次,就近利用油田周围的生物制造工厂,对工厂发酵装备进行简单的改造,提升生物表面

活性剂制造能力,能大幅降低设备投资和运输成本,从而进一步降低生产成本。

(2) 随着油田进入特高含水开发阶段,油稠、非均质等矛盾给驱油剂带来新的挑战。而单独使用一种或几种生物表面活性剂,显然无法有效解决复杂油藏的开发矛盾。另外,近年来提高采收率技术的阵地逐渐向更高温、更高盐、更低渗透转移,现有化学驱油剂无法满足开发需求。因此,需要研发性能更突出的生物表面活性剂,并针对特定的油藏提供适用性的驱油体系。部分矿场试验取得较好的降水增油效果,经济效益显著,但并未规模化推广,说明这中间还有未解决的技术问题和工程问题。目前较为紧迫的是,对实施有效的现场制定技术规范或手册,实现技术固化,为扩大应用规模提供技术指导。

(3) 大量的研究报道发现,相较于传统的石油磺酸盐等化学合成表面活性剂,鼠李糖脂的润湿性能更突出,槐糖脂对稠油的乳化降黏效果较好,脂肽降低油水界面张力弱、但与石油磺酸盐复合后能进一步降低界面张力。从分子结构上看,不同类型生物表面活性剂具有明显差异的亲水、亲油基团,这是导致其驱油功能差异的根本原因。而对于分子结构和驱油性能间的构效关系,以及多孔介质中生物表面活性剂对油水渗流特征的影响仍缺少系统的研究。因此,驱油机理系统认识也将是下一步的重点研究方向之一。

6 结论与展望

生物表面活性剂是一类绿色生物制剂产品,在采油、环保、医药、食品等行业有着广阔的应用前景。伴随油田开发向更高温、高盐、低渗透油藏阵地转移,具有较好耐温抗盐、表面活性性的生物表面活性剂在 3 次采油领域展

示了广阔的应用前景,所以发展生物表面活性剂、加快形成新质生产力,是建设绿色油田、实现国家“双碳”目标的具体实践。“十四五”以来,以基因工程、合成生物学等学科为基础的生物制造产业发展迅猛,这必将为生物表面活性剂的低成本制造、规模化应用带来新的机遇。通过对生物表面活性剂在提高采收率方面的应用总结分析,得出如下结论:

(1) 目前,在油田开发中应用的生物表面活性剂主要为脂肽、鼠李糖脂和槐糖脂等 3 类。槐糖脂产率最高,鼠李糖脂次之、脂肽最低。目前生物表面活性剂的工程应用成本较高,主要通过菌株基因工程改造提高产率和使用廉价原料来降低成本。此外,基于基因工程技术的生物表面活性剂定制生产应引起重视。

(2) 由于生物表面活性剂亲水头基大、支链多,因此 CMC 更低、胶束直径更大。生物表面活性剂呈现了优良的表界面活性、抗吸附性能、润湿性能和驱油性能,受水驱油藏开发矛盾复杂影响,在提高采收率应用中以复配为主。

(3) 世界范围内开展了一定规模的生物表面活性剂驱油矿场试验,包括井组驱替和单井吞吐等工艺方式,整体处于试验阶段。生物表面活性剂为页岩油效益开发提供了新的技术方案。

(4) 应用成本高、油藏应用场景日趋复杂和驱油机理认识不清是生物表面活性剂面临的主要挑战,也是下一步的重点研究方向。

REFERENCES

- [1] 王增林,李鹏,魏芳,王勇,梁伟.胜利油田特高含水期化学防砂技术进展[J].油田化学,2021,38(3):560-563.
WANG ZL, LI P, WEI F, WANG Y, LIANG W. Progress of chemical sand control technology used in Shengli oilfield at ultra-high water-cut period[J]. Oilfield Chemistry, 2021, 38(3): 560-563 (in Chinese).
- [2] 孙焕泉.高温高盐油藏化学驱提高采收率技术发展思考[J].石油科技论坛,2021,40(2):1-7.
SUN HQ. Development and opinions of chemical EOR technology for high-temperature and high-salinity

- reservoirs[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2021, 40(2): 1-7 (in Chinese).
- [3] 徐辉, 曹绪龙, 孙秀芝, 李彬, 李海涛, 石静. 三次采油用小分子自组装超分子体系驱油性能[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(2): 80-84.
XU H, CAO XL, SUN XZ, LI B, LI HT, SHI J. Study on oil displacement performance of self-assembled small-molecule supramolecular system for EOR[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(2): 80-84 (in Chinese).
- [4] 谭天伟, 陈必强, 张会丽, 崔子恒. 加快推进绿色生物制造助力实现“碳中和”[J]. *化工进展*, 2021, 40(3): 1137-1141.
TAN TW, CHEN BQ, ZHANG HL, CUI ZH. Accelerate promotion of green bio-manufacturing to help achieve “carbon neutrality”[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(3): 1137-1141 (in Chinese).
- [5] 马延和. 生物制造产业是生物经济重点发展方向[J]. *中国生物工程杂志*, 2022, 42(5): 4-5.
MA YH. The biological manufacturing industry: a key development direction for the bioeconomy[J]. *China Biotechnology*, 2022, 42(5): 4-5 (in Chinese).
- [6] 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 WD. Research advance and development trend in microbial enhanced oil recovery technology[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(2): 1-9 (in Chinese).
- [7] HANNAH UDOH T, EVANGELISTA L. Potentials of enzyme enhanced oil recovery: a review[J]. *Petroleum Science and Engineering*, 2020, 4(2): 51.
- [8] SJ G, BANAT IM, JOSHI SJ. Biosurfactants: production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR)[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2018, 14: 23-32.
- [9] 伍晓林, 陈坚, 伦世仪. 生物表面活性剂在提高原油采收率方面的应用[J]. *生物学杂志*, 2000, 17(6): 25-28.
WU XL, CHEN J, LUN SY. Application of biosurfactant in enhanced oil recovery[J]. *Journal of Biology*, 2000, 17(6): 25-28 (in Chinese).
- [10] 马歌丽, 彭新榜, 马翠卿, 许平. 生物表面活性剂及其应用[J]. *中国生物工程杂志*, 2003, 23(5): 42-45.
MA GL, PENG XB, MA CQ, XU P. The biosurfactants and its application[J]. *Progress in Biotechnology*, 2003, 23(5): 42-45 (in Chinese).
- [11] 李道明, 王瑛, 陈超, 曾明白, 李倩如, 贾青云, 刘秀丽, 侯勇跃, 范成明, 陈宇红. 芽孢杆菌几种重要抗菌脂肽研究进展[J]. *生物工程学报*, 2022, 38(5): 1768-1783.
LI DM, WANG Y, CHEN CY, ZENG M, LI QR, JIA QY, LIU XL, HOU YY, FAN CM, CHEN YH, HU ZM. Advances in several important antimicrobial lipopeptides from *Bacillus* spp.[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2022, 38(5): 1768-1783 (in Chinese).
- [12] SHAIKHAH D, LOISE V, ANGELICO R, PORTO M, CALANDRA P, ABE AA, TESTA F, BARTUCCA C, OLIVIERO ROSSI C, CAPUTO P. New trends in biosurfactants: from renewable origin to green enhanced oil recovery applications[J]. *Molecules*, 2024, 29(2): 301.
- [13] COLLITT SD, SEKHON KK, GOMARI SR, RAHMAN PKSM. Biosurfactants and their significance in altering reservoir wettability for enhanced oil recovery[M]//Challenges and Recent Advances in Sustainable Oil and Gas Recovery and Transportation. Amsterdam: Elsevier, 2023: 19-52.
- [14] 林军章, 王静, 汪卫东, 冯云, 谭晓明, 丁明山. 生物表面活性剂驱油性能[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(2): 145-151.
LIN JZ, WANG J, WANG WD, FENG Y, TAN XM, DING MS. Oil displacement performance of biosurfactants[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(2): 145-151 (in Chinese).
- [15] 罗志刚, 杨欢, 齐亮. 生物表面活性剂鼠李糖脂性质的研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(1): 30-37.
LUO ZG, YANG H, QI L. Study on the properties of rhamnolipids as biosurfactants[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(1): 30-37 (in Chinese).
- [16] ONAIZI SA. Demulsification of crude oil/water nanoemulsions stabilized by rhamnolipid biosurfactant using enzymes and pH-swing[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 259: 118060.
- [17] 陈子慧, 林军章, 汪卫东, 汪庐山. 油藏微生物润湿改性机理研究进展[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(4): 83-90.
CHEN ZH, LIN JZ, WANG WD, WANG LS. Research progress in microbial wettability alteration mechanisms in oil reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(4): 83-90 (in Chinese).
- [18] 任芳道. 鼠李糖脂在微生物表面的吸附及其对微生物表面性质的影响[D]. 长沙: 湖南大学硕士学位论文, 2008.
REN FY. Adsorption of rhamnolipid on microorganisms and the effect on cell surface lyophobic properties[D]. Changsha: Master's Thesis of Hunan University, 2008 (in Chinese).
- [19] SOARES Da SILVA RCF, de ALMEIDA DG, BRASILEIRO PPF, RUFINO RD, de LUNA JM, SARUBBO LA. Production, formulation and cost estimation of a commercial biosurfactant[J]. *Biodegradation*, 2019, 30(4): 191-201.
- [20] 丁明山, 王静, 林军章, 汪卫东. 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 MS, WANG J, LIN JZ, WANG WD. Oil displacement performance of rhamnolipid fermentation broths[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2019, 41(5): 112-119 (in Chinese).
- [21] 冯艳, 修建龙, 伊丽娜, 黄立信, 马原栋, 俞理. 鼠李糖脂产量的提高及采油应用研究[J]. *应用化工*, 2023, 52(3): 795-800.
FENG Y, XIU JL, YI LN, HUANG LX, MA YD, YU L. Optimization of fermentation conditions and evaluation of oil displacement potential of an oil producing functional strain[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(3): 795-800 (in Chinese).
- [22] LANG S, WULLBRANDT D. Rhamnose lipids: biosynthesis, microbial production and application potential[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1999, 51(1): 22-32.

- [23] 黄翔峰, 陈旭远, 刘佳, 陆丽君. 废弃食用油脂生物合成鼠李糖脂研究进展[J]. 微生物学通报, 2009, 36(11): 1738-1743.
HUANG XF, CHEN XY, LIU J, LU LJ. Recent progress on rhamnolipid produced from fermentation of waste edible oils[J]. Microbiology China, 2009, 36(11): 1738-1743 (in Chinese).
- [24] 陈光, 李晓丽, 孙昉, 王刚, 陈欢, 苏璞杰, 于潇潇. 木质纤维素原料制备槐糖脂的研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2020, 42(1): 1-7.
CHEN G, LI XL, SUN Y, WANG G, CHEN H, SU YJ, YU XX. Research progress in preparation of sophorolipids from lignocellulosic materials[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2020, 42(1): 1-7 (in Chinese).
- [25] van BOGAERT INA, ZHANG JX, SOETAERT W. Microbial synthesis of sophorolipids[J]. Process Biochemistry, 2011, 46(4): 821-833.
- [26] 王苗苗, 于慧敏, 何欣, 李艳梅, 杨怀宇. 高产表面活性素的重组枯草芽孢杆菌构建及培养优化[J]. 生物工程学报, 2020, 36(11): 2377-2386.
WANG MM, YU HM, HE X, LI YM, YANG HY. Construction and optimization of engineered *Bacillus subtilis* for surfactin production[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2020, 36(11): 2377-2386 (in Chinese).
- [27] 张楠楠, 徐丹, 尹婷, 徐学明. 枯草芽孢杆菌产脂肽的发酵条件优化[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(15): 108-112.
ZHANG NN, XU D, YIN T, XU XM. Optimization on fermentation condition of surfactin by *Bacillus subtilis* ATCC 21332[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(15): 108-112 (in Chinese).
- [28] 张嵩元, 汪卫东. 基因工程微生物合成鼠李糖脂表面活性剂的研究进展[J]. 微生物学报, 2021, 61(10): 3059-3075.
ZHANG SY, WANG WD. Recent advances in the production of rhamnolipid biosurfactant by genetically engineered microorganisms[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, 61(10): 3059-3075 (in Chinese).
- [29] 顾生辉, 朱莉, 詹晓北, 吴剑荣. 以甘油为底物鼠李糖脂高产菌株的诱变选育[J]. 生物加工过程, 2015, 13(1): 54-59.
GU SH, ZHU L, ZHAN XB, WU JR. Mutating rhamnolipids high-yielding strain with glycerol as substrate[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2015, 13(1): 54-59 (in Chinese).
- [30] 宋丹丹, 梁生康, 尚玉俊, 王秀莉. 不同碳源培养条件下假丝酵母菌产槐糖脂的结构及性能[J]. 环境化学, 2015, 34(7): 1252-1258.
SONG DD, LIANG SK, SHANG YJ, WANG XL. Properties of sophorolipid produced by the yeast *Candida bombicola* grown on different lipophilic carbon substrates[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(7): 1252-1258 (in Chinese).
- [31] 刘青, 刘波, 徐欣欣, 张红兵, 张宇宏, 张伟. 微生物表面活性素合成调控和高效生产研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(4): 23-31.
LIU Q, LIU B, XU XX, ZHANG HB, ZHANG YH, ZHANG W. Research progress in regulation and efficient production of microbial surfactin synthesis[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(4): 23-31 (in Chinese).
- [32] KUSUMA SH, MEITHA K, SUHANDONO S. Characterization of di-rhamnolipid biosurfactant in recombinant *Escherichia coli*[J]. Key Engineering Materials, 2021, 874: 107-114.
- [33] 巩志金, 彭彦峰, 张煜婷, 宋国田, 陈五九, 贾士儒, 王钦宏. 产鼠李糖脂生物表面活性剂大肠杆菌的构建与优化[J]. 生物工程学报, 2015, 31(7): 1050-1062.
GONG ZJ, PENG YF, ZHANG YT, SONG GT, CHEN WJ, JIA SR, WANG QH. Construction and optimization of *Escherichia coli* for producing rhamnolipid biosurfactant[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2015, 31(7): 1050-1062 (in Chinese).
- [34] DU J, ZHANG AJ, HAO JA, WANG J. Biosynthesis of di-rhamnolipids and variations of congeners composition in genetically-engineered *Escherichia coli*[J]. Biotechnology Letters, 2017, 39(7): 1041-1048.
- [35] 张疆睿, 张利华, 石依博, 沈微, 樊游, 陈献忠. 代谢改造熊蜂生假丝酵母提高酸型槐糖脂产量[J]. 微生物学报, 2019, 59(11): 2094-2106.
ZHANG JR, ZHANG LH, SHI YB, SHEN W, FAN Y, CHEN XZ. Metabolic engineering of *Starmerella bombicola* for enhanced acid-type sophorolipid production[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2019, 59(11): 2094-2106 (in Chinese).
- [36] CAROLIN C F, SENTHIL KUMAR P, MOHANAKRISHNA G, HEMAVATHY RV, RANGASAMY G, M AMINABHAVI T. Sustainable production of biosurfactants via valorisation of industrial wastes as alternate feedstocks[J]. Chemosphere, 2023, 312: 137326.
- [37] 厉芳. 可再生材料生产鼠李糖脂的研究进展[J]. 发酵科技通讯, 2014, 43(1): 16-19.
LI F. Research progress of rhamnolipid production by fermentation using renewable material[J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology, 2014, 43(1): 16-19 (in Chinese).
- [38] SATPUTE SK, PŁAZA GA, BANPURKAR AG. Biosurfactants' production from renewable natural resources: example of innovative and smart technology in circular bioeconomy[J]. Management Systems in Production Engineering, 2017, 25(1): 46-54.
- [39] 杨文新, 沙鸥, 何建华, 赵江艳. 耐温抗盐阴-非离子表面活性剂研究及应用[J]. 油田化学, 2013, 30(3): 416-419, 424.
YANG WX, SHA O, HE JH, ZHAO JY. Application of temperature resistant and salt tolerant anionic-nonionic surfactants[J]. Oilfield Chemistry, 2013, 30(3): 416-419, 424 (in Chinese).
- [40] ELSHAFIE AE, JOSHI SJ, AL-WAHAIBI YM, AL-BEMANI AS, AL-BAHRY SN, AL-MAQBALI D, BANAT IM. Sophorolipids production by *Candida bombicola* ATCC 22214 and its potential application in microbial enhanced oil recovery[J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6: 1324.
- [41] 王静, 林军章, 宋欣, 谭晓明, 胡婧, 陈健斌. 一株产脂肽菌的鉴定及其代谢产物驱油性能评价[J]. 东北石油大学学报, 2016, 40(2): 78-84, 126.
WANG J, LIN JZ, SONG X, TAN XM, HU J, CHEN JB. A strain of lipopeptide producing bacteria identification and its metabolic product performance evaluation[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2016, 40(2): 78-84, 126 (in Chinese).
- [42] MARTINS PC, BASTOS CG, GRANJEIRO PA, MARTINS VG. New lipopeptide produced by

- Corynebacterium aquaticum* from a low-cost substrate[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2018, 41(8): 1177-1183.
- [43] 闫乐乐, 梁生康, 宋丹丹, 李一鸣, 李雁宾. 鼠李糖脂生物表面活性剂胶束性质研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(12): 68-72.
YAN LL, LIANG SK, SONG DD, LI YM, LI YB. Studies on some micelle properties of rhamnolipid biosurfactant[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(12): 68-72 (in Chinese).
- [44] 林晖, 胡勇有, 张潇予, 郭艳平, 李文杰, 冯聪. 不同组分鼠李糖脂的胶束性质及其对三氯生的增溶作用[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(12): 2609-2615.
LIN H, HU YY, ZHANG XY, GUO YP, LI WJ, FENG C. Micellization properties of different rhamnolipidic fractions and their solubilization of triclosan[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(12): 2609-2615 (in Chinese).
- [45] 宋丹丹, 梁生康, 王江涛, 王修林. 稳态荧光探针法研究槐糖脂生物表面活性剂的胶束化行为[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(8): 2171-2175.
SONG DD, LIANG SK, WANG JT, WANG XL. Studies on micelle behaviors of sophorolipid biosurfactant by steady-state fluorescence probe method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(8): 2171-2175 (in Chinese).
- [46] DHASAIYAN P, LeGRIEL P, ROELANTS S, REDANT E, van BOGAERT INA, PREVOST S, PRASAD BLV, BACCILE N. Micelles versus ribbons: how congeners drive the self-assembly of acidic sophorolipid biosurfactants[J]. *ChemPhysChem*, 2017, 18(6): 643-652.
- [47] 张翠竹, 梁凤来, 张心平, 刁虎欣, 刘如林. 一种脂肽类生物表面活性剂的理化性质及其对原油的作用[J]. *油田化学*, 2000, 17(2): 172-176.
ZHANG CZ, LIANG FL, ZHANG XP, DIAO HX, LIU RL. Physico-chemical properties and effect on crude oil of a bacterium-produced lipopeptide biosurfactant[J]. *Oilfield Chemistry*, 2000, 17(2): 172-176 (in Chinese).
- [48] YOSHINO N, TAKESHITA R, KAWAMURA H, MURAKAMI K, SASAKI Y, SUGIYAMA I, SADZUKA Y, KAGABU M, SUGIYAMA T, MURAKI Y, SATO S. Critical micelle concentration and particle size determine adjuvanticity of cyclic lipopeptides[J]. *Scandinavian Journal of Immunology*, 2018, 88(2): e12698.
- [49] 于芳, 范维玉, 南国枝, 李水平, 段友智. 石油磺酸盐组分的结构与性能关系[J]. *石油学报(石油加工)*, 2008, 24(2): 204-210.
YU F, FAN WY, NAN GZ, LI SP, DUAN YZ. Relation between structure and property of fractions of petroleum sulfonate[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2008, 24(2): 204-210 (in Chinese).
- [50] DUPLÂTRE G, FERREIRA MARQUES MF, Da GRAÇA MIGUEL M. Size of sodium dodecyl sulfate micelles in aqueous solutions as studied by positron annihilation lifetime spectroscopy[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1996, 100(41): 16608-16612.
- [51] 吴志桥, 韩生. 稳态荧光探针法测定脂肪醇聚氧乙烯醚型非离子表面活性剂聚集行为[J]. *材料导报*, 2012, 26(4): 70-73, 86.
WU ZQ, HAN S. Study on aggregation properties of nonionic surfactant of fatty alcoholpolyoxyethylene ether by steady-state fluorescence probe method[J]. *Materials Review*, 2012, 26(4): 70-73, 86 (in Chinese).
- [52] JUAN-COLÁS J, DRESSER L, MORRIS K, LAGADOU H, WARD RH, BURNS A, TEAR S, JOHNSON S, LEAKE MC, QUINN SD. The mechanism of vesicle solubilization by the detergent sodium dodecyl sulfate[J]. *Langmuir*, 2020, 36(39): 11499-11507.
- [53] 刘恋, 田森林, 宁平. Tween-20 胶束溶液对甲苯的增溶吸收作用规律及预测[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(5): 615-618.
LIU L, TIAN SL, NING P. Principle and prediction for absorption of toluene by solubilization with Tween-20-containing micelle solutions[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(5): 615-618 (in Chinese).
- [54] 王红艳, 叶仲斌, 张继超, 曹绪龙. 复合化学驱油体系吸附滞留与色谱分离研究[J]. *西南石油学院学报*, 2006, 28(2): 64-66, 8-9.
WANG HY, YE ZB, ZHANG JC, CAO XL. Study of adsorption and chromatographic separation of flooding system of Shengli petroleum sulfonate[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006, 28(2): 64-66, 8-9 (in Chinese).
- [55] LI DS, LU SL, LIU Y, WANG DM. The effect of biosurfactant on the interfacial tension and adsorption loss of surfactant in asp flooding[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2004, 244(1/3): 53-60.
- [56] 潘洪哲, 包木太, 林军章, 刘涛, 宋永亭, 李希明. 内酯型槐糖脂生物表面活性剂性能评价[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 20(5): 84-87.
PAN HZ, BAO MT, LIN JZ, LIU T, SONG YT, LI XM. Study on performance about a kind of lactone sophorolipids biosurfactant[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(5): 84-87 (in Chinese).
- [57] IMANIVARNOSFADERANI MR, GOMARI SR, dos SANTOS RG. Effects of rhamnolipid bio-surfactant and sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS) surfactant on enhanced oil recovery from carbonate reservoirs[J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2022, 39(3): 825-833.
- [58] HOU JJ, LIN SL, DU JZ, SUI H. Study of the adsorption behavior of surfactants on carbonate surface by experiment and molecular dynamics simulation[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2022, 10: 847986.
- [59] BIRIA D, MAGHSOUDI E, ROOSTAAZAD R. Application of biosurfactants to wettability alteration and IFT reduction in enhanced oil recovery from oil-wet carbonates[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2013, 31(12): 1259-1267.
- [60] PORDEL SHAHRI M, SHADIZADEH SR, JAMIALAHMADI M. Applicability test of new surfactant produced from *Zizyphus spina-christi* leaves for enhanced oil recovery in carbonate reservoirs[J]. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 2012, 55(1): 27-32.
- [61] AL-WAHAIBI Y, AL-HADRAMI H, AL-BAHRY S, ELSHAFIE A, AL-BEMANI A, JOSHI S. Injection of biosurfactant and chemical surfactant following hot water injection to enhance heavy oil recovery[J]. *Petroleum Science*, 2016, 13(1): 100-109.
- [62] WANG HD, XIU JL, HUANG LX, YU L, WU B. Study on the application potential of lipopeptide

- fermentation broth in oil recovery[J]. *Energy Science & Engineering*, 2022, 10(7): 2065-2075.
- [63] 陈子慧, 林军章, 丁明山, 汪卫东, 汪庐山, 崔超男, 杨惠. 鼠李糖脂液-固界面润湿改性机制[J]. *油田化学*, 2023, 40(4): 668-675.
CHEN ZH, LIN JZ, DING MS, WANG WD, WANG LS, CUI CN, YANG H. Interaction mechanism between rhamnolipid biosurfactant and hydrophobic glass surface[J]. *Oilfield Chemistry*, 2023, 40(4): 668-675 (in Chinese).
- [64] SALEHI M, JOHNSON SJ, LIANG JT. Mechanistic study of wettability alteration using surfactants with applications in naturally fractured reservoirs[J]. *Langmuir*, 2008, 24(24): 14099-14107.
- [65] DING MS, JIA WH, LYU ZF, REN SL. Improving bitumen recovery from poor processing oil sands using microbial pretreatment[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(12): 7712-7720.
- [66] 童正新, 王芳, 吴庆红, 黄立信, 李祖义. 鼠李糖脂发酵液与OP类非离子表面活性剂复配驱油体系的研究[J]. *油气采收率技术*, 1998, 5(2): 16-20.
TONG ZX, WANG F, WU QH, HUANG LX, LI ZY. Research on compound displacement system with rhamnolipid fermentation liquor and OP type nonionic surfactant[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 1998, 5(2): 16-20 (in Chinese).
- [67] 陈金凤. 脂肽复配弱碱三元复合驱油体系性能及试验效果[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(5): 91-97.
CHEN JF. ASP flooding system with lipopeptide compound weak alkali and its test effect[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(5): 91-97 (in Chinese).
- [68] WANG D, LUO YJ, LAI RQ, CUI K, LI HL, ZHANG ZZ, ZHANG Y, SHI RJ. New technique for enhancing oil recovery from low-permeability reservoirs: the synergy of silica nanoparticles and biosurfactant[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(1): 318-328.
- [69] TEMIOUWA O, OLUWAANMI O, IFEANYI S, TOMIWA O. Nano augmented biosurfactant formulation for oil recovery in medium oil reservoirs[C]//All Days. August 6-8, 2018. Lagos, Nigeria. SPE, 2018: 193485-MS.
- [70] OSMAN MS, IBRAHIM Z, JAPPER-JAAFAR A, SHAHIR S. Biosurfactants and its prospective application in the petroleum industry[J]. 2019, 14(3): 125-140.
- [71] 侯军刚, 杨剑, 史小亮, 李国营. 糖脂类生物表面活性剂在石油工业中的应用[J]. *生物加工过程*, 2021, 19(6): 597-603.
HOU JG, YANG J, SHI XL, LI GY. Application of glycolipid biosurfactants in petroleum industry[J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2021, 19(6): 597-603 (in Chinese).
- [72] 洪玲, 王香增, 王成俊, 高瑞民. 特低渗透油藏新型高效驱油剂的研究与应用: 以延长油区杏子川油田王 214 试验区为例[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(3): 92-94, 117-118.
HONG L, WANG XZ, WANG CJ, GAO RM. The research and application of new effective oil displacement agent for ultra-low permeability reservoir-case study of Wang214 field in Xingzichuan oilfield of Yanchang[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(3): 92-94, 117-118 (in Chinese).
- [73] SUN SS, LUO YJ, ZHOU Y, XIAO M, ZHANG ZY, HOU JR, WEI XF, XU QS, SHA T, DONG H, SONG H, ZHANG ZZ. Application of *Bacillus* spp. in pilot test of microbial huff and puff to improve heavy oil recovery[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(12): 13724-13732.
- [74] ARIADJI T, ASTUTI DI, ADITIAWATI P, PURWASENA IA, PERSADA GP, SOEPARMONO MR, AMIRUDIN NH, ANANGGADIPA AA, SASONGKO SY, ABQORY MH, ARDIANTO RN, SUBIANTORO E, ADITYA GH. Microbial huff and puff project at mangunjaya field wells: the first in Indonesia towards successful MEOR implementation[C]//SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. October 17-19, 2017. Jakarta, Indonesia. SPE, 2017: 186361-MS.
- [75] ARIADJI T. Bio-surfactant injection field trials at volcanic formation in field M west Java[C]//Proc of Indonesian Petroleum Association 42nd Annual Convention. Indonesian Petroleum Association, 2019: IPA19-E-322.
- [76] WANG CY. Study of microbial huff-and-puff field test in Weixing oil field[M]//Advances in Geology and Resources Exploration. London: CRC Press, 2022: 634-639.
- [77] SHUMWAY M. Building a better shale well with biosurfactants improves production and ROI[J]. *World Oil*, 2022, 243(1): 35-38.