

# 生物型表面活性剂的合成与应用

韩心昕,李梦琦,张培育\*,崔基炜\*

(山东大学胶体与界面化学教育部重点实验室,山东 济南 250100)

**摘要:**在化学与生物技术交叉领域,生物型表面活性剂凭借其生物可降解性、低毒性和环境友好性等优势,成为替代传统化学表面活性剂的关键材料。这类微生物、动植物源天然分子因其独特的结构特征,展现出良好的物理化学性质。本文对其分类进行系统地梳理,并重点对比合成工艺的技术特点。同时结合最新研究进展,探讨生物型表面活性剂在石油采集、食品医药、环境修复等领域的应用前景,为推进其技术创新提供理论参考。

**关键词:**生物型表面活性剂;合成;应用

**中图分类号:**O648 **文献标志码:**A

**引用格式:**韩心昕,李梦琦,张培育,等.生物型表面活性剂的合成与应用[J].山东大学学报(理学版),2025,60(10):13-22,78.

## Synthesis and application of biosurfactants

HAN Xinxin, LI Mengqi, ZHANG Peiyu\*, CUI Jiwei\*

(Key Laboratory of Collid and Interface Chemistry, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250100, Shandong, China)

**Abstract:** In the intersection of chemistry and biotechnology, biosurfactants have emerged as key candidates to replace traditional chemical surfactants due to their inherent advantages, including biodegradability, low toxicity and environmental friendliness. Derived from microorganisms, plants, and animals, these natural molecules possess unique structural characteristics that confer superior physicochemical properties. This paper systematically reviews the classification of biosurfactants and focuses on a comparative analysis of their manufacturing processes. Furthermore, integrating recent research advances, it discusses the application prospects of biosurfactants in fields such as petroleum extraction, food and medicine, and environmental remediation. The insights presented herein aims to provide a theoretical foundation for advancing biosurfactant technology innovation.

**Key words:** biosurfactant; synthesis; application

## 0 引言

随着全球对环境保护和可持续发展议题的不断重视,传统化学表面活性剂正面临严峻挑战。这类物质大部分会对环境造成污染,从而受到各国环保法越来越严格地管控。这也促使科研人员积极探寻更为绿色、高效的替代品,生物型表面活性剂应运而生。

生物型表面活性剂的独特两亲性结构赋予其在界面行为和性能表现上的显著优势。其来源广泛,涵盖微生物、植物和动物等多个生物体系。不同来源的生物型表面活性剂在结构和性能上各具特色,从低分子量糖脂和脂肽,到高分子量的多糖、蛋白质、脂多糖、脂蛋白等,它们结构的复杂性和多样性为其丰富多样的应用奠定了基础。深入研究生物型表面活性剂的分类、结构特性以及不同的合成工艺,对于理解其在不同环境条件下的行为机制,拓展其在各个领域的应用具有至关重要的意义。这不仅有助于推动化学工业向绿色化

收稿日期:2025-05-30;网络出版时间:2025-10-09 09:30:38

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22072075,22172089);山东大学本科教育教学改革研究项目(2024Y120)

第一作者:韩心昕(2002—),女,硕士研究生,研究方向为凝胶泡沫的制备及生物应用. E-mail: xxhan@mail.sdu.edu.cn

\*通信作者:张培育(1987—),男,副教授,硕士生导师,博士,研究方向为界面组装材料的制备及生物应用. E-mail: pyzhang@sdu.edu.cn

崔基炜(1982—),男,教授,博士生导师,博士,研究方向为胶体材料组装及在生物医学中的应用. E-mail: jwcu@ sdu.edu.cn

转型,还将在医药、食品、环保等诸多领域引发技术创新,为解决全球性的环境与健康问题提供新的思路和解决方案。

## 1 生物型表面活性剂的分类与结构特性

### 1.1 生物型表面活性剂的定义与分类

生物型表面活性剂是一类两亲性化合物,主要由微生物、植物或动物(一般是细菌和酵母)通过代谢或酶促反应产生,也可通过对这些生物来源的产物进行简单的化学修饰获得<sup>[1-4]</sup>。其中,微生物来源的生物型表面活性剂因其具有性能良好、来源广泛、成本低、易制备等优点而受到广泛关注。按照分子量大小,它们可分为低分子量和高分子量两类。低分子量的生物型表面活性剂有糖脂(如鼠李糖脂、槐糖脂、海藻糖脂)和脂肽(如表面活性素)等,脂肪酸与氨基酸或糖基团的结合,大大提高了分子的两亲性,有效降低了分子界面张力<sup>[5-23]</sup>。高分子量的有多糖、蛋白质、脂蛋白、脂多糖及其复合物等<sup>[1-2, 24-31]</sup>,如由醋酸钙不动杆菌生产的胞外脂多糖,具有较强的吸附能力,可作为生物乳化剂。此外,根据其亲水基核心官能团,生物型表面活性剂主要分为五类:糖脂类含糖羟基与糖苷键(如鼠李糖脂);脂肽和脂蛋白类含肽键及氨基酸侧链基团(如表面活性素);磷脂类含磷酸酯键(如卵磷脂);高分子聚合物类含多糖羟基(如乳化多糖)、胺基和磺酸基等亲水官能团;脂肪酸及其衍生物含羧基或羟基(如长链脂肪酸)。根据微生物的来源,生物型表面活性剂也可分为细菌、酵母菌、丝状真菌来源的分子(表1)。

表1 生物型表面活性剂的分类及其微生物来源  
Table 1 Classification of biosurfactants and their microbial origins

类别	生物型表面活性剂	微生物来源
低 分 子 量	鼠李糖脂 (rhamnolipids)	铜绿假单胞菌( <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ) <sup>[5]</sup> , 鼻疽伯克霍尔德菌( <i>Burkholderia mallei</i> ) <sup>[6]</sup> , 水生栖热菌( <i>T. aquaticus</i> ) <sup>[7]</sup> , 红色亚栖热菌( <i>Meiothermus ruber</i> ) <sup>[7]</sup>
	海藻糖脂 (trehalose lipids)	红球菌( <i>Rhodococcus erythropolis</i> ) <sup>[8-9]</sup> , 石蜡节杆菌( <i>Arthrobacter paraffineus</i> ) <sup>[8]</sup> , 诺卡氏菌( <i>Nocardia</i> ) <sup>[8]</sup> , 分枝杆菌( <i>Mycobacterium</i> ) <sup>[8]</sup> , 戈登氏菌( <i>Gordonia</i> sp.) <sup>[8]</sup>
	槐糖脂 (sophorose lipids)	解脂假丝酵母( <i>Candida lipolitica</i> ) <sup>[10-11]</sup> , 博伊丁假丝酵母( <i>Torulopsis bombicola</i> ) <sup>[10-11]</sup> , 假丝酵母( <i>Starmerella bombicola</i> ) <sup>[10-11]</sup> , 假丝酵母( <i>Candida bombicola</i> ) <sup>[12]</sup>
	甘露糖赤藓糖醇酯 (mannosylerythritol, MEL)	拟酵母属( <i>Pseudozyma</i> ) <sup>[13]</sup> , 假丝酵母属( <i>Candida</i> sp.) <sup>[13]</sup> , 假丝酵母 JCM 11752 <sup>T</sup> ( <i>Pseudozyma parantarctica</i> JCM 11752 <sup>T</sup> ) <sup>[13]</sup> , 假丝酵母( <i>Pseudozyma churashimaensis</i> OK96) <sup>[14]</sup> , 假丝酵母( <i>Pseudozyma hubeiensis</i> SY62) <sup>[15]</sup> , 假丝酵母( <i>Pseudozyma antarctica</i> PYCC 5048 <sup>T</sup> ) <sup>[16]</sup> , 甘蔗鞭黑粉菌( <i>Ustilago scitaminea</i> ) <sup>[17]</sup>
	甘露糖核糖醇 (mannosylribitol lipid, MRL)	假丝酵母( <i>Pseudozyma parantarctica</i> JCM 11752 <sup>T</sup> ) <sup>[13]</sup>
	甘露糖阿拉伯醇酯 (mannosylarabitol lipid, MAL)	假丝酵母( <i>Pseudozyma parantarctica</i> JCM 11752 <sup>T</sup> ) <sup>[13]</sup>
	甘露糖甘露醇酯 (mannosylmannitol lipid, MML)	假丝酵母( <i>Pseudozyma parantarctica</i> JCM 11752 <sup>T</sup> ) <sup>[13]</sup>
	表面活性素(surfactin)	枯草芽孢杆菌( <i>Bacillus subtilis</i> ) <sup>[18-19]</sup>
	伊枯草菌素(iturin A)	短小芽孢杆菌( <i>Bacillus pumilus</i> ) <sup>[19-20]</sup>
	多粘菌素(polymixins)	多粘芽孢杆菌( <i>Bacillus polymyxa</i> ) <sup>[21]</sup>
其它脂肽(other lipopeptides)	弗格森埃希菌 KLU01( <i>Escherichia fergusonii</i> KLU01) <sup>[22]</sup> , 枯草芽孢杆菌 CN2( <i>Bacillus subtilis</i> CN2) <sup>[23]</sup>	

表 1(续)

类别	生物型表面活性剂	微生物来源
高分子量 (聚合型 表面活性剂)	磷脂 (phospholipids)	不动杆菌属 ( <i>Acinetobacter</i> ) <sup>[24]</sup>
	脂质 (flavolipids)	黄杆菌属 ( <i>Flavobacterium</i> ) <sup>[25]</sup>
	Emulsan(脂多糖, lipo-heteropolysaccharide)	醋酸钙不动杆菌 RAG-1 ( <i>Acinetobacter calcoaceticus</i> RAG-1) <sup>[26]</sup>
	Alasan(糖蛋白, glycoprotein)	醋酸钙不动杆菌 BD4 和 BD413 ( <i>Acinetobacter calcoaceticus</i> BD4 and BD413) <sup>[27]</sup>
	生物分散剂 (biodispersan)	醋酸钙不动杆菌 A2 ( <i>Acinetobacter calcoaceticus</i> A2) <sup>[28]</sup>
	硫酸化多糖 (sulphated polysaccharides)	革兰氏阴性中度嗜盐细菌 ( <i>Virgibacillus dokdonensis</i> VITP14) <sup>[29]</sup>
	脂蛋白 (lipoproteins)	假单胞菌属 ( <i>Pseudomonas gessardii</i> ) <sup>[30]</sup>
	食品乳化剂 (food emulsifier)	产朊假丝酵母 ( <i>Candida utilis</i> ) <sup>[31]</sup>

## 1.2 生物型表面活性剂的结构与特性

低分子量生物型表面活性剂中的糖脂和脂肽具有独特的结构与特性。糖脂类通常由糖基和脂肪酸或脂肪醇构成,像鼠李糖脂 (rhamnolipids) (图 1(a)) 含一或两个鼠李糖单元与多个羟基脂肪酸相连,脂肪酸链长为 8 至 22 碳,且有特定糖苷键和酯键<sup>[1-4,32-34]</sup>。鼠李糖脂因其独特的结构,使其能有效降低空气/液体、液体/液体、固体/液体等界面的张力。此外,它可乳化多种物质,在较宽的温度、pH 和盐度范围内表现出显著的稳定性和强乳化能力<sup>[35]</sup>;其增溶能力出色,可大幅提高苯乙烯溶解度<sup>[36]</sup>;具有浓度响应性自组装行为<sup>[37]</sup>。脂肽类通常由氨基酸和脂肪酸组成,表面活性素 (surfactin) (图 1(b)) 是环状七脂肽。肽环由 7 个氨基酸组成<sup>[1-4]</sup>,可以通过调节脂肪酸链长度变化调控亲脂性,独特的环状脂肽构型和表面电荷分布使其对煤油等乳化指数增高<sup>[38]</sup>。伊枯草菌素 (iturin) (图 1(c)) 是环状七肽,有多种变体,氨基酸和脂肪酸长度及位置不同。这种疏水脂肪链与亲水肽链的结合使其具有表面活性剂特性,可高效插入病原菌的细胞膜脂质层中,破坏病原菌细胞结构与功能,对不同病菌都具有一定的抗菌活性<sup>[1-4]</sup>。

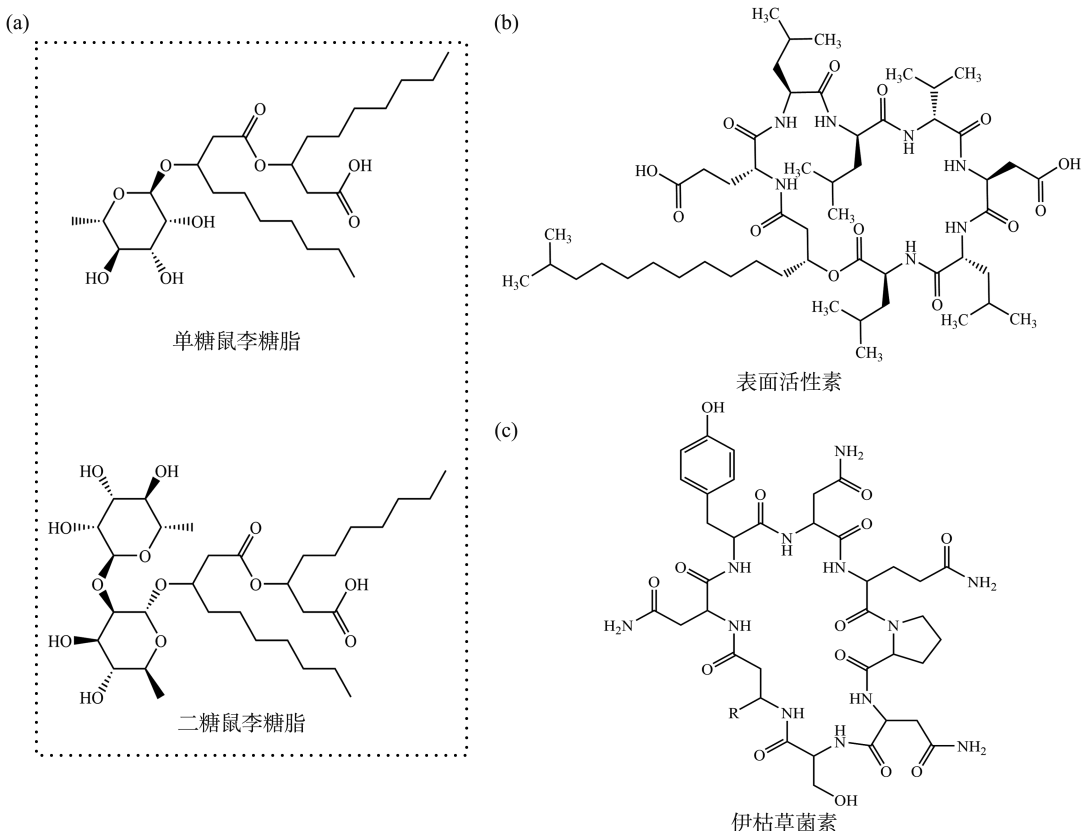


图 1 常见低分子量生物型表面活性剂的化学结构: (a) 单糖和二糖鼠李糖脂; (b) 表面活性素; (c) 伊枯草菌素  
Fig.1 Chemical structure of common low-molecular-weight bioactive agents: (a) monosaccharide and di-rhamnolipid; (b) surfactin; (c) iturin

高分子量生物型表面活性剂涵盖多糖、蛋白质、脂多糖、脂蛋白及其复合物等类别,结构与特性独具特点,具有较好的生物降解性,但是对温度、pH、离子强度等环境因素敏感。多糖类由单糖经糖苷键连接而成,分子链或有分支,其来源不同,结构不同。它们可以利用羟基等官能团紧密吸附于油水、固体等的界面,利用高粘度和空间位阻效应防止乳液相分离,具有良好的乳化性能<sup>[1-2]</sup>。蛋白质类由氨基酸通过肽键连接成多肽链,进一步折叠形成二级、三级空间结构,其中一级结构决定高级结构与功能。其凭氨基酸残基吸附在界面处,通过形成保护膜来提高乳液的稳定性<sup>[1-2]</sup>。此外部分蛋白质还具有抑菌能力,如溶菌酶、牡蛎血淋巴蛋白、鱼精蛋白等。脂多糖类如 emulsan(图2)由脂肪酸或其衍生物的脂质部分和含多种单糖单元的复杂多糖部分组成,可以利用脂质和多糖分别作用吸附于界面处,利用多糖链所带的电荷形成双电层稳定乳液液滴。脂多糖类对生物膜结构、功能具有重要影响且具免疫调节活性<sup>[1-2,39-40]</sup>。脂蛋白类是蛋白质与脂质结合物,脂质与蛋白质疏水区域相连,利于油水界面作用,促进乳液均质化并防止液滴聚集,此外,它们还可以通过界面形成致密吸附层来增强界面膜的机械强度<sup>[1-2,39]</sup>。

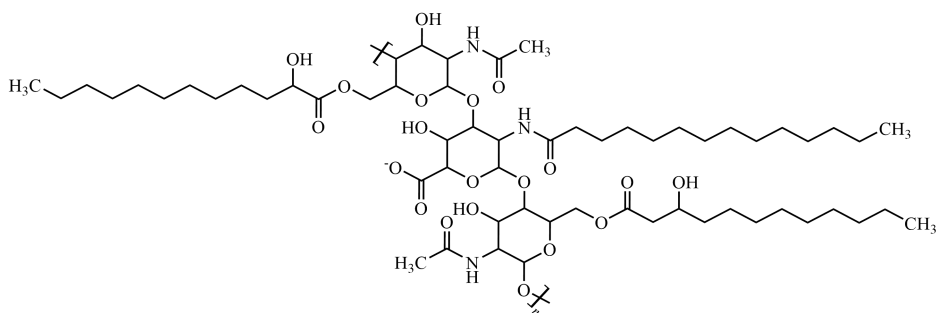


图2 emulsan 的化学结构  
Fig.2 Chemical structure of emulsan

## 2 生物型表面活性剂的合成

生物型表面活性剂合成方法多种多样,主要包括微生物发酵法、酶催化法以及化学合成结合生物技术法。这些方法各有优势和不足。目前研究人员采用不同的策略以尽可能低的成本提高生物型表面活性剂的产量。

### 2.1 微生物发酵法

首先是微生物选择与培养,通常利用表面张力筛选法、血平板法、原油平板筛选、蓝色凝胶平板筛选等策略筛选合适的菌株。比如芽孢杆菌属(枯草芽孢杆菌)可产生脂肽类生物型表面活性剂,假单胞菌属(如铜绿假单胞菌)能合成鼠李糖脂。筛选出高效菌株后,根据其需求调配培养基,通常涵盖葡萄糖、甘油等碳源,铵盐、蛋白胨等氮源及其他微量元素,并严格控制培养条件,一般培养温度在 25~40 °C、pH 在 6~8,通过搅拌或通气保证溶氧<sup>[1-3,41-43]</sup>。发酵方式有分批、补料分批和连续发酵。分批发酵操作简单,但易受底物和产物抑制影响产量;补料分批发酵能适时补充营养避免底物抑制,但操作复杂,多次补料会增加感染杂菌的风险,后期处理复杂;连续发酵可维持稳定环境,适合大规模生产,但对设备工艺要求高。为提升产量、降低成本,可利用糖蜜、废弃食用油等废弃物作廉价底物,运用基因工程技术改造微生物,采用响应面法等方法优化发酵条件和培养基成分,并用超滤、泡沫分离等新方法改进下游加工技术,提高提取效率和纯度<sup>[1-3,41-43]</sup>。

### 2.2 酶催化法

生物型表面活性剂的合成可在细胞外环境中以酶作为生物催化剂进行,尤其以微生物合成生物型表面活性剂过程中的关键酶为甚。其亲水性和疏水性组分既可以通过完全依赖底物的方式形成,也可以通过底物诱导与从头合成相结合的方式生成。例如,可以通过脂肪酶催化脂肪酸与醇类物质的反应,生成具有不同亲疏水性能的酯类生物型表面活性剂,反应条件相对温和,可避免高温高压等剧烈条件对反应体系的影响<sup>[1-3,44-47]</sup>。除了选择合适的酶之外,反应体系的构建对于生物型表面活性剂的合成也至关重要。通常需要选择合适的溶剂体系,以保证底物和酶能够充分接触并发生反应。同时,要对反应的温度、pH 等参数进行精细调控。一般来说,反应温度多在 20~50 °C 之间,pH 则根据酶的最适活性范围进行调整,通常在 5~8 之

间<sup>[1-3,44-47]</sup>。底物的选择也具有多样性。可以选用天然的油脂、脂肪酸以及碳水化合物等作为起始原料。以油脂为例,其来源广泛且价格相对低廉,通过酶催化的改性反应,能够转化为具有良好表面活性的生物型表面活性剂。

酶在催化合成生物型表面活性剂过程中,能够通过特定的作用机制实现不同生物分子间的连接与改性,从而获得具有特殊结构和性能的生物型表面活性剂。例如,转谷氨酰胺酶可催化蛋白质与氨基多糖形成新肽键<sup>[48]</sup>,漆酶和过氧化物酶能氧化含酚和苯胺结构化合物<sup>[49]</sup>,促使蛋白质与阿魏酰化多糖发生交联。

### 2.3 化学合成结合生物技术法

近年来,将化学合成与生物技术相结合来合成生物型表面活性剂已成为一种创新方法。该策略旨在结合化学合成与生物合成的优势,以实现更高效、更具成本效益和更环保的生物型表面活性剂生产。该方法通常包括两种方式,一是利用化学合成方法来构建生物型表面活性剂的特定结构单元,然后使用微生物来完成分子的其余部分,提高生产效率,降低生产成本;二是利用化学合成方法对生物型表面活性剂分子中某些基团进行简单改造,如通过酯化、酰化、糖基化等反应对生物型表面活性剂进行简单改性,以调节其亲水亲油平衡、稳定性和生物活性。Buhori 等<sup>[50]</sup>采用化学-生物整合工艺,先以特定 Ru/CeO<sub>2</sub> 催化剂对聚乙烯废料进行氢解,生成烷烃,再利用 *Gordonia* sp. JW21 对其代谢转化,最终成功将聚乙烯废料转化为生物型表面活性剂,提高了生产效率。Pala 等<sup>[51]</sup>对微生物产生的槐糖脂类生物型表面活性剂进行化学修饰,合成了含不同烷基链的槐糖苷胺及其季铵盐等衍生物,改变了表面活性剂的抗菌活性,其中长链衍生物效果显著。这种方法能够结合化学合成的精确性和生物技术的特异性,实现对产物结构和性能的有效调控。

### 2.4 其他创新方法

在生物型表面活性剂的合成研究中,除微生物发酵、酶催化和化学合成结合生物技术的方法外,一些创新方法也不断涌现。

此外,基因编辑技术也为生物型表面活性剂的合成带来新思路。基因编辑特别是 CRISPR-Cas9 系统,为优化微生物细胞工厂高效生产生物型表面活性剂提供了强大的工具<sup>[1-3,52]</sup>。CRISPR-Cas9 系统是一种基因编辑工具,它利用向导 RNA (gRNA) 将 Cas9 核酸酶引导至基因组中的特定 DNA 序列,对相关基因的敲除、敲入或修饰,从而显著提高生物型表面活性剂的产量和质量<sup>[1-3,52]</sup>。Shi 等<sup>[52]</sup>通过 CRISPR-Cas9 系统等基因编辑技术对 *Starmerella bombicola* 酵母的基因组进行精确改造,以产生单个酸型槐脂。

还有利用极端微生物资源的创新方法。从极端环境中筛选出能够产生特殊生物型表面活性剂的微生物,这些微生物在适应极端条件的过程中形成了独特的代谢途径,所产生的生物型表面活性剂往往具有特殊的结构和性能,在高温、高盐、强酸或强碱等极端环境下仍能保持良好的活性,为生物型表面活性剂的应用拓展了新的领域。

## 3 生物型表面活性剂的应用

生物型表面活性剂作为表面活性剂的一种,与传统化学表面活性剂具有共性,能够降低界面张力,具有乳化、增溶、分散、发泡能力。与此同时,与传统化学表面活性剂相比,生物型表面活性剂又有着显著优势,如更低的毒性、更强的生物可降解性、更好的生物相容性、更强的极端环境耐受性等。总而言之,生物型表面活性剂性能优越,环境友好,在使用过程中能够有效避免对反应物的破坏及对环境的污染,因此,生物型表面活性剂在多领域有重要应用。

在石油工业领域可以降低油粘度、修复污染;在环保领域能够去除重金属与净化废水等;在医药领域中能发挥抗菌、抗癌等功能;在食品工业领域可以用作乳化剂、保鲜剂;在化妆品和农业等领域也发挥作用,如在化妆品中保湿抗菌、乳化油类,农业中促进农药降解,还可用于纳米材料的合成。

### 3.1 石油工业中的应用

生物型表面活性剂可以降低油粘度、提高流动性与采收率;还可用于石油污染土壤和水体修复,增溶、乳化石油烃,促进微生物降解等<sup>[1-3]</sup>。Muneeswari 等<sup>[53]</sup>利用转座子技术提高 *Enterobacter xiangfangensis* STP-3 菌株产表面活性剂的能力和表面活性剂的降解能力,用于处理石油炼油厂油泥,可以极大地改善油泥降解效果。Bezza 等<sup>[54]</sup>利用蜡状芽孢杆菌 SPL-4 产生的脂肽生物型表面活性剂降解污染土壤中的多环芳烃,可显

著提高高分子量的多环芳烃的降解率,改变微生物群落结构,促进微生物生长。Khondee 等<sup>[55]</sup>利用壳聚糖固定的枯草芽孢杆菌 GY19,以废甘油和棕榈油为原料,在搅拌罐发酵罐中进行脂肽生产,可用于石油污染钻屑清洗。Li 等<sup>[56]</sup>通过化学改性制备得到酰胺化的鼠李糖脂,可有效降低吸附损失,提高在高温、高盐环境下的洗油效率,可用于恶劣油藏条件的高效驱油(图3)。

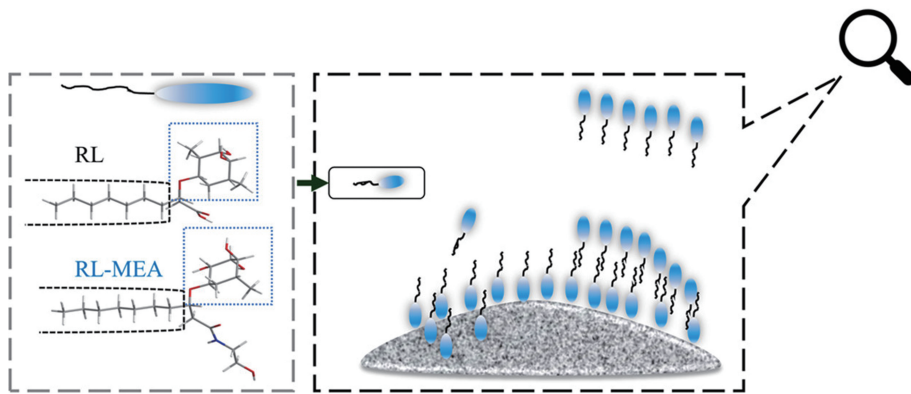


图3 鼠李糖脂酰胺化降低生物型表面活性剂吸附损失,提升洗油效率<sup>[56]</sup>

Fig.3 Rhamnolipid amidation reduces biosurfactant adsorption loss and improves the oil-washing efficiency<sup>[56]</sup>

### 3.2 环保领域中的应用

生物型表面活性剂能去除土壤和水体中的重金属污染物,通过离子交换等作用回收金属;可增强多环芳烃降解,提高其生物利用度,助力污染场地修复;在废水处理中,作为离子收集剂处理含重金属废水,或通过吸附、乳化等净化有机废水<sup>[1-3]</sup>。Cheng 等<sup>[57]</sup>通过共培养尿素水解细菌芽孢杆菌和生物型表面活性剂产生菌假单胞菌协同提升各自的性能,产生微生物粉尘抑制剂,有助于防治煤尘污染。Tang 等<sup>[58]</sup>利用电场驱动污染物迁移实验,系统研究了鼠李糖脂、皂苷及槐糖脂生物型表面活性剂对污泥中重金属去除效率的影响,发现它们均可有效提高去除效率。Portet-Koltalo 等<sup>[59]</sup>利用环脂肽生物型表面活性剂解吸人工污染沉积物中多环芳烃。Perez-Ameneiro 等<sup>[60]</sup>将玉米浆中提取的脂肽生物型表面活性剂加入木质纤维素基生物复合材料,可改善生物复合材料性能,提高对污染物的吸附能力。Ren 等<sup>[61]</sup>采用生物型表面活性剂清洗技术洗脱3类油泥中石油物质,探讨成分和活性剂种类影响,发现鼠李糖脂与槐脂协同可大大提升除油率(图4)。

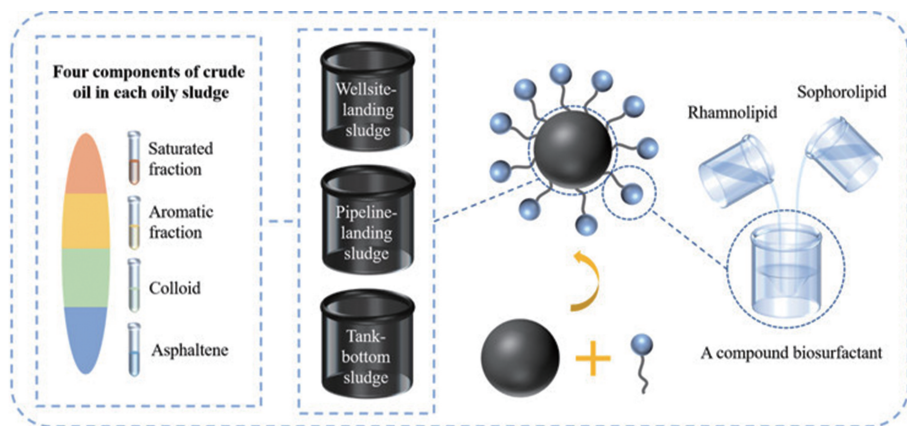


图4 生物型表面活性剂提升除油率<sup>[61]</sup>

Fig.4 Biosurfactants enhance the oil removal rate<sup>[61]</sup>

### 3.3 医药领域中的应用

生物型表面活性剂具有抗菌活性,如脂肽类可抑制多种病菌;部分能抗癌,诱导癌细胞分化凋亡;可作免疫调节剂,调节免疫细胞功能;还能用于药物递送,提高药物溶解性与稳定性,实现靶向给药<sup>[1-3,62-63]</sup>。Wang 等<sup>[64]</sup>构建了一种基于卷曲螺旋脂肽修饰的膜融合药物递送系统,可以有效递送顺铂至耐药癌细胞,提高药物的递送效率,从而有效抑制肿瘤生长。Zhang 等<sup>[65]</sup>设计了一种基于树突状脂肽的病毒模拟物,增强药物在肿瘤部位的积累和细胞摄取,从而实现肿瘤的有效治疗。De la Fuente-Herreruela 等<sup>[66]</sup>利用吡啶二硫键反应制备了一种脂肽,掺入脂质体制剂可有效促进细胞摄取和胞质释放,提高药物递送效果。Adak 等<sup>[67]</sup>通过

固相肽合成法以 Rink 酰胺树脂为固相载体合成 4 种含环烷烃链的脂肽,用于伤口愈合,具有良好的生物相容性且能刺激胶原蛋白和血管的生成(图 5)。

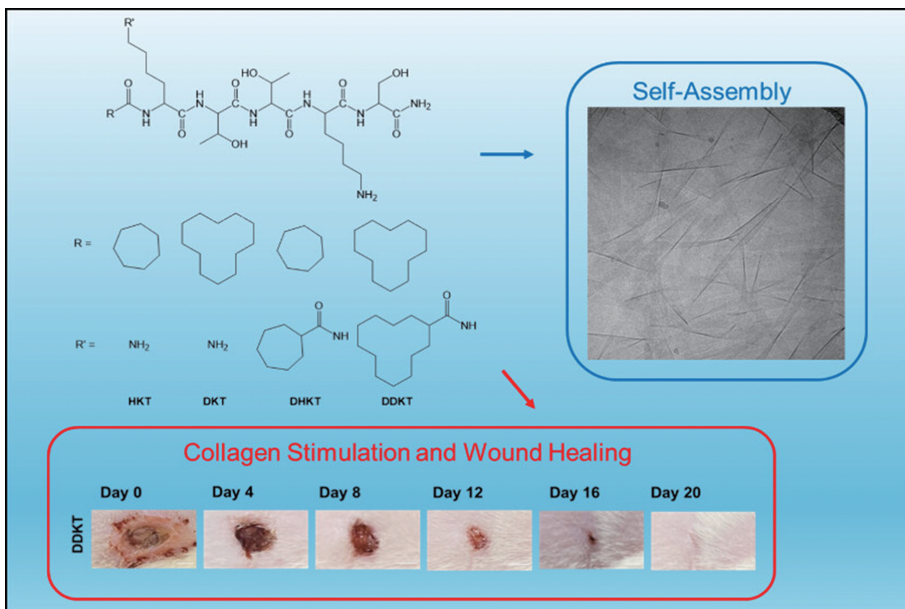


图 5 环烷烃脂肽促进伤口愈合<sup>[67]</sup>

Fig.5 Cycloalkane-based lipopeptides promote wound healing<sup>[67]</sup>

### 3.4 食品工业中的应用

生物型表面活性剂可以为乳化剂,使油水分散均匀,稳定如饮料、乳制品等乳液;可作保鲜剂,抑制微生物生长,延长食品保质期;在食品中能改善食品质地,增强口感与品质<sup>[1-3]</sup>,例如,在酿酒过程中添加酵母甘露糖蛋白可以改善葡萄酒品质<sup>[68]</sup>;疏水蛋白 HFBII(一种 II 类疏水素)可用于制备空气填充乳液,可以有效降低乳液中的脂肪含量<sup>[69]</sup>。

### 3.5 其他领域的应用

在化妆品中,生物型表面活性剂有利于保湿、抗菌、乳化;农业上,可以促进农药降解、防治植物病害、提高土壤质量;还可用于纳米材料合成,控制纳米颗粒的生长与分散<sup>[1-3]</sup>。Villanueva 等<sup>[70]</sup>研究了一种具有不对称疏水核心的糖脂 ohmlin,其可以在熔点以下自组装形成纳米管。Bac 等<sup>[71]</sup>利用海藻糖糖脂与极性分子之间的氢键作用,取代一半的可电离脂质来形成稳定的脂质纳米颗粒结构,可显著降低其细胞及器官毒性(图 6)。

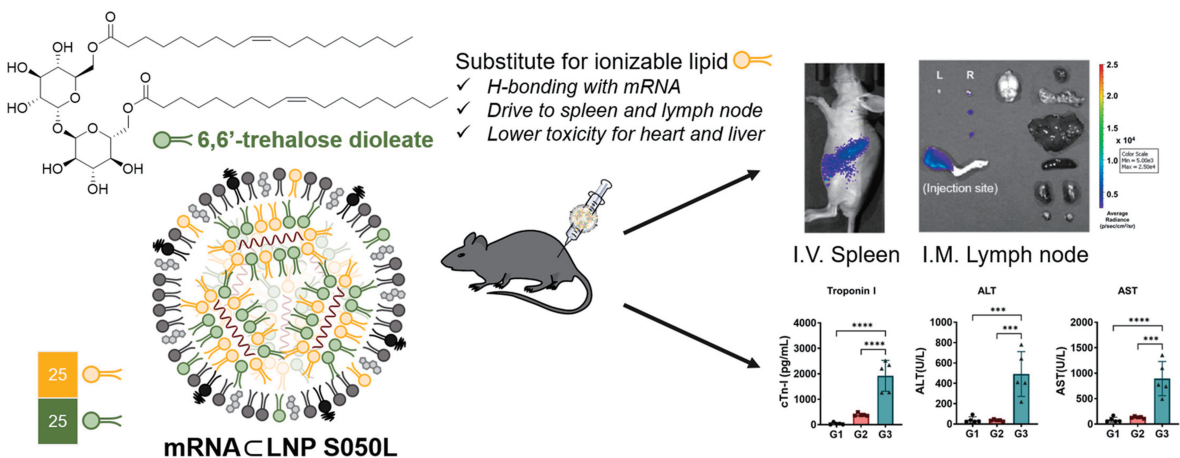


图 6 海藻糖脂取代可电离脂质降低脂质纳米颗粒毒性<sup>[71]</sup>

Fig.6 Trehalose glycolipids replace ionizable lipids to reduce the toxicity of lipid nanoparticles<sup>[71]</sup>

## 4 总结与展望

生物型表面活性剂是由微生物、植物或动物代谢过程中产生的具有两性结构的化合物,按照分子量的

大小,可分为低分子量和高分子量两类。低分子量生物型表面活性剂可以有效降低界面张力,高分子量的具有较强的吸附能力。生物型表面活性剂的合成方法主要包括微生物发酵法、酶催化法及化学与生物技术结合法等,各有优势与特点。生物型表面活性剂广泛应用于石油、环保、医药、食品、化妆品及农业等领域,从提升石油采收率到治理污染物、递送药物、保鲜食品等,具有广阔的应用前景。

化学生物技术与化学工艺的进步会给生物型表面活性剂研究带来新的机遇。有望通过优化合成方法和降低成本来提高生物型表面活性剂的产量及质量,如利用基因编辑技术调控微生物代谢、开发高性能生物催化剂及探索新合成路径。未来其应用将拓展至新能源、生物传感器和智能材料等领域。

#### 参考文献:

- [1] JAHAN R, BODRATTI A M, TSIANOU M, et al. Biosurfactants, natural alternatives to synthetic surfactants: physicochemical properties and applications[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 275:102061.
- [2] KUGAJI M, RAY S K, PARVATIKAR P, et al. Biosurfactants: a review of different strategies for economical production, their applications and recent advancements[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2025, 337:103389.
- [3] CAROLIN C F, KUMAR P S, NGUEAGNI P T. A review on new aspects of lipopeptide biosurfactant: types, production, properties and its application in the bioremediation process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 407:124827.
- [4] GAUDIN T, LU H L, FAYET G, et al. Impact of the chemical structure on amphiphilic properties of sugar-based surfactants: a literature overview[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, 270:87-100.
- [5] MCCLURE C D, SCHILLER N L. Effects of *Pseudomonas aeruginosa* rhamnolipids on human monocyte-derived macrophages [J]. *Journal of Leukocyte Biology*, 1992, 51(2):97-102.
- [6] ANDRÄ J, RADEMANN J, HOWE J, et al. Endotoxin-like properties of a rhamnolipid exotoxin from *Burkholderia (Pseudomonas) plantarii*: immune cell stimulation and biophysical characterization[J]. *Biological Chemistry*, 2006, 387(3):301-310.
- [7] ŘEZANKA T, SIRISTOVA L, SIGLER K. Rhamnolipid-producing thermophilic bacteria of species *Thermus* and *Meiothermus* [J]. *Extremophiles*, 2011, 15(6):697.
- [8] FRANZETTI A, GANDOLFI I, BESTETTI G, et al. Production and applications of trehalose lipid biosurfactants [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2010, 112(6):617-627.
- [9] GAO P K, LI G Q, LI Y S, et al. An exogenous surfactant-producing *Bacillus subtilis* facilitates indigenous microbial enhanced oil recovery[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7:186.
- [10] LI J F, LI H F, LIANG S K, et al. Characterization of sophorolipids from the yeast *Starmerella bombicola* O-13-1 using waste fried oil and cane molasses as substrates[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2018, 119:267-275.
- [11] TAKAHASHI M, MORITA T, WADA K, et al. Production of sophorolipid glycolipid biosurfactants from sugarcane molasses using *Starmerella bombicola* NBRC 10243[J]. *Journal of Oleo Science*, 2011, 60(5):267-273.
- [12] DAVEREY A, PAKSHIRAJAN K, SUMALATHA S. Sophorolipids production by *Candida bombicola* using dairy industry wastewater[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2011, 13(3):481-488.
- [13] MORITA T, KONISHI M, FUKUOKA T, et al. Efficient production of di- and tri-acylated mannosylerythritol lipids as glycolipid biosurfactants by *Pseudozyma parantarctica* JCM 11752<sup>T</sup>[J]. *Journal of Oleo Science*, 2008, 57(10):557-565.
- [14] MORITA T, OGURA Y, TAKASHIMA M, et al. Isolation of *Pseudozyma churashimaensis* sp. nov., a novel ustilaginomycetous yeast species as a producer of glycolipid biosurfactants, mannosylerythritol lipids[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2011, 112(2):137-144.
- [15] KONISHI M, NAGAHAMA T, FUKUOKA T, et al. Yeast extract stimulates production of glycolipid biosurfactants, mannosylerythritol lipids, by *Pseudozyma hubeiensis* SY62[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2011, 111(6):702-705.
- [16] FARIA N T, MARQUES S, FONSECA C, et al. Direct xylan conversion into glycolipid biosurfactants, mannosylerythritol lipids, by *Pseudozyma Antarctica* PYCC 5048<sup>T</sup>[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2015, 71:58-65.
- [17] MORITA T, FUKUOKA T, IMURA T, et al. Mannosylerythritol lipids: production and applications[J]. *Journal of Oleo Science*, 2015, 64(2):133-141.
- [18] SANDRIN C, PEYPOUX F, MICHEL G. Coproduction of surfactin and iturin A, lipopeptides with surfactant and antifungal properties, by *Bacillus subtilis*[J]. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 1990, 12(4):370-375.
- [19] BOUCHARD-ROCHETTE M, MACHRAFI Y, COSSUS L, et al. *Bacillus pumilus* PTB180 and *Bacillus subtilis* PTB185:

- production of lipopeptides, antifungal activity, and biocontrol ability against botrytis cinerea[J]. *Biological Control*, 2022, 170:104925.
- [20] SLIVINSKI C T, MALLMANN E, DE ARAÚJO J M, et al. Production of surfactin by *Bacillus pumilus* UFPEDA 448 in solid-state fermentation using a medium based on okara with sugarcane bagasse as a bulking agent[J]. *Process Biochemistry*, 2012, 47(12):1848-1855.
- [21] STANSLY P G, SCHLOSSER M E. Studies on polymyxin: isolation and identification of *Bacillus polymyxa* and differentiation of polymyxin from certain known antibiotics[J]. *Journal of Bacteriology*, 1947, 54(5):549-556.
- [22] SRIRAM M I, GAYATHIRI S, GNANASELVI U, et al. Novel lipopeptide biosurfactant produced by hydrocarbon degrading and heavy metal tolerant bacterium *Escherichia fergusonii* KLU01 as a potential tool for bioremediation[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(19):9291-9295.
- [23] BEZZA F A, CHIRWA E M N. Production and applications of lipopeptide biosurfactant for bioremediation and oil recovery by *Bacillus subtilis* CN2[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2015, 101:168-178.
- [24] WANG F H, GUO Z H, YANG Z X, et al. Utilization of soybean oil waste for a high-level production of ceramide by a novel phospholipase C as an environmentally friendly process[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(10):3228-3238.
- [25] BODOUR A A, GUERRERO-BARAJAS C, JIORLE B V, et al. Structure and characterization of flavolipids, a novel class of biosurfactants produced by *Flavobacterium* sp. strain MTN11[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70(1):114-120.
- [26] JOHRI A K, YALPANI M, KAPLAN D L. Incorporation of fluorinated fatty acids into emulsions by *Acinetobacter calcoaceticus* RAG-1[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2003, 16(2):175-181.
- [27] KAPLAN N, ROSENBERG E. Exopolysaccharide distribution and bioemulsifier production by *Acinetobacter calcoaceticus* BD4 and BD413[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1982, 44(6):1335-1341.
- [28] ROSENBERG E, RUBINOVITZ C, GOTTLIEB A, et al. Production of biodispersant by *Acinetobacter calcoaceticus* A2[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1988, 54(2):317-322.
- [29] ANDREW M, JAYARAMAN G. Production optimization and antioxidant potential of exopolysaccharide produced by a moderately halophilic bacterium *Virgibacillus dokdonensis* VITP14[J]. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 2025, 55(1):112-130.
- [30] RAMANI K, JAIN S C, MANDAL A B, et al. Microbial induced lipoprotein biosurfactant from slaughterhouse lipid waste and its application to the removal of metal ions from aqueous solution[J]. *Colloids and Surfaces B:Biointerfaces*, 2012, 97:254-263.
- [31] CAMPOS J M, STAMFORD T L M, SARUBBO L A. Characterization and application of a biosurfactant isolated from *Candida utilis* in salad dressings[J]. *Biodegradation*, 2019, 30(4):313-324.
- [32] COHEN R, EXEROWA D. Surface forces and properties of foam films from rhamnolipid biosurfactants[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2007, 134:24-34.
- [33] BAI L, MCCLEMENTS D J. Formation and stabilization of nanoemulsions using biosurfactants: rhamnolipids[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2016, 479:71-79.
- [34] GARCIA M T, RIBOSA I, KOWALCZYK I, et al. Biodegradability and aquatic toxicity of new cleavable betainate cationic oligomeric surfactants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 371:108-114.
- [35] SONBHADRA S, MISHRA A, PANDEY L M. Nature's marvels: exploring the multifaceted applications of surfactin and rhamnolipids[J]. *Langmuir*, 2025, 41(6):3731-3743.
- [36] ASNACHINDA E, KHAMPAENG C, SUTTHINON P, et al. Enhancement of styrene adsorption and solubilization by rhamnolipid biosurfactant-linker mixtures onto an aluminum oxide surface[J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2015, 18(3):439-444.
- [37] BACCILE N, POIRIER A, PEREZ J, et al. Self-assembly of rhamnolipid bioamphiphiles: understanding the structure-property relationship using small-angle X-ray scattering[J]. *Langmuir*, 2023, 39(27):9273-9289.
- [38] LONG X W, HE N, HE Y K, et al. Biosurfactant surfactin with pH-regulated emulsification activity for efficient oil separation when used as emulsifier[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241:200-206.
- [39] LÓPEZ-VALENCIA L, MOYA M, ESCUDERO B, et al. Bacterial lipopolysaccharide forms aggregates with apolipoproteins in male and female rat brains after ethanol binges[J]. *Journal of Lipid Research*, 2024, 65(3):100509.
- [40] ZHANG W K, LIU S S, KONG L, et al. Lipopolysaccharide-induced persistent inflammation ameliorates fat accumulation by

- promoting adipose browning *in vitro* and *in vivo*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 252:126511.
- [41] AL-BAHRY S N, AL-WAHAIBI Y M, ELSHAFIE A E, et al. Biosurfactant production by *Bacillus subtilis* B20 using date molasses and its possible application in enhanced oil recovery[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, 81: 141-146.
- [42] PIEDRAHÍTA-AGUIRRE C A, ALEGRE R M. Production of lipopeptide iturin a using novel strain *Bacillus* iso 1 in a packed bed bioreactor[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2014, 3(2):154-158.
- [43] FEMINA CAROLIN C, SENTHIL KUMAR P, CHITRA B, et al. Stimulation of *Bacillus* sp. by lipopeptide biosurfactant for the degradation of aromatic amine 4-Chloroaniline[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 415:125716.
- [44] WU T F, LIU C M, HU X T. Enzymatic synthesis, characterization and properties of the protein-polysaccharide conjugate; a review[J]. *Food Chemistry*, 2022, 372:131332.
- [45] ZHOU Y, PETROVA S P, EDGAR K J. Chemical synthesis of polysaccharide – protein and polysaccharide – peptide conjugates; a review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 274:118662.
- [46] THAKUR V, BAGHMARE P, VERMA A, et al. Recent progress in microbial biosurfactants production strategies; applications, technological bottlenecks, and future outlook[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 408:131211.
- [47] BANAT I M, FRANZETTI A, GANDOLFI I, et al. Microbial biosurfactants production, applications and future potential [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 87(2):427-444.
- [48] LIU Y H, LIN S, ZHANG X Q, et al. A novel approach for improving the yield of *Bacillus subtilis* transglutaminase in heterologous strains[J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2014, 41(8):1227-1235.
- [49] ISASCHAR-OVDAT S, FISHMAN A. Crosslinking of food proteins mediated by oxidative enzymes; a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 72:134-143.
- [50] BUHORI A, LEE J, CHA M J, et al. Synthesis of biosurfactants from polyethylene waste via an integrated chemical and biological process[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(5):113322.
- [51] PALA M, CASTELEIN M G, DEWAELE C, et al. Tuning the antimicrobial activity of microbial glycolipid biosurfactants through chemical modification[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2024, 12:1347185.
- [52] SHI Y B, ZHANG L H, ZHANG M, et al. A CRISPR-Cas9 system-mediated genetic disruption and multi-fragment assembly in *Starmarella bombicola*[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2022, 11(4):1497-1509.
- [53] MUNNEESWARI R, IYAPPAN S, SWATHI K V, et al. Biocatalytic lipoprotein bioamphiphile induced treatment of recalcitrant hydrocarbons in petroleum refinery oil sludge through transposon technology[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 431:128520.
- [54] BEZZA F A, CHIRWA E M N. The role of lipopeptide biosurfactant on microbial remediation of aged polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)-contaminated soil[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 309:563-576.
- [55] KHONDEE N, SUKSOMBOON B, KHUN-ARWUT N, et al. Scaled-up production and recovery of lipopeptide biosurfactant and its application for washing petroleum-contaminated drill cuttings [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(6):114605.
- [56] LI Z Z, LIN J Z, WANG W D, et al. Effect of rhamnolipid amidation on biosurfactant adsorption loss and oil-washing efficiency[J]. *Langmuir*, 2022, 38(8):2435-2444.
- [57] CHENG W M, LIU J D, FENG Y, et al. Study on the cooperation mechanism of urea-hydrolysis bacteria and biosurfactant bacteria for dust suppression[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 480:148008.
- [58] TANG J, HE J G, XIN X D, et al. Biosurfactants enhanced heavy metals removal from sludge in the electrokinetic treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334:2579-2592.
- [59] PORTET-KOLTALO F, AMMAMI M T, BENAMAR A, et al. Investigation of the release of PAHs from artificially contaminated sediments using cyclolipopeptidic biosurfactants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 261:593-601.
- [60] PEREZ-AMENEIRO M, VECINO X, CRUZ J M, et al. Wastewater treatment enhancement by applying a lipopeptide biosurfactant to a lignocellulosic biocomposite[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 131:186-196.
- [61] REN H Y, HOU D Y, ZHOU S Y, et al. Study on the effect of petroleum components on the elution of oily sludge by a compound biosurfactant[J]. *Langmuir*, 2022, 38(6):2026-2037.
- [62] LIU J, KANG R, TANG D L. Lipopolysaccharide delivery systems in innate immunity[J]. *Trends in Immunology*, 2024, 45(4):274-287.