生物基表面活性剂槐糖脂工业化生产及应用

陈伟哲，张迷敏，沈兵兵，张利萍
（广州立白科技集团有限公司，广东广州，510140）

DOI:10.61369/CDCST.2025040025

摘　　要： 文章系统综述了生物基表面活性剂槐糖脂（Sophorolipids，SLs）的工业化生产关键技术及其在日化领域的应用前景。重点分析了高产菌株选育、发酵工艺优化及分离纯化等产业化挑战与对策，并探讨了SLs凭借其绿色环保特性及抗菌、抗炎等多重生物活性，在护肤、家居清洁、母婴及宠物护理产品中的创新应用，为推动日化行业绿色、高值化转型提供理论参考。

关 键 词： 生物基表面活性剂；槐糖脂；工业化生产；应用

陈伟哲

作者简介： 陈伟哲，生物与医药硕士，核心技术研究工程师，专注于合成生物学与精密发酵工艺的创新研发，致力于推动生物基材料的绿色智造与产业化应用。E-mail：superchenweizhe@163.com。

1. 日化行业变革与槐糖脂的平台型价值

当前，全球日化行业正经历一场由可持续发展理念与消费升级趋势共同驱动的深刻变革。生物基表面活性剂在洗涤剂、个人护理产品等化学品中的使用越来越多，这推动了该市场的增长，在许多应用中，这是由更严格的法规和消费者对“绿色和可持续”产品日益增长的需求所驱动的。许多公司还将可持续发展作为核心价值观纳入其公司目标和价值观，这也给实现这些目标带来了来自内部的压力[1]。一方面，日益严峻的环境问题与“双碳”目标对行业提出了绿色转型的硬性要求，包括减少对化石原料的依赖、降低生产过程中的碳足迹、采用可生物降解成分及环保包装等[2]。另一方面，新一代消费者不再满足于产品的基础清洁与护理功能，他们追求成分天然安全、功效精准多元、具备健康附加值且符合个人价值观的产品。这使得传统日化企业面临双重压力：既要通过技术创新实现环保合规与成本控制，又要通过产品创新满足瞬息万变的市场需求，破解产品同质化内卷的困局。在这一背景下，开发兼具绿色属性与卓越功效的新型核心原料，已成为推动行业迈向高质量发展的关键突破口。

槐糖脂（Sophorolipids，SLs），作为一种由假丝酵母菌发酵产生的生物表面活性剂，正展现出成为行业变革核心驱动力的巨大潜力，其价值可被定义为“平台型生物分子”。这一概念强调其并非功能单一的成分，而是一个集“绿色本源”与“多功能集成”于一体的创新平台。其“绿色本源”体现在整个生命周期：它以可再生碳源（如葡萄糖、油脂）为底物，通过生物制造获得，从根本上减少对石油资源的依赖；产品本身具有优异的生物降解性和低生态毒性，完美契合循环经济理念。更引人注目的是其“多功能集成”特性：它不仅具备表面活性（乳化、增溶、润湿），更被证实拥有广谱抗菌、抗生物膜、抗炎、舒缓修复等多重生物活性。这种独一无二的属性组合，使SLs有望同时应对行业面临的绿色与功效双重挑战，成为驱动下一轮产品创新的核心引擎[3]。但与传统表面活性剂相比，生物表面活性剂的表活性质偏弱，且总体用量仍然非常小，源于它们的高生产成本，限制了商业上可行的应用数量。这需要通过提高生产规模、生产效率和基质成本来解决[4]。

2. 槐糖脂的绿色本源

SLs是一种由酵母菌如Starmerella bombicola（S. bombicola）发酵产生的糖脂类生物表面活性剂，其特征分子结构由一个亲水性的槐糖（双糖）基和（ω/ω-1）羟基化脂肪酸尾部组成[5]。酸型（Acidic）和内酯型（Lactonic）为通用SLs结构[6]。像SLs这种两亲的结构赋予了其表面活性，能显著降低表面张力，并具有良好的乳化[7]、润湿[8]和增溶等性能[9]。更重要的是，与传统的石油基或化学合成表面活性剂相比，SLs最突出的优势在于其固有的绿色属性[10]。它易于被环境中的微生物快速彻底地降解，最终分解为二氧化碳和水，无生态累积风险，对水生生物和土壤的毒性极低。这种“从摇篮到摇篮”的环保特性，使其成为日化行业实现可持续发展目标的理想原料选择，完全契合全球对绿色化学品的要求。

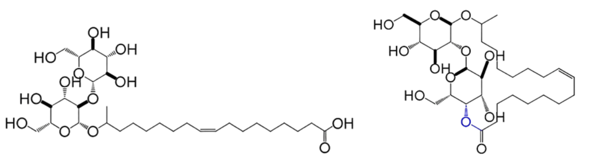


图1 Sophorolipids特征结构 [6]

2.1 清洁、乳化、增溶作用

SLs作为生物表面活性剂所具有的两亲分子结构，使其能够在界面富集，降低表面张力，从而发挥清洁、乳化和增溶等功能 [11]。在清洁类产品中，SLs有助于去除油脂和污垢，且因其分子结构较为温和，对皮肤屏障的影响相对较小 [12]。在乳化应用中，SLs可参与稳定水油界面，辅助形成乳液体系 [13]，适用于部分护肤品和化妆品配方。此外，SLs也具备一定的增溶能力 [9]，有助于提升配方中部分功能性成分的溶解度 [14,15]。这些性质为SLs在日化产品中的应用提供了基础，并为拓展其多功能性创造了条件。

2.2 抗菌与抗生物膜活性：机理及其在防腐、去污中的应用潜力

超越传统表面活性剂的功能局限，SLs展现出显著的生物活性，首推其广谱的抗菌和抗生物膜能力 [16]。其抗菌机制主要通过破坏微生物细胞膜完整性实现。SLs可插入细胞膜磷脂双分子层，增加膜通透性，导致细胞内容物泄漏和死亡 [17,18]。更为重要的是，SLs能有效抑制和破坏生物膜的形成。它可通过干扰群体感应（Quorum sensing）抑制细菌的黏附与聚集，并通过渗透和分解生物膜基质，清除已形成的生物膜 [19]。这一特性使其在防腐领域（替代传统防腐剂，降低刺激风险）和深度清洁领域（清除顽固生物污垢）具有巨大应用潜力，为开发“既能清洁表面又能消除微生物隐患”的新一代产品提供了可能。

2.3 抗炎与舒缓活性：抑制NF-κB等炎症通路，缓解皮肤刺激的机制

SLs的另一重要生物活性在于其卓越的抗炎与舒缓修复能力，这使其从单纯的清洁成分升华为功能性活性成分。研究表明，SLs能够有效抑制炎症核心通路NF-κB的活化，减少下游炎症因子（如TNF-α, IL-6, IL-8）的表达和释放，从分子层面阻断炎症发生。同时，它还能通过调控其他信号通路（如MAPK）共同发挥抗炎效应 [20]。在皮肤受到外界刺激时，SLs能迅速缓解红肿、热痛等不适症状，修复皮肤屏障功能。特别值得注意的是，SLs在与微生物相互作用（如抑制其生长）的同时，还能干预其致病性——它不仅能清除微生物本身，还可能对其释放的致炎因子（如内毒素）具有中和作用 [21]，这一独特机制可能为理解其全面功效和后续应用创新开辟了新的视角。

2.4 绿色清洁与洗涤剂：替代石油基表活，提升产品绿色指数并附加温和性

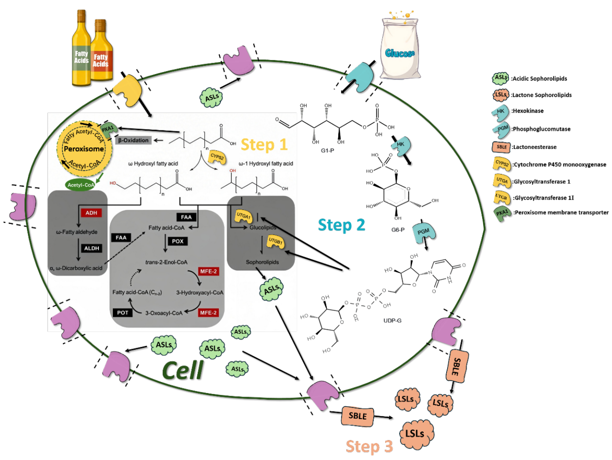
SLs的跨界应用正不断拓展日化行业的创新边界。在绿色清洁与洗涤剂领域，SLs作为石油基表面活性剂的理想替代品，展现出显著优势。其表面活性和乳化能力能够有效去除各类油污，同时100%生物降解的特性极大降低了环境负荷 [22]。更值得关注的是，SLs固有的湿润性和温和性彻底解决了传统清洁剂长期使用导致皮肤屏障受损的问题 [23,24]，真正实现了清洁效果与肌肤健康的高度统一，为打造新一代”洁净且护理”的绿色洗涤产品提供了核心支持。

3. 槐糖脂的工业化进程：从实验室发酵到规模化制造的技术突破

3.1 分子改造与修饰

SLs的生产工艺经历了从实验室探索到规模化制造的显著演进。研究集中于筛选和改造高产菌株，通过诱变育种和代谢工程策略（如过表达关键酶基因、敲除副产物竞争途径 [25-27]，成功提升了菌株的生产能力与产物特异性。SLs的合成路径分为两个阶段（图2）。首先菌体以葡萄糖作为能源物质进行生长代谢繁殖，当细胞进入生长稳定期后，细胞开始合成SLs。主要涉及以下步骤：1.脂肪酸的氧化；2.葡萄糖基的转移；3.SLs的内酯化。过程如下：脂肪酸在细胞色素氧化酶CYP52M1的催化下进行ω-氧化产生ω或ω-1羟基脂肪酸，接着在葡萄糖基转移酶UGTA1的催化下，将UDP-葡萄糖转移至羟基脂肪酸的羟基位置形成葡萄糖酯；再在葡萄糖基转移酶UGTB1的催化下，添加另一个葡萄糖基形成酸型SLs（非乙酰化）。该酸型SLs可进一步在酰基化酶作用下形成，单乙酰或双乙酰酸型SLs，再在转运蛋白作用下转移至胞外，最后经内酯化酶SBLE催化。形成含有不同取代基的内酯型SLs [28]。Ma等 [29] 对野生型*S. bombicola*进行ARTP诱变系统等诱变育种方法筛选出内酯SLs产量高达51.95 g/L，酸性SLs产量为68.75 g/L，总SLs的产量提高30%以上。需要注意的是，诱变处理易导致对细胞产生毒性，干扰正常生理功能；诱变方向随机，需通过大规模筛选以鉴别目标菌株；且突变频率较

低，需处理大量样本方能获得有益变异。此外，该方法存在机理单一、突变类型有限等问题，限制了优良菌种的选育效率。Saerens等[30]通过直接修饰SLs合成途径基因 *ugtA* 提高SL在 *S. bombicola* 中的合成产量。Ciesielska等[31]在 *S. bombicola* 的分泌蛋白中鉴定出了负责内酯化的酶SBLE，发现该酶主要催化由酸型SLs到内酯型SLs的生成，敲除该酶获得的突变菌株(Δsble)仅产生酸型SLs，并且能够提高总体SLs含量。Li等[32]通过敲除 *alcs* 基因（长链脂肪酸合成酶）发现最终产物是以中链形式组成的酸型SLs，几乎没有内酯型SLs。



注：Step 1：脂肪酸的氧化；Step 2：葡萄糖基的转移；Step 3：SLs的内酯化；G6−P：Glucose 6−Phosphate（葡萄糖6−磷酸）；G1−P：Glucose 1−Phosphate（葡萄糖1−磷酸）；UDP−G：尿苷二磷酸葡萄糖（Uridine Diphosphate Glucose）；FAA：脂酰CoA合成酶（Fatty acyl−CoA synthase）；POX：脂酰辅酶A氧化酶（Fatty−acyl−CoA oxidase）；POT：3−酮脂酰辅酶A硫解酶（3−Ketoacyl CoA thiolase）；ALDH：乙醛脱氢酶（Aldehyde dehydrogenase）。

图2 *Starmerella bombicola* 脂肪酸代谢途径及其与SLs生物合成[28]

敲除 *fao1* 基因（长链脂肪醇氧化酶FAO）可以使十四烷醇衍生的SLs产量提高16.0%~46.2%[33]。有研究并获得专利授权[34]PXA1基因（脂肪酸转运膜蛋白）敲除菌株发酵后总SLs产量提高了25%左右，当基因敲除后，阻断了脂肪酸的β-氧化，积累了脂肪酸，使代谢流向脂肪酸的ω-氧化，使总SLs产量提高。Ma等[35]敲除 *pxa1* 获得工程改造菌，使SLs产量提高50.5%，过表达 *cyp52m1*（细胞色素P450单加氧酶）使SLs产量提高98.8%。*bro1* 基因编码的Bro1在调节SLs生物合成中发挥关键作用，Liu等[36]发现Bro1酶调节578个基因的表达，即调节整个基因组中总基因的12.8%，缺失 *bro1* 基因使得 *S. bombicola* 几乎不产生SLs。所属广州立白企业集团研发中心的Dr. Zhang及其团队在 *S. bombicola* 基因改造提高SLs产量技术上发表多项专利[37-40]。最近，该团队[28]通过敲除 *mfe2*、*adh1* 和 *adh2* 基因发现以亚油酸和油酸（C18）为脂质来源时，SLs产量均得到提高，特别的是，ADH1突变体显著提高了SLs产量，但以月桂酸（C12）为脂肪酸底物来源时无显著性差异，并结合利用Alpha Fold 3、分子对接和分子动力学模拟的计算结构分析酶功能及其底物偏好性，为突变体中SL产量的提高提供了机制解释。

3.2 发酵工艺优化

发酵工艺的优化是另一大突破，通过采用分批补料[41]、高细胞密度发酵[42]等策略。工业化规模的SLs生产的商业化将需要利用替代原料，以及发酵生产率方面的其他进步[4]。开发并利用工农食品废弃物（如废弃油脂[43,44]或柴油[45]、餐后残渣[46]、食物加工边角料[47]和糖蜜[48]等）作为低成本底物[49]，有效降低了原材料成本，实现了资源的循环利用[4]。Jia团队[50]构建了一种新型实验室规模生物反应器（DVDSB）气液流动的三维计算流体动力学（CFA）模拟，该生物反应器包含双通气管和双筛板生物反应器（DVDSB）用于SLs生产，发酵320h后产量显著提高至484 g/L。Van 等[51]使用脂肪醇作为补料发酵生产Bola型SLs 。Feng 等人[52]采用分段控制发酵温度响，变温发酵与恒温发酵相比，SLs产量提高了28.8%。Kim等[53]通过分批补料发酵使摇瓶SLs产量由6g/L提高到28.6 g/L，发酵罐产量显著提高787%。Liu等[54]采用补料分批发酵策略，在发酵的36、72、120和144h定期向发酵液中补充30 g/L菜籽油，直至发酵192h，SL产量达到131.2 g/L，酸型SLs占84.7%。Xu等[55]制定了基于细胞代谢能力需求的分步供氧调节策略，实现“细胞按需供氧”，以优化能源消耗控制。最后，通过将半连续发酵模式与原位分离技术相结合，与补料分批发酵相比提高了SLs的生产力和产量，增加了40.2%和18.7%。Ma[35]使用补料分批发酵模式，在48h后补加37.5 g/L菜籽油，使最终SLs产量由67 g/L提高232 g/L。这些技术进步共同推动了SLs实验室向吨级工业化生产迈进，为其大规模应用奠定了坚实的基础。

3.3 分离纯化

下游分离纯化是SLs实现工业化应用的关键环节之一。目前，从发酵液中高效提取SLs仍面临一定的技术挑战，相关工艺仍在持续优化中。研究表明，通过调控发酵过程可初步降低后续分离难度，例如合理控制原料投加量，有助于减少未利用底物的积累，从而简化后续处理步骤[56]。在初步回收方面，有研究探索了基于重力分离的粗

产物收集方法，为发酵罐内直接回收提供了可行思路[57]。在纯化方法方面，不同工艺对SLs的组成可能产生影响。例如，酸沉淀法可能导致酸型SLs比例升高，而溶剂萃取法则对酸型与内酯型比例的影响较为均衡[58]。大孔树脂[59]、反相固相萃取[60]等方法也被尝试用于SLs的分离，并在一定程度上实现了不同结构组分的区分。有研究比较了正相与反相树脂的纯化效果，发现反相材料具有较好的回收率[61]。此外，也有学者通过化学修饰手段制备SLs衍生物，并配合逐步提取工艺，实现了较高纯度的产物回收[62]。目前，SLs的分离纯化主要使用膜分离法（超滤-纳滤）。SLs分离纯化研究仍处于工艺探索与优化阶段，未来需进一步推动产学研结合，注重开发经济、绿色且适用于规模化生产的下游处理技术，为SLs的商业化应用提供更有力的支撑。

3.4 工业化核心挑战与对策

首当其冲的是成本控制问题，尽管采用了廉价底物，但其总体生产成本仍高于传统表面活性剂，这需要通过系统性的代谢工程和过程集成优化来进一步突破[63]。其次是规模化生产的稳定性挑战，包括发酵过程中菌株的遗传稳定性、杂菌污染防控以及批次间产品质量的一致性控制，这需要依靠先进的过程监控与自动化控制技术来解决[64]。

4. 槐糖脂在日化产品中的应用前景

4.1 洗涤、个人护理及化妆品

在个人护理市场，绿色表面活性剂正在引发一场产品升级革命。SLs基于其生物降解、清洁潜力及多重生物活性被国内外诸多日化企业应用在洗涤配方中。例如，立白公司在其洗碗机相关产品中使用了SLs[65]；法国公司Soliance（现归属奇华顿）推出了一种含有高浓度SLs的天然增溶剂。SLs在棉织物的抗菌清洗中同样具有应用潜力[66]。SLs可成为微生态护肤领域的理想成分，通过选择性抑制有害菌的同时保护有益菌群，有效维持皮肤微生态平衡[67]。在头皮护理方面，SLs不仅能温和清洁头皮，还能通过抗炎和抗瘙痒机制缓解头皮敏感问题，改善头屑和瘙痒等困扰。联合利华与赢创均已获得专利，涉及将SLs用作低刺激性的泡沫型洗涤成分，并应用于肌肤与秀发清洁产品的配方中。在口腔护理领域，SLs的抗菌和抗生物膜特性能够有效抑制致龋菌，同时其抗炎作用有助于改善牙龈健康[68,69]，为开发全方位口腔健康产品提供新方案。

4.2 母婴与宠物护理等新兴领域

传统日化范畴，SLs在新兴领域同样展现出巨大潜力。宠物护理市场对安全性和温和性要求极高，目前已有专利公开SLs添加型产品能够为宠物提供温和清洁的同时，通过其抗菌和抗炎特性缓解皮肤问题，满足宠物主对高端护理产品的需求。SLs为免疫系统尚未成熟或敏感的群体提供额外保护层，产品安全宣称更具说服力。在母婴市场，SLs的应用体现出特殊的人群适配价值。赢创公司开发的赢创槐糖脂REWOFERM® SL ONE产品，针对婴幼儿皮肤屏障薄弱，免疫系统尚未发育完全，存在皮肤敏感、易受微生物代谢产物刺激的特点，开发的洗涤产品，不仅发挥其温和清洁和抗菌特性，还易于漂洗，完全无害，极大降低了对婴幼儿的有害风险。

5. 结论与展望

SLs作为一种平台型绿色生物分子，凭借其可降解、低毒和表面活性，正成为替代传统石油基表面活性剂的理想选择。它不仅环保，还具备抗菌、抗炎等多重活性功能，推动日化产品从“清洁”走向“清洁-护理-修复”一体化，有助于日化行业打破同质化、实现差异化创新。目前SLs的产业化仍面临生产成本高、规模化稳定性及下游分离纯化效率等挑战。未来需借助合成生物学技术优化菌种和发酵工艺，实现低成本、规模化生产。同时，积极推进拓展其在微生态护肤、智能清洁、母婴及宠物护理等高附加值领域中的应用，构建绿色循环产业模式。产学研深度融合将加速SLs的定制化开发与应用拓展，推动日化行业进入生物技术驱动、绿色健康的新时代。

参考文献

[1]Roelants Sophie L K W, Soetaert Wim.Industrial Perspectives for (Microbial) Biosurfactants[J].Advances in biochemical engineering/biotechnology.2022,181.

[2]Zhao R ,She J,Jia Y.Challenges and Countermeasures of Daily Chemical Packaging under the Target of “Double Carbon”[J].Industry Science and Engineering.2024,1(1).

[3]Peng Y ,Totsingan F ,Meier R A M , et al.Sophorolipids: Expanding structural diversity by ring – opening cross – metathesis[J].European

Journal of Lipid Science and Technology.2015,117(2):217−228.
[4]Phavit W ,Benjamin I ,James W .A review of sophorolipid production from alternative feedstocks for the development of a localized selection strategy[J].Journal of Cleaner Production.2021,319.
[5]Filbert T ,Fei L ,A. R G .Structure–Activity Relationship Assessment of Sophorolipid Ester Derivatives against Model Bacteria Strains[J].Molecules.2021,26(10):3021−3021.
[6]Muneer Q A ,Qinhong W ,Zongjie D .Sophorolipids bioproduction in the yeast Starmerella bombicola: Current trends and perspectives[J].Bioresource technology.2021,346126593−126593.
[7]Shah H U M ,Sivapragasam M ,Moniruzzaman M , et al.Production of sophorolipids by Starmerella bombicola yeast using new hydrophobic substrates[J].Biochemical Engineering Journal.2017,12760−67.
[8]Lee Y ,Cha J Y ,Jeong S , et al.A novel sophorolipids extraction method by yeast fermentation process for enhanced skin efficacy[J].Skin Research and Technology.2023,29(11):e13518−e13518.
[9]Lin B ,Wang J ,Zha J , et al.Development of green solubilizer based on acidic sophorolipid[J].Journal of Surfactants and Detergents.2025,28(4):861−870.
[10]Priyanka D ,Hakon H ,Maria T , et al.Toward green flotation: Interaction of a sophorolipid biosurfactant with a copper sulfide[J].Journal of Colloid And Interface Science.2021,585386−399.
[11]Jiménez−Peñalver P ,Castillejos M ,Koh A , et al.Production and characterization of sophorolipids from stearic acid by solid−state fermentation, a cleaner alternative to chemical surfactants[J].Journal of Cleaner Production.2018,1722735−2747.
[12]Aoki Y ,Asada T ,Nojiri M , et al.Comparative Analysis of Plant Defense Activation by Four Biosurfactants: Mode of Action and Disease Control Potential[J].International Journal of Molecular Sciences.2025,26(17):8313−8313.
[13]Ahuekwe F E ,Okoli E B ,Stanley H O , et al.Experimental Investigation of Sophorolipid Biosurfactants Produced by Candida and Pleurotus Species Using Waste Oils and Rice Bran and Their Oilfield Benefits[J].Journal of Advances in Biology & Biotechnology.2016,1−15.
[14]Jingyang L ,Bowen Y ,Xiaoling Y , et al.Sophorolipid−based microemulsion delivery system: Multifaceted enhancement of physicochemical properties of xanthohumol[J].Food Chemistry.2023,413135631−135631.
[15]Gu X ,Li D ,Yuan H , et al.Tertiary/quaternary amine derivatives of sophorolipid for baicalin solubility and antioxidating performance improvement: solubilization or hydrotropy?[J].Journal of Molecular Liquids.2024,397124122.
[16]Y. W ,J. C ,X. L .A Review on Antimicrobial Activity, Anti−Biofilm and Synergistic Effects of Sophorolipids Since Their Discovery[J].Applied Biochemistry and Microbiology.2023,59(5):580−596.
[17]Yan W C ,Fei J N ,Hsum W Y , et al.Sophorolipids—Bio−Based Antimicrobial Formulating Agents for Applications in Food and Health[J].Molecules.2022,27(17):5556−5556.
[18]Sahadevan S ,Rafaela F ,Melike P , et al.Acidic sophorolipid and antimicrobial peptide based formulation as antimicrobial and antibiofilm agents[J].Biomaterials Advances.2023,146213299−213299.
[19]Zhao Z ,Wu F ,Sun J , et al.Metagenomic insights into the mechanism of sophorolipid in facilitating co−anaerobic digestion of mushroom residues and cattle manure: Functional microorganisms and metabolic pathway analysis[J].Journal of Environmental Management.2024,370123048−123048.
[20]A G A ,S A A ,U M N , et al.The mechanistic interplay between Nrf−2, NF−κB/MAPK, caspase−dependent apoptosis, and autophagy in the hepatoprotective effects of Sophorolipids produced by microbial conversion of banana peels using Saccharomyces cerevisiae against doxorubicin−induced hepatotoxicity in rats[J].Food and chemical toxicology : an international journal published for the British Industrial Biological Research Association.2023,182114119−114119.
[21]Ruiqi X ,Ling M ,Timson C , et al.Sophorolipid Suppresses LPS−Induced Inflammation in RAW264.7 Cells through the NF−κB Signaling Pathway[J].Molecules.2022,27(15):5037−5037.
[22]Junguo H ,Jian T ,Tiantian L , et al.Removal of heavy metals in the presence of the biodegradable biosurfactant of sophorolipid from the municipal dewatered sludge[J].DESALINATION AND WATER TREATMENT.2017,225−232.
[23]S. C M ,K. P B .Review on sophorolipids – a promising microbial bio−surfactant[J].Tenside Surfactants Detergents.2023,60(2):95−105.
[24]Niki B ,Alexandre P ,Patrick G L , et al.Aqueous self−assembly of a wide range of sophorolipid and glucolipid microbial bioamphiphiles (biosurfactants): Considerations on the structure−properties relationship[J].Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.2023,679.
[25]A N I B V ,L S M D ,Dirk D , et al.Development of a transformation and selection system for the glycolipid−producing yeast *Candida bombicola*.[J].Yeast (Chichester, England).2008,25(4):273−8.
[26]Lin Y ,Chen Y ,Li Q , et al.Rational high−throughput screening system for high sophorolipids production in *Candida bombicola* by co−utilizing glycerol and glucose capacity[J].Bioresources and Bioprocessing.2019,6(1):1−9.
[27]Chen Y ,Tian X ,Li Q , et al.Target−site directed rational high−throughput screening system for high sophorolipids production by *Candida bombicola*[J].Bioresource Technology.2020,315123856−123856.
[28]Zhang M M ,Chen Z W ,Zhang P L , et al.Knockout mutation to enhance sophorolipid production in *Starmerella bombicola* based on computational structural analysis of fatty acid oxidation enzymes[J].International journal of biological macromolecules.2025,307(Pt 4):142104.
[29]Xiao−Jing M ,Hui−Min Z ,Xu−Feng L , et al.Mutant breeding of Starmerella bombicola by atmospheric and room−temperature plasma (ARTP) for improved production of specific or total sophorolipids[J].Bioprocess and biosystems engineering.2020,43(10):1−15.
[30]Saerens KM, Van Bogaert IN, Soetaert W. Characterization of sophorolipid biosynthetic enzymes from Starmerella bombicola[J].

FEMS Yeast Res. 2015 ,15(7):75.
[31]Ciesielska K, Roelants SL, Van Bogaert IN, De Waele S, Vandenberghe I, Groeneboer S, Soetaert W, Devreese B. Characterization of a novel enzyme−Starmerella bombicola lactone esterase (SBLE)−responsible for sophorolipid lactonization[J]. Appl Microbiol Biotechnol. 2016 ,100(22):9529−9541.
[32]Li J, Xia C, Fang X, Xue H, Song X. Identification and characterization of a long−chain fatty acid transporter in the sophorolipid−producing strain Starmerella bombicola[J]. Appl Microbiol Biotechnol. 2016,100(16):7137−50.
[33]Fumikazu T ,Kazuaki I ,Hiroshi H .Identification of the fatty alcohol oxidase FAO1 from Starmerella bombicola and improved novel glycolipids production in an FAO1 knockout mutant[J].Applied microbiology and biotechnology.2016,100(22):9519−9528.
[34]Kao Corporation; Patent Issued for Sophorolipid Highly−Productive Mutant Strain (USPTO 10,435,684)[J].Biotech Business Week.2019.
[35]Ma Y ,Chen X ,Shen W , et al.Metabolic engineering of Starmerella bombicola for the production of sophorolipids[J].Systems Microbiology and Biomanufacturing.2025,(prepublish):1−9.
[36]Jun L ,Jiashan L ,Na G , et al.Identification and characterization of a protein Bro1 essential for sophorolipids synthesis in Starmerella bombicola[J].Journal of industrial microbiology & biotechnology.2020,47(4−5):1−12.
[37]广州立白企业集团有限公司 .一种高产槐糖脂的基因敲除工程菌及其构建方法和应用 :202211292334.1[P].2023−03−28.
[38]广州立白企业集团有限公司 .一种高效构建多基因改造酵母菌的方法及其应用 :202311347892.8[P].2024−02−06.
[39]广州立白企业集团有限公司 .高产中短链内酯型槐糖脂的工程菌株及其构建方法和应用 :202311580035.2[P].2024−02−13.
[40]广州立白企业集团有限公司 .熊蜂生假丝酵母工程菌及其构建方法和应用 :202410842538.0[P].2024−10−01.
[41]Yaguang Z ,Dan J ,Wanqi S , et al.Semicontinuous sophorolipid fermentation using a novel bioreactor with dual ventilation pipes and dual sieve−plates coupled with a novel separation system[J].Microbial biotechnology.2018,11(3):455−464.
[42]Renjun G ,Mia F ,Xuebing X , et al.Production of sophorolipids with enhanced volumetric productivity by means of high cell density fermentation[J].Applied microbiology and biotechnology.2013,97(3):1103−11.
[43]Maddikeri L G ,Gogate R P ,Pandit B A .Improved synthesis of sophorolipids from waste cooking oil using fed batch approach in the presence of ultrasound[J].Chemical Engineering Journal.2015,263479−487.
[44]Dharini S S ,N. S M ,P. A P .Improved synthesis of sophorolipid biosurfactants using industrial by−products and their practical application[J].Tenside Surfactants Detergents.2022,59(1):17−30.
[45]Jeong−Hun K ,Yu−Ri O ,Juyoung H , et al.Value−added conversion of biodiesel into the versatile biosurfactant sophorolipid using Starmerella bombicola[J].Cleaner Engineering and Technology.2020,1.
[46]Wang H ,Tsang C ,To H M , et al.Techno−economic evaluation of a biorefinery applying food waste for sophorolipid production – A case study for Hong Kong[J].Bioresource Technology.2020,303122852.
[47]Phavit W ,Magda C ,Ben D , et al.Food processing by−products as sources of hydrophilic carbon and nitrogen for sophorolipid production[J].Resources, Conservation & Recycling.2022,185.
[48]Oiza N ,Vico M J ,Sánchez A , et al.Enhanced anaerobic digestion of food waste using purified lactonic sophorolipids produced by solid−state fermentation of molasses and oil waste: A circular approach[J]. Journal of Cleaner Production.2024,468143062−143062.
[49]Muñoz E E ,Wongsirichot P ,Ingham B , et al.Screening of alternative nitrogen sources for sophorolipid production through submerged fermentation using Starmerella bombicola[J].Waste management (New York, N.Y.).2024,18623−34.
[50]Jia X ,Qi L ,Zhang Y , et al.Computational fluid dynamics simulation of a novel bioreactor for sophorolipid production[J].Chinese Journal of Chemical Engineering.2017,25(06):732−740.
[51]Van Renterghem L, Roelants SLKW, Baccile N, et al. From lab to market: An integrated bioprocess design approach for new−to−nature biosurfactants produced by Starmerella bombicola[J]. Biotechnol Bioeng. 2018,115(5):1195−1206.
[52]FengY ,WangR ,AnZ , et al.Optimization of temperature shift−based fermentation process for sophorolipids production using response surface methodology[J].AIP Conference Proceedings. 2019,2110(1):020002.
[53]Kim JH, Oh YR, Han SW, et al. Enhancement of sophorolipids production in Candida batistae, an unexplored sophorolipids producer, by fed−batch fermentation[J]. Bioprocess Biosyst Eng. 2021,44(4):831−839.
[54]Haojie L ,Aiyong H ,Shun L , et al.Efficient production of acidic sophorolipid from rapeseed oil by Candida bombicola[J].Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2022,16(4):1050−1061.
[55]Xu F, Chen Y, Zou X, et al. Precise fermentation coupling with simultaneous separation strategy enables highly efficient and economical sophorolipids production[J]. Bioresour Technol. 2023,388:129719.
[56]Chen Y, Tang X, Li Y,et al. Ultrasound assisted in situ separation of sophorolipids in multi−phase fermentation system to achieve efficient production by Candida bom bicola[J]. Biotechnol J. 2022,17(2):e2100478.
[57]Dolman M B ,Kaisermann C ,Martin J P , et al.Integrated sophorolipid production and gravity separation[J].Process Biochemistry. 2017,54162−171.
[58]Zulkifli M W F N W ,Razak A N N ,Yatim M R A , et al.Acid Precipitation versus Solvent Extraction: Two Techniques Leading to Different Lactone/Acidic Sophorolipid Ratios[J].Journal of Surfactants and Detergents. 2019,22(2):365−371.
[59]Yogita P ,N. S M ,B. S K , et al.Improved adsorptive purification and effective separation of acidic and lactonic sophorolipid biosurfactant[J].Journal of the Indian Chemical Society.2022,99(11).
[60]Maïssa D ,M R M ,Johannes F , et al.Seeking faster, alternative methods for glycolipid biosurfactant characterization and purification[J].

Analytical and bioanalytical chemistry.2021,413(16):1−10.
[61]Pinky Samtani, et al.”Fermentative Production of Sophorolipid and Purification by Adsorption Chromatography[J].Tenside Surfactants Detergents.2018,55.(6):467−476.
[62]Tang Y ,Ma Q ,Du Y , et al.Efficient purification of sophorolipids via chemical modifications coupled with extractions and their potential applications as antibacterial agents[J].Separation and Purification Technology.2020,245(prepublish).
[63]Zehua Q ,Wei G ,Jun L, et al.Reduced−Cost Production of Sophorolipids by Starmerella bombicola CGMCC1576 Grown on Cottonseed Molasses and Cottonseed Oil−Based Medium[J]. International Journal of Molecular Sciences.2023,24(6):5759−5759.
[64]A N I B V ,Dieter B ,C J M , et al.Synthesis of bolaform biosurfactants by an engineered Starmerella bombicola yeast[J]. Biotechnology and bioengineering.2016,113(12):2644−2651.
[65]广州立白企业集团有限公司 .一种含槐糖脂的机洗洗碗液组合物及其制备方法与应用 :202411493502.2[P].2025−01−28.
[66]Huang C ,Hu C ,Sun G , et al.Antimicrobial finish of cotton fabrics treated by sophorolipids combined with 1,2,3,4−butanetetracarboxyic acid[J].Cellulose.2020,27(5):2859−2872.
[67]AnnKathrin B ,Lars B ,Amira O , et al.Environmental Impacts of Biosurfactants from a Life Cycle Perspective: A Systematic Literature Review[J].Advances in biochemical engineering/biotechnology.2022,181.
[68]Solaiman K D ,Ashby D R ,Uknalis J .Characterization of growth inhibition of oral bacteria by sophorolipid using a microplate−format assay[J].Journal of Microbiological Methods.2017,13621−29.
[69]M E ,I M ,H M , et al.Rhamnolipids and lactonic sophorolipids: natural antimicrobial surfactants for oral hygiene[J].Journal of applied microbiology.2017,123(5):1111−1123.

Industrial Production and Application of Bio-based Surfactant Sophorolipids

Chen Wei-zhe, Zhang Mi-min, Shen Bing-bing, Zhang Li-ping
(Guangzhou Liby Enterprise Group Co.,Ltd.., Guangzhou 510140, Guangdong, China)

Abstract : This article systematically reviews the key technologies for the industrial production of the bio-based surfactant sophorolipids (SLs) and their application prospects in the daily chemical field. It focuses on analyzing the challenges and strategies in industrial production, such as high-yield strain breeding, optimization of fermentation processes, and separation and purification. Additionally, the article explores the innovative applications of SLs in skincare, household cleaning, maternal and child care, and pet care products, leveraging their environmentally friendly properties and multiple biological activities such as antibacterial and anti-inflammatory effects. This provides theoretical references for promoting the green and high-value transformation of the daily chemical industry.

Keywords : **bio-based surfactant; sophorolipids; industrial production; application**