

槐糖脂的构效关系及在日化领域的应用进展

刘星雨¹, 薛健², 高健³, 孙良^{1*}, 徐虹¹

(1.南京工业大学食品与轻工学院, 江苏南京, 211816;

2.南京轩凯生物科技股份有限公司, 江苏南京, 210061;

3.盐城工学院海洋与生物工程学院, 江苏盐城, 224501)

DOI:10.61369/CDCST.2025040027

摘要: 在日化工业绿色转型背景下, 传统石油基表面活性剂应用受限, 槐糖脂作为生物表面活性剂因优异性能已成为研究热点。文章综述其分子结构(酸型/内酯型、乙酰化程度、脂肪酸链)与表面活性、抑菌、皮肤相容性的构效关系, 梳理其在个人护理与家居清洁的应用, 对比其与SLS/SLES、APG等的性能成本差异, 从市场角度分析了槐糖脂的发展现状。并对槐糖脂后续的科研与产业发展进行了展望, 为行业从业者提供产业化落地的技术参考, 推动槐糖脂成为引领日化工业绿色升级的核心生物原料。

关键词: 槐糖脂; 生物表面活性剂; 结构特征; 构效关系

第一作者简介: 刘星雨, 硕士研究生, 就读于南京工业大学。E-mail: 1030655710@qq.com。

通讯作者简介: 孙良, 博士研究生, 南京工业大学讲师, 从事生物化工领域的研究。

E-mail: sunl@njtech.edu.cn。



刘星雨



孙良

日化工业作为与人类日常生活关联最紧密的领域之一, 正面临绿色转型与功能升级的双重驱动。随着全球消费者对纯净配方、可持续消费的需求激增, 以及欧盟《化妆品条例》、美国《化妆品法规现代化法案》、中国《化妆品监督管理条例》等法规对化学添加剂的限制趋严^[1], 传统石油基表面活性剂的局限性日益凸显——不仅存在生物降解率低、易造成环境累积污染等问题, 其分子还易穿透细胞膜, 对生态系统微生物群落构成潜在威胁^[2]。在此背景下, 生物表面活性剂(Biosurfactants)凭借可生物降解(降解率约100%)、低毒($LD_{50} > 5 \text{ g/kg}$)^[3]、多功能适配的核心优势, 成为替代传统化学表面活性剂的核心方向, 2023年全球生物表面活性剂市场规模已突破44亿美元^[4]。

在众多生物表面活性剂中, 槐糖脂(Sophorolipids)因独特的分子结构与性能协同性, 成为日化领域的研究热点。其分子由亲水的槐糖单元(2个 β -1,2糖苷键连接的葡萄糖)与疏水的羟基脂肪酸链通过酯键连接^[5], 天然形成“双亲结构”, 具有高表面活性^[6]、乳化性(油水乳化指数EI 24 > 80%)^[7]与广谱抑菌(对致病疫霉菌丝的抑制率高达78.80%~83.33%、对嗜酸乳杆菌完全抑制^[8])等。此外, 槐糖脂主要通过非致病性酵母菌(如Starmerella bombicola)发酵生产, 碳源可来源于糖蜜、植物油甚至农业废弃物^[9], 完美契合日化工业“低碳原料—绿色生产—安全应用”的全链条需求。

近年来, 槐糖脂在日化领域的研究与应用已从基础性能探索迈向产业化落地。在清洁领域, 有研究将槐糖脂替代国标洗衣粉组分中的烷基糖苷, 发现去污值达6.9%以上^[10]; 在护肤领域, 槐糖脂作为化妆品组分, 不仅具有优异的保湿效果及皮肤、头发护理性能, 还可规避传统保湿剂的缺陷^[11]; 在口腔护理与抑菌领域, 槐糖脂对变异链球菌生物膜表现出强抑制作用, 且经兔红细胞溶血实验及牙龈成纤维细胞毒性实验验证, 其刺激性与毒性均较低, 具备口腔产品应用潜力^[12]。然而, 现有研究仍存在亟待系统梳理的关键问题, 其一, 槐糖脂分子结构(如酸型和内酯型差异、乙酰化程度、脂肪酸链长度)与日化功能(如发泡性、皮肤相容性)的构效关系尚未形成统一理论框架; 其二, 不同日化剂型(如水剂、乳霜、凝胶)对槐糖脂的溶解性、稳定性要求差异显著, 适配性优化研究分散; 其三, 规模化生产中成本控制与市场转化的协同仍需突破。

基于此, 本文将阐述近年来槐糖脂的结构关系、在日化领域的应用特点相关研究现状, 并对相关研究进行展望, 旨在为行业从业者提供产业化落地的技术参考, 推动槐糖脂成为引领日化工业绿色升级的核心生物原料。

1. 槐糖脂的结构特征与构效关系

槐糖脂的分子结构呈现高度多样性, 其亲水单元(槐

糖)的修饰状态、疏水单元(脂肪酸链)的结构特征及分子整体连接方式,共同决定了其表面活性、皮肤相容性、抑菌性等核心日化功能。这种结构-功能的精准关联,是其在清洁、护肤、抑菌等日化场景中定向应用的核心依据。

1.1 结构特征

槐糖脂的结构多样性源于三大核心要素的差异化组合:分子连接类型(酸型/内酯型)、槐糖单元乙酰化程度、脂肪酸链结构特征,这些差异直接奠定了其功能分化的基础^[13]。

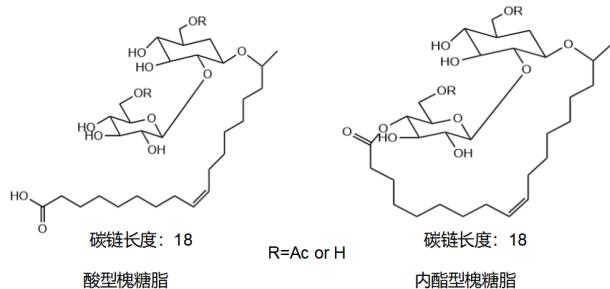


图1 槐糖脂的结构类型

1.1.1 分子连接类型的区别

槐糖脂根据其疏水尾端脂肪酸的羧基状态,主要分为酸型和内酯型。内酯型槐糖脂的脂肪酸链末端羧基与槐糖单元的C4”位羟基形成1,4”-内酯环,分子呈环状闭合结构^[14]。酸型槐糖脂的脂肪酸末端羧基保持游离状态,无内酯环结构,分子呈直链状。通过基因工程调控内酯化酶(SBLE)活性,可使内酯型槐糖脂占比提升至99%^[15]。这两种结构的转化具有环境响应性,内酯型在pH≥7的条件下会发生酯键水解,转化为酸型^[16],这一特性直接影响其在不同pH日化剂型(如弱酸性洁面乳、中性乳液)中的稳定性与功能持续性。

1.1.2 乙酰化的区别

根据槐糖单元的C6’和C6”位发生单乙酰化或双乙酰化修饰程度^[17],可分为双乙酰化槐糖脂、单乙酰化槐糖脂和去乙酰化槐糖脂。乙酰基的引入会增加分子的疏水性,从而降低水溶性,但同时能够增强其特定的生物活性,例如抗病毒和刺激细胞因子释放的能力。反之,通过化学或酶法脱去乙酰基,则可以提高分子的亲水性,进而改善其发泡和乳化性能。实验数据显示,去乙酰化可使槐糖脂的水溶性从34.7 g/L提升至485.8 g/L,增幅达14倍,亲水-亲油平衡值(HLB)从11升至13^[18],这一变化直接优化了其在水基日化产品(如爽肤水、精华液)中的溶解性能,

为敏感肌产品原料选择提供了关键参数。

1.1.3 脂肪酸链的结构区别

脂肪酸链的长度、饱和度、羟基化位置共同塑造分子的疏水核心,其结构主要由发酵碳源与菌株代谢特性决定。研究表明,以油酸(C18:1)为碳源时,产物以C18脂肪酸链为主^[19];以菜籽油为碳源时,可检测到C16-C20的混合链长,且通过细胞色素P450酶(CYP52M1)催化,羟基化主要发生在ω位(末端)或ω-1位(亚末端),这是糖苷键连接的关键位点^[20]。此外,特殊脂肪酸链修饰可产生功能特异性结构,例如花生一烯酸(C20:4)取代的酸型槐糖脂,其舒缓止痒活性较常规C18链结构提升10倍以上^[21],这一发现为功能型护肤原料开发提供了新方向。

1.2 构效关系

1.2.1 表面活性

表面活性(降低表面张力、形成胶束、乳化分散)是槐糖脂最核心的日化功能,其效能直接由分子疏水-亲水平衡特性决定,通过Wilhelmy板法、动态光散射(DLS)等方法可精准量化。

(1) 分子连接类型的主导作用

由于酸型槐糖脂极性略高,并且内酯型槐糖脂的环状结构增强了分子的界面吸附能力,其降低表面张力的效能显著优于酸型。酸型槐糖脂CMC值约100~200 mg/L;内酯型槐糖脂CMC值约40~80 mg/L。这种差异使其在高效乳化场景(如卸妆油、乳液)中更具优势。

与之相对,酸型槐糖脂因游离羧基的亲水性,展现出更优的发泡性能^[22],研究表明酸型(HA)的初始泡沫高度略优于内酯型(HL),且两者泡沫性能受pH和水硬度影响均不显著^[23],这一特性使其更适合作为洁面乳、沐浴露等需要丰富泡沫的清洁产品核心成分。

(2) 乙酰化程度的精细调节

乙酰化修饰通过减弱槐糖单元的亲水性,优化分子的界面排列能力。乙酰化槐糖脂的临界表面张力为36.2 mN/m,而去乙酰化槐糖脂的临界表面张力为41.0 mN/m。乙酰化槐糖脂的CMC值为30.3 mg/L,去乙酰化槐糖脂的CMC值为152.5 mg/L^[18]。这说明乙酰化程度高的槐糖脂在较低浓度下就能形成胶束,可显著降低清洁产品的有效用量,既减少原料成本,又降低皮肤残留风险。并且去乙酰化槐糖脂对石蜡油的乳化指数(EI24)比乙酰型高26.7倍,这一数据为卸妆产品配方中乳化剂的选择提供了直接依据。

而去乙酰化虽降低了表面活性,但会大幅提升泡沫稳

定性，去乙酰化的亲水基在液膜内部与水分子有更好的相容性，而且去乙酰化槐糖基的分子更小，与双电层的另一面亲水基之间的斥力较弱，能够更容易形成双分子层液膜。

(3) 脂肪酸链的协同影响

脂肪酸链长度与饱和度通过调节分子疏水性，间接影响表面活性。研究表明，槐糖脂脂肪酸碳链长度越长，其表面活性和生物可降解性越高，CMC值越小^[24]。因更长的疏水链更易形成稳定胶束。

1.2.2 抑菌活性

槐糖脂的抑菌功能源于其对微生物细胞膜的破坏作用^[25]，而结构差异直接决定其抗菌谱宽度与效能强度，是替代化学防腐剂的核心依据。

(1) 内酯型槐糖脂

内酯型槐糖脂因脂肪酸羧基与槐糖羟基缩合形成的环状结构，更易与微生物细胞膜作用，且乙酰化修饰可进一步增强其抗菌效能，是目前抗菌活性最优的槐糖脂分型。

从作用机制来看，其环状疏水结构能嵌入革兰氏阳性菌的脂质细胞膜，破坏膜完整性并导致胞内物质泄漏，这一特性使其对革兰氏阳性菌的抑制效果远优于革兰氏阴性菌。比如对金黄色葡萄球菌，双乙酰化内酯型槐糖脂的MIC为50 μg/mL，而酸型与内酯型混合(75:25)的MIC达400 μg/mL，前者抗菌效率是后者的8倍^[26]。

(2) 酸型槐糖脂

酸型槐糖脂无环状结构，单独使用时抗菌活性低于内酯型，但凭借良好的水溶性与复配兼容性，在协同抑菌及特定剂型中展现独特优势（非乙酰化酸型槐糖脂与卡那霉素或头孢噻肟钠联合使用时，可使两种抗生素的MIC明显降低；与四环素联用时，达到完全抑制金黄色葡萄球菌的时间比单独使用四环素缩短2小时，抑制率提升25%~48%）^[27]，且脂肪酸链长度与乙酰化程度可进一步优化其抗菌谱。比如对大肠杆菌，非乙酰化酸型的MIC为50 μg/mL，低于内酯型与酸型混合(75:25)的1000 μg/mL及双乙酰化内酯型的750 μg/mL，是酸型槐糖脂中少数对革兰氏阴性菌表现出较好活性的类型。

1.2.3 皮肤相容性

皮肤相容性是日化原料的核心指标，槐糖脂的结构通过调控其与皮肤角质层的相互作用及生物代谢特性，决定了温和性与修复效能。

(1) 分子类型与刺激性的负相关

酸型槐糖脂的游离羧基可与皮肤角质层的神经酰胺形

成氢键，减少对脂质屏障的破坏，酸型槐糖脂的溶血率接近去离子水，显著低于阴离子表活（如AES）和非离子表活（如APG），说明其对细胞膜（模拟皮肤屏障）的损伤极小^[28]。

内酯型槐糖脂临界表面张力(36.2 mN/m)低于酸型(41.0 mN/m)，表面活性更强，但也意味着更易渗透皮肤角质层，会增加局部刺激风险，但其水解产物可激活皮肤AMPK信号通路，促进胶原蛋白合成，展现抗衰修复功能。

(2) 乙酰化程度对屏障修复的调控

去乙酰化槐糖脂因槐糖单元富含羟基，可与皮肤角质层的丝聚蛋白形成氢键网络，显著降低经表皮失水率(TEWL)——含去乙酰化槐糖脂的面霜可使受试者的TEWL值从15.2 g/(m²·h)降至13.5 g/(m²·h)^[29]。乙酰化槐糖脂在水中的溶解度仅为33.8 g/L，这使得其在皮肤表面的分散性较差，难以充分发挥对皮肤屏障的修复作用^[18]。

2 槐糖脂在日化领域的应用

槐糖脂的独特性能使得其在个人护理领域的应用日益广泛和深入，在此主要对其在个人护理产品和家居与工业清洁领域的应用展开介绍。

2.1 槐糖脂在个人护理产品中的应用

2.1.1 皮肤护理

在洁面与卸妆产品之中，槐糖脂作为主要或辅助表面活性剂，能够温和而有效地去除污垢、油脂，甚至是防水彩妆，同时不破坏皮肤的天然屏障，还能促进皮肤对化妆品组分的吸收，如添加槐糖脂时，牛乳铁蛋白的经皮吸收率提高1.3~1.7倍^[30]。一些乳液与膏霜中，槐糖脂能够作为O/W型乳化剂，创造出稳定且肤感优异的乳液^[31]，其质地轻薄、无蜡质感、易于涂抹。针对一些功效型护肤品，槐糖脂的抗菌和调节皮脂的特性使其成为抗痘配方中的理想成分。同时，其抗炎潜力也使其在舒缓和修复类产品^[32]中具有应用前景。

2.1.2 头发护理

席卷全球的“无硫酸盐”消费趋势，为槐糖脂的日化应用提供了绝佳市场切入点。消费者对十二烷基硫酸钠(SLS)、月桂醇硫酸酯钠(SLES)等传统硫酸盐表面活性剂潜在刺激性的担忧，创造了对温和高效替代品的巨大需求。槐糖脂凭借其公认的温和性和出色的清洁能力，

加之其抗菌特性，完美契合了这一需求，成为开发高品质“无硫酸盐”洗发水的关键成分^[33]，常与其他活性成分复配使用，其微生态平衡作用有助于维持头皮的整体健康，有效清洁头皮和发丝。同时在一项人体斑贴试验中，槐糖脂等生物表面活性剂表现出的刺激指数比 SLS 低 3~5 倍，引起的皮肤屏障蛋白质损失显著减少约 40%（低至 10% 以下）^[34]。

2.1.3 身体清洁

槐糖脂其高效清洁能力与皮肤温和性的结合，非常适合用于需要频繁使用的洗手液产品。如将槐糖脂与辅助表面活性剂复配，还可以制成兼具清洁力与滋润效果的沐浴产品，不仅对皮肤温和，还契合微生态友好的清洁理念。

2.1.4 口腔护理

作为温和的发泡剂和清洁剂，槐糖脂在口腔护理产品如牙膏与漱口水中的发挥作用，其抑制生物膜形成的能力与预防牙菌斑和牙龈炎的宣称高度相关，具有巨大的应用潜力^[35]。

2.2 槐糖脂在家居与工业清洁领域的应用

在家居清洁领域，槐糖脂的某些特性（如低泡性）变得至关重要，为其开辟了独特的应用市场。

2.2.1 洗衣液

槐糖脂的低泡低残留特性非常适合前开门式的高效洗衣机，能够在保证清洁力的同时避免产生过多泡沫，从而确保洗衣机的机械作用和漂洗效果的同时有助于节约水和能源^[36]。不含刺激性化学物质的特性也有助于延长衣物的使用寿命。并且槐糖脂能与脂肪酶等酶制剂产生协同作用，能有效去除油性和脂肪类污渍，进一步提升清洁性能。

2.2.2 餐具洗涤

对于手洗洗涤剂中的应用，槐糖脂提供了卓越的去油能力，同时它对双手皮肤温和，这是其与传统刺激性洗洁精相比的一个关键差异化优势。

自动洗碗机也槐糖脂的理想应用场景^[37]。槐糖脂的低泡特性对于自动洗碗机用洗涤剂和漂洗助剂至关重要，它能促进水在餐具表面的铺展，实现无水痕干燥，而不会因产生泡沫而干扰洗碗机的喷淋臂工作。

2.2.3 表面清洁

槐糖脂降低表面张力的能力使清洁液能够有效润湿物体表面，从而轻松去除污垢和油渍，而其抗生物膜特性可

以为家居表面提供“长效洁净”的附加值，因此它被用于硬表面清洁剂^[38]、厨房去油喷雾和玻璃清洁剂中。

槐糖脂的高效性（低 CMC）使其非常适合当前家居清洁产品向浓缩化和环保化发展的趋势。无论是洗衣凝珠还是超浓缩洗洁精，都需要在更小的体积内包含足够的活性物。槐糖脂的高效率意味着可以用更少的量来达到清洁效果，这不仅使其成为浓缩配方的理想选择，也完美契合了其可生物降解和可再生来源的环保定位。因此，槐糖脂不仅是一种成分，更是推动现代可持续产品形态（如减少包装、降低运输碳足迹）发展的一种赋能技术。

表 1 槐糖脂在日化产品中的应用

产品类别	具体应用	关键功能	消费者利益
皮肤护理	洁面乳、卸妆水、湿巾	温和清洁、乳化	有效清洁，不紧绷，适合敏感肌
	乳液、膏霜	乳化、改善肤感	质地轻薄，无蜡质感，易吸收
	抗痘产品	抗菌、调节皮脂	帮助改善痘痘问题，平衡水油
头发护理	无硫酸盐洗发水	温和清洁	清洁头皮，不刺激，减少干燥
	去屑洗发水	抗真菌、平衡头皮 微生态	帮助减少头屑，维持头皮健康
	生发/防脱产品	刺激毛乳头细胞	潜在的促进头发生长功效
身体清洁	沐浴露、洗手液	温和清洁、滋润	清洁时不伤害皮肤，适合频繁使用
	牙膏、漱口水	温和发泡、抑制生物膜	帮助预防牙菌斑，维持口腔卫生
衣物洗涤	高效洗衣液	低泡、去油污	适用滚筒洗衣机，易漂洗，节水节能
餐具洗涤	自动洗碗机洗涤/漂洗剂	极低泡、润湿	能用于洗碗机，餐具光亮无水痕
表面清洁	通用清洁剂、厨房去油剂	去油、润湿、抗生物膜	强力去污，长效洁净

3. 槐糖脂的市场与产业分析

3.1 与传统表活的性能比较

2024 年，全球表面活性剂市场规模就已经超过了 600 亿美元，并且表活产品种类多，细分领域丰富。因此，要想拓展槐糖脂的商业市场，必须全面评估槐糖脂的市场地位，与传统表活进行比较分析。

3.1.1 与石化基表面活性剂的比较

性能方面，槐糖脂的表面活性效率更高（CMC 更低），但通常发泡性较弱，需要经过特殊配制或其他技术手段进行改善。在安全性/温和性方面，槐糖脂在皮肤和眼

部刺激性方面明显优于 SLS/SLES，更为温和^[34]。对环境影响方面，槐糖脂在生物降解性、生态毒性和可再生来源方面具有压倒性优势。从成本来看，SLS/SLES 成本远低于槐糖脂，这是 SLS/SLES 的主要优势^[39]。

3.1.2 与其他绿色表面活性剂的比较

从原料来源看，绿色表面活性剂和槐糖脂虽均源于可再生资源（糖与脂肪醇或植物油），但合成路径存在本质差异，烷基糖苷（APG）需通过化学合成制备，而槐糖脂则由微生物直接发酵合成。从性能方面看，APG 以优异的清洁力、良好的发泡性及极佳的温和性著称^[40]；与之相比，槐糖脂的温和性与 APG 相当，还具备 APG 所缺乏的独特生物活性，如调节微生态平衡、抑制生物膜形成等。这一特性使槐糖脂成为兼具表面活性与生物功能的多功能原料，而非仅作为绿色表面活性剂发挥作用。

3.1.3 与其他生物表面活性剂鼠李糖脂的比较

从结构与性质看，鼠李糖脂通常更亲水，是更好的发泡剂^[41]；而槐糖脂（尤其是内酯型）疏水性更显著，乳化能力更为优异。二者性质差异导致了应用场景的区别。鼠李糖脂适用于高泡清洁产品，而槐糖脂在乳化和低泡应用中表现更佳。而二者的复配使用可以获得更全面的性能^[6]。生物合成方面，鼠李糖脂产量相对槐糖脂低，主要生产菌株为细菌，假单胞菌属；而槐糖脂产量通常高，且其生产菌株为非致病性酵母，这使其在规模化生产和安全认知上具有一定的商业优势。

表2主流表面活性剂基准比较

参数	槐糖脂	SLS / SLES	鼠李糖脂	APG (烷基糖苷)
主要来源	微生物发酵 (可再生植物油/糖)	石化产品 或植物油	微生物发酵 (可再生糖)	可再生植物油/糖
生物降解性	优 (快速、完全)	中等至良好	优 (快速、完全)	优 (快速、完全)
皮肤温和性	极佳 (极低刺激)	较差 (潜在刺激性)	良好至优异	极佳 (极低刺激)
CMC	极低 (高效)	较高	低	中等
发泡特性	低至中等 (可调控)	高	高	中等至高
多功能性	高 (抗菌抗炎、微生态平衡)	低 (主要为清洁)	中等 (抗菌)	低 (主要为清洁)
相对成本	高	低	高	中等

仅从单位成本层面进行比较，会使槐糖脂处于竞争劣

势，却忽略了其蕴含的高附加值。槐糖脂的商业价值评估，不应仅以与十二烷基硫酸钠（SLS）、月桂醇硫酸酯钠（SLES）的成本对标为依据，而需立足其“整体价值主张”。这包括实现能够支撑微生态友好、100% 生物降解、极致温和等强有力的市场宣传，通过替代其他活性成分来简化配方，以及精准吸引注重环保和品质的高端消费群体。因此，槐糖脂较高的成本并非产业化推进的障碍，而应被视为品牌实现差异化竞争、彰显产品卓越性能的战略性投资。

3.2 槐糖脂的商业化生产与市场

3.2.1 主要行业参与者与战略合作

目前，许多企业正在生产和销售槐糖脂或含有槐糖脂组分的产品^[42]。欧洲的 Evonik、DSM 和 Croda 公司已经实现了槐糖脂的工业化生产；日本的 Saraya 公司和比利时的 Ecover 公司也已经将槐糖脂应用到洗涤剂产品中；而法国的 Soliance 公司和韩国的 MG Intobio 公司在化妆品产品中添加了槐糖脂^[43]。国内市场，轩凯生物、伯酷生物也均实现了槐糖脂的规模化制造，婴童品牌兔头妈妈、小浣熊等也推出了含槐糖脂的终端产品。整体而言，市场的显著特点是生物技术创新公司与化工巨头之间的战略合作，这种合作对于将实验室的创新成果转化为工业化规模的商业产品至关重要。

3.2.2 市场分析与成本挑战

槐糖脂市场的发展并非由单一企业驱动，而是依托于一个协同创新的活力生态系统。例如，以英国 Holiferm、中国轩凯生物为代表的生物制造企业，聚焦槐糖脂高效生物制造技术的突破^[44]；而巴斯夫、赢创、沙索等老牌化工巨头，则凭借资本优势、规模化生产经验及成熟市场渠道，为技术落地提供支撑。这种“初创企业攻坚技术+行业巨头赋能产业化”的共生模式，不仅加速了创新迭代，还显著降低了生物制造工业化过程中的大规模投资风险。

目前，槐糖脂市场正处于从利基市场向主流市场过渡的关键拐点，多项行业动态可印证这一趋势。主流生产企业已启动产能扩张计划，科研团队通过发酵工艺优化、菌株改造等技术突破实现产量提升^[45]，且行业内已相继宣布多项具有影响力的战略合作，叠加市场预测持续向好。这些信号表明，槐糖脂产业化面临的技术与商业障碍正逐步被攻克，随着其性价比持续提升，未来有望进入加速普及阶段。

4. 总结与展望

综上而言,槐糖脂已发展成为技术成熟、性能卓越且功能多样的生物表面活性剂——它不仅是高效的清洁与乳化成分,更是具备独特生物活性的功能型原料,完美契合日化行业对“高性能、高安全性、可持续性”的三重核心需求。尽管如此,当前槐糖脂仍面临市场需求规模较小、生产成本居高不下的核心挑战。未来需通过三方面重点突破以提升其与主流表面活性剂的竞争力。一是深入挖掘槐糖脂的性能优势,开发高附加值应用领域;二是通过化学改性优化其表面活性,进一步拓宽应用场景;三是加速生产技术革新,持续降低产品市场售价。通过上述方向的研究深化与应用落地,将有效推动槐糖脂规模应用的加速实现。

参考文献

[1] 曹琪,马媛莉.化妆品中有害物质的检测与监管 [J].上海轻工业,2025,(02):87–89.

[2] 肖进新.生物表面活性剂的理化性质和功能特性研究进展(待续)[J].日用化学品科学,2025,48(06):1–6.

[3] 夏咏梅,方云.生物表面活性剂的开发和应用 [J].日用化学工业,1999,(01):30–34.

[4] Sharma R, Lamsal P B. Understanding bio-based surfactants, their production strategies, techno-economic viability, and future prospects of producing them on sugar-rich renewable resources[J]. Processes, 2025, 13(9):2811–2811.

[5] 陈静,张云瑞,宋欣.槐糖脂的生产及其应用研究进展 [J].食品科学,2007,(08):525–529.

[6] 周俊平,潘琪露,黄良刚,等.生物制造技术在聚合物驱油应用中的研究进展 [J].生物工程学报,2025,41(01):148–172.

[7] 杨帆,赵小慧,胡静,等.槐糖脂表面特性和抗氧化活性的初步研究 [J].食品工业科技,2012, (14): 166–168.

[8] 江梅,马晓静,张慧敏,等.内酯型槐糖脂对白色念珠菌生长和生物膜形成的影响及机制研究 [J].中国病原生物学杂志,2025,20(01):1–7.

[9] 刘新歌,马晓静,何洪波,等.槐糖脂合成的廉价底物替代研究进展 [J].生物加工过程,2017,15(03):59–68.

[10] 刘佳.生物表面活性剂槐糖脂的性能及应用研究 [D].天津工业大学,2020.

[11] 何海洋,陆利霞,姚丽丽,等.糖脂类生物表面活性剂的性质及其潜在应用进展 [J].化工进展,2011,30(03):607–611+615.

[12] 李穗君,钟显,谢静晖,等.两种生物糖脂在牙膏产品中的应用研究 [J].口腔护理用品工业,2025,35(04):10–14.

[13] 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.

[14] Cho J K ,Kim B Y ,Kim E .Production and application of sophorolipid, a microbial surfactant[J]. KSBB Journal, 2000, 14(6):747–753.

[15] Roelants Sophie L K W, et al. Towards the industrialization of new biosurfactants: biotechnological opportunities for the lactone esterase gene from *Starmerella bombicola*.[J]. Biotechnology and bioengineering, 2016, 113(3):550–9.

[16] 蔡京荣,吕佳佳.生物表面活性剂槐糖脂研究概况 [J].中国洗涤用品工业,2019,(12):86–92.

[17] JoachimAsmer H, SiegmundLang, FritzWagner, et al. Microbial production, structure elucidation and bioconversion of sophorose lipids[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2008, 65(9):1460–1466.

[18] 杨昊,马孝萌,黄金华,等.去乙酰化槐糖脂生物表面活性剂的结构鉴定和理化性质 [J].应用化学,2024,41(06):878–889.

[19] 于潇潇,孙严,刘力莹,等.槐糖脂的生物合成及其高产菌株遗传育种研究进展 [J].吉林农业大学学报,2024,46(04):531–537.

[20] J M K S, A N I B V, Wim S. Characterization of sophorolipid biosynthetic enzymes from *Starmerella bombicola*[J]. FEMS yeast research, 2015, 15(7):fov075–fov075.

[21] 广州澳谷化妆品制造有限公司,广州德谷个人护理用品有限公司.一种快速止痒兼具滋养功效的天然来源组合物及其应用 :202410918723.3[P].2024–11–01.

[22] 翟秋倩.槐糖脂生物表面活性剂高产菌株构建和高效发酵工艺优化 [D].青岛科技大学,2017.

[23] 张怡,黄天怿,袁旻嘉.糖脂类生物表面活性剂的泡沫性能 [J].香料香精化妆品,2024,(04):12–17.

[24] 刘新歌.稻草秸秆发酵产槐糖脂及其应用研究 [D].合肥工业大学,2017.

[25] 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, 172: 2735–47.

[26] 许睿琪,马铃,陈殿松,等.槐糖脂在洗涤和个护中的应用进展 [J].中国洗涤用品工业,2022,(10):72–81.

[27] 王瑜,陈静,刘新利.槐糖脂抗菌活性及与其他抗菌物质的协同作用研究进展 [J].应用与环境生物学报,2022,28(06):1646–1652.

[28] 王荣杰,王莎莎.一种包含槐糖脂温和清洁组合物的性能研究 [J].日用化学品科学,2024,47(05):41–47.

[29] 唐洁,欧健,俞勇,等.一款针对熬夜型皮肤的护肤精华功效研究 [J].日用化学品科学,2023,46(10):18–23.

[30] Nanase I, Toshihiro K, Kentaro M, et al. Transdermal administration of lactoferrin with sophorolipid[J]. Biochemistry and cell biology = Biochimie et biologie cellulaire, 2012, 90(3):504–12.

[31] 易雄健.化妆品用天然乳化剂的筛选与性能评价 [D].中国石油大学(北京),2020.

[32] 许睿琪.槐糖脂的纯化工艺及其抗炎舒缓功效研究 [D].江南大

学,2023.

[33] Kelly Y, Samiul A. High performance conditioning shampoo with hyaluronic acid and sustainable surfactants[J]. Cosmetics, 2021, 8(3):71–71.

[34] Sayeed Y S, Goyal A. Eco-friendly biosurfactants in shampoo: green chemistry innovations for sustainable personal care[J]. Journal of Dermatologic Science and Cosmetic Technology, 2025, 2(3):100105–100105.

[35] 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.

[36] Kasturi J, Poonam K, Asmita P. Jatropha oil derived sophorolipids: production and characterization as laundry detergent additive[J]. Biochemistry research international, 2013, 2013169797.

[37] Ozdener H M, Ashby D R, Jyotaki M, et al. Sophorolipid biosurfactants activate taste receptor type 1 member 3 – mediated taste responses and block responses to bitter taste In vitro and In vivo[J]. Journal of surfactants and detergents, 2019, 22(3):441–449.

[38] Joshi - Navare K, Singh K P, Prabhune A A. New yeast isolate

Pichia caribbica synthesizes xylolipid biosurfactant with enhanced functionality[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2014, 116(8):1070–1079.

[39] 孙严 .ARTP-UV 联合诱变选育秸秆糖化液耐受性的槐糖脂高产酵母菌株 [D]. 吉林农业大学, 2024.

[40] 杜秋香 .新型表面活性剂在家居清洗中的应用 [J]. 清洗世界, 2025, 41(06):113–115.

[41] 蒋晓倩, 张丽亚, 宋爱新, 等. 鼠李糖脂稳定的纳米乳液及其凝胶的构筑和性能研究 [J]. 日用化学工业 (中英文), 2025, 55(06):677–686.

[42] Smith M L, et al. Biosurfactants: a Covid-19 perspective[J]. Frontiers in microbiology, 2020, 11(1): 334.

[43] Minucelli T, Ribeiro-Viana M R, Borsato D, et al. Sophorolipids production by Candida bombicola ATCC22214 and its potential application in soil bioremediation[J]. Waste and biomass valorization, 2017, 8(3):743–753.

[44] Anonymous. BIOSURFACTANTS[J]. Chemical Engineering, 2021, 128(7):8–8.

[45] 江建林, 张超, 秦冰, 等. 生物表面活性剂槐糖脂的化学改性修饰进展 [J]. 石油学报 (石油加工), 2025, 41(01):286–296.

Structure-Activity Relationship of Sophorolipids and Their Application Progress in the Daily Chemical Field

Liu Xing-yu¹, Xue Jian², Gao Jian³, Sun Liang^{1*}, Xu Hong¹

(1. College of Food Science and Light Industry, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816;

2. Nanjing Shineking Biotech Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210061;

3. School of Marine and Bioengineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu 224051)

Abstract : Against the background of the green transformation of the daily chemical industry, the application of traditional petroleum-based surfactants is limited. As a type of biosurfactant, sophorolipids have become a research focus due to their excellent properties. This paper reviews the structure-activity relationships between the molecular structures of sophorolipids (acid type/lactone type, degree of acetylation, fatty acid chain) and their surface activity, antibacterial activity, and skin compatibility. It sorts out their applications in personal care and household cleaning, compares their performance and cost differences with those of surfactants such as SLS (Sodium Lauryl Sulfate)/SLES (Sodium Laureth Sulfate) and APG (Alkyl Polyglycoside), and analyzes the development status of sophorolipids from a market perspective. Furthermore, it provides an outlook on the subsequent scientific research and industrial development of sophorolipids, aiming to offer technical references for industrial implementation to industry practitioners and promote sophorolipids to become the core biological raw material leading the green upgrading of the daily chemical industry.

Keywords : sophorolipids; biosurfactant, structural features, structure-activity relationship

