

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.05.006

可持续生产再生资源表面活性剂的 国际研究进展

Douglas G. Hayes

(美国田纳西大学, 生物系统工程与土壤科学系
美国 田纳西州诺克斯维尔, 37996-4531)

摘要: 表面活性剂是重要的化学产品, 作为乳化剂和界面改性剂应用于家用洗涤剂、个人护理产品、油漆和涂料、食品、化妆品和制药工业中。聚焦表面活性剂在研究和开发方面取得的最新国际进展, 尤其以改善其在整个生命周期的生态可持续性, 包括以再生资源为原料的衍生物、使用绿色制造原则生产、以及在消费者使用和处置过程中提高生物相容性和生物降解性。生物基表面活性剂来源于植物油、多糖、蛋白质、磷脂和其他可再生资源, 目前约占表面活性剂市场的 24%, 这一比例预计还将增加, 特别是在亚洲。可再生能源的使用对消费者很有吸引力, 因为这能减少二氧化碳(一种与气候变化有关的温室气体)的产生。酶可以通过减少有机溶剂、水和能源的使用, 减少副产品和废物的形成, 大大提高工艺的可持续性。在用于合成表面活性剂的生物酶中, 脂肪酶是最强效的, 因其具有较高的生物催化活性、操作稳定性和形成或切割酯、酰胺和硫代酯键的能力。为了使酶成为表面活性剂的强效催化剂, 需对其进一步研究开发, 以提高催化生产率、稳定性和降低其购买成本。

关键词: 生物基; 酶; 绿色制造; 表面活性剂; 可持续性; 可再生

中图分类号: TS202.3; Q814.9 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2020)05-0031-10

网络首发时间: 2020-08-20 15:46:28

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20200820.1015.006.html>

The Global Research Progress on Sustainable Production of Surfactants from Renewable Resources

Douglas G. Hayes

(Department of Biosystems Engineering and Soil Science, University of Tennessee, USA.
Knoxville, Tennessee, 37996-4531, USA.)

Abstract: Surfactants are important chemical products, serving as emulsifiers and interfacial modifiers in the household detergents, personal care products, paints and coatings, foods, cosmetics, and pharmaceuticals industries. This review focuses upon recent global advances in research and development to improve the ecological sustainability of surfactants throughout their life cycle, including derivation from renewable resources, production using green manufacturing principles, and improved biocompatibility and biodegradability during their consumer use and disposal stages. Biobased surfactants, derived from vegetable oils, polysaccharides, proteins, phospholipids, and other renewable resources, currently comprise approximately 24% of the surfactant market, and this percentage is expected to increase, especially in Asia. The use of

收稿日期: 2020-06-10

作者简介: Douglas G. Hayes, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 美国《表面活性剂和洗涤剂》(*Journal of Surfactants and Detergents*) 杂志主编, 研究方向为表面活性剂自组装系统、非水系统中的酶学、生物基和生物降解聚合物、微塑料和纳米塑料以及胶体的小角度散射分析。E-mail: dhayes1@utk.edu. 作者详细介绍见文尾。本文英语原文详见 P41-P48.

renewables is attractive to consumers because of reduced production of CO₂, a greenhouse gas associated with climate change. Enzymes can greatly increase process sustainability, through reduced use of organic solvent, water, and energy, and reduced formation of by-products and waste products. Among the enzymes being investigated for surfactant synthesis, lipases are the most robust, due to their relatively high biocatalytic activity, operational stability and their ability to form or cleave ester, amide, and thioester bonds. For enzymes to be robust catalysts of surfactants, further research and development is needed to improve catalytic productivity, stability and reduce their purchase cost.

Key words: biobased; enzymes; green manufacturing; surfactants; sustainability; renewable

1 表面活性剂简介

表面活性剂在我们日常生活中起着至关重要的作用，它是一类可以降低液-液、液-固和液-气界面之间界面能量的化学物质。从分子结构上看，表面活性剂具有不同的亲水性和疏水性区域（即“亲脂性”），导致它们在界面上的自组装。表面活性剂使水乳化到油相中（反之亦然），将涂层沉积在固体表面，并从衣服或人体皮肤中去除油性污渍或污垢。

表面活性剂在界面上进行自组装（如图 1 所示的水-空气界面）。当液体中的表面活性剂浓度较低时（毫摩尔或更小），它直接迁移到液体与气体或不相容液体的界面（途径 A→B，图 1）间。因此，界面能（即界面张力）降低。对于水-气体体系，根据图 1，“表面张力”一词比“界面张力”更常用。持续加入表面活性剂导致界面张力进一步降低，直至达到临界表面活性剂浓度，界面被表面活性剂所饱和（途径 B→C，图 1）。表面活

性剂的继续加入，它可以在液体中形成自组装结构，但不会进一步降低界面张力（途径 C→D，图 1）。对于水体系，自组装结构是胶束，纳米大小的液滴（通常是球体），液滴里表面活性剂分子排列成使其亲水基团向外，亲脂基团向内的结构。油相将会溶解在纳米液滴的内部。为了满足特定应用的要求，化学家可以对表面活性剂的分子结构进行修改，以控制表面活性剂的自组装结构，包括胶束尺寸和形状、乳液或其他结构。

图 2 给出了几种主要的生物基表面活性剂的分子结构，如阴离子、阳离子、非离子和两性表面活性剂。表面活性剂类型取决于表面活性剂化学中的极性头部基团。聚乙烯氧化物（即 -(OCH₂CH₂)_n，称为“乙氧基化物”）和糖类都是常见的非离子型表面活性剂的亲水性基团（头部基团）。两性表面活性剂具有亲水性基团（头部基团）带正电荷和负电荷。

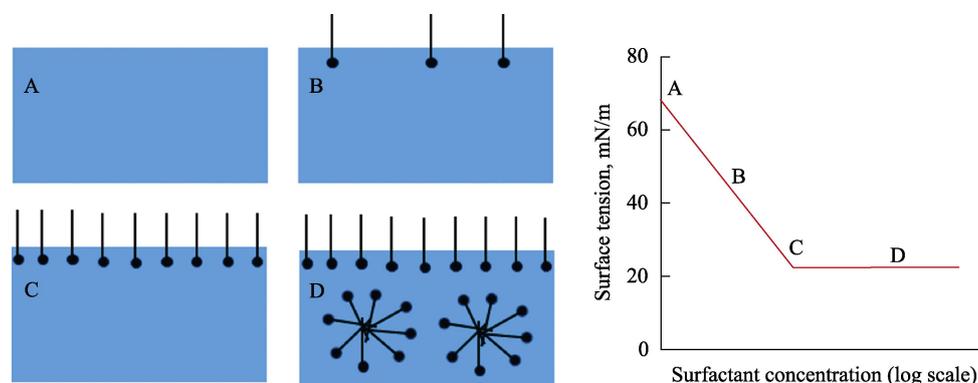


图 1 表面活性剂在水中的自组装。当表面活性剂浓度从 0 (图 A) 增加时，表面活性剂分配到液-液界面 (图 B)，界面最终被表面活性剂 (图 C) 饱和，此时其浓度称为临界胶束浓度 (critical micellar concentration, CMC)。

随着浓度继续增加，胶束形成 (图 D)，但表面张力没有进一步降低。

Fig.1 Surfactant self-assembly in water. As the surfactant concentration increases from 0 (A), surfactants partition to the liquid-liquid interface (B) and ultimately the interface becomes saturated with surfactant (C), at a surfactant concentration known as the critical micellar concentration (CMC). As the surfactant concentration is further increased, micelles form (D); but, the surface tension does not undergo a further decrease.

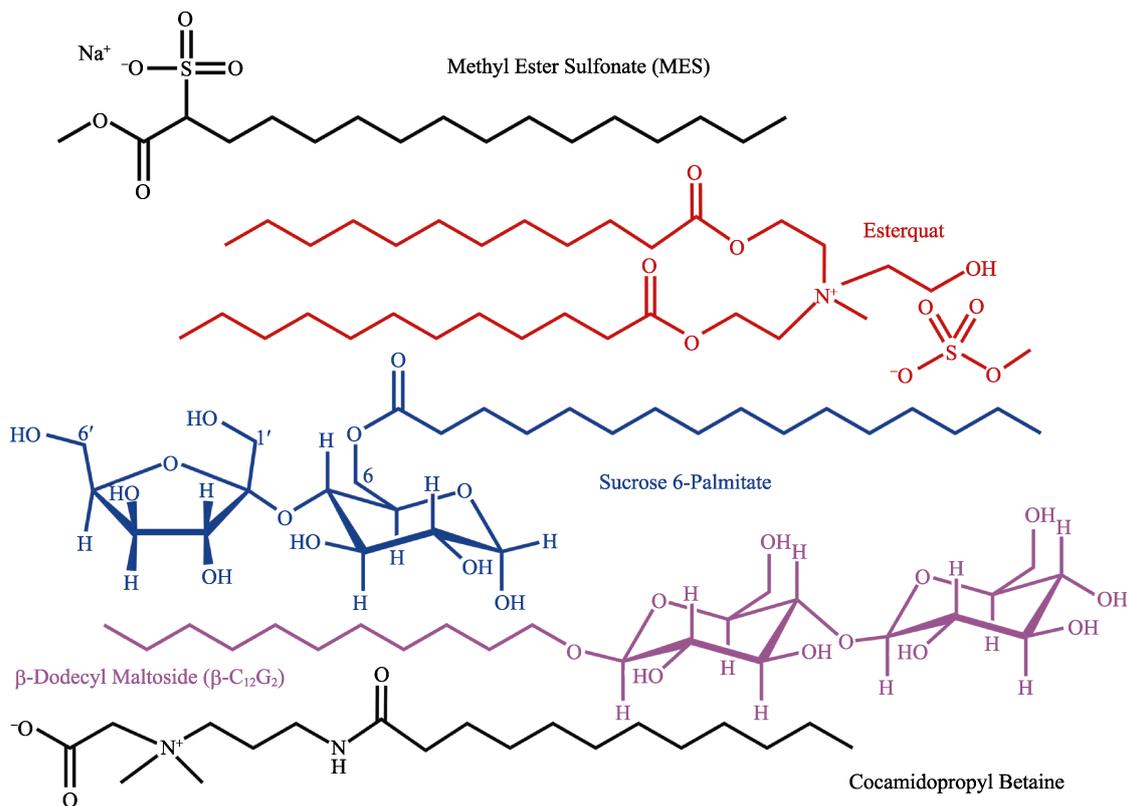


图 2 常用生物基表面活性剂的分子结构

Fig.2 Molecular structure of commonly used biobased surfactants

因此，表面活性剂在很多行业中得到广泛应用，按其市场占有率的大致顺序列出：洗涤剂（如洗衣和餐具：约占 42% 的市场）、工业表面活性剂（如油漆、涂料、润滑剂、采油与原油回收等，约占 29% 的市场）、个人护理产品（如洗手液和身体清洁剂、洗发水和牙膏；约占 16% 的市场）和医药行业（占 7% 的市场）。表面活性剂还用于化妆品、食品、农用化学品、环境修复和许多其他应用^[1]。在 2017 年，表面活性剂行业的市场规模估计为 365 亿美元（2 090 万吨）^[1]。

2 表面活性剂制备、使用和处置中可持续性的重要性

为了使表面活性剂的生命周期（“从摇篮到坟墓到摇篮”）变得可持续，我们需要不断改进它。图 3 为表面活性剂可持续生命周期的示意图。在过去 50 年中，全球对表面活性剂的研发投入了诸多努力，以改善延长其生命终点，降低其生态毒性，提高其生物降解性，特别是在河流、湖泊和地下水中，表面活性剂及其分解产物常有存在^[2]。这些努力取得了许多成效，仅举 3 例：第一例子

是减少了使用乙氧基壬基酚（壬基酚聚氧乙烯基醚）表面活性剂，这是内分泌体系干扰物^[3]。第二个例子是减少了三聚磷酸钠（STPP）作为洗涤助剂的使用，这是一种去除会降低清洗性能的多价阳离子（如钙）所需的成分。STPP 促进湖泊和河流的富营养化，导致藻类的过度生长^[4-5]。第三个例子是减少了 1,4-二氧杂环己烷（1,4 二噁烷）的形成，这是在生产月桂基聚氧乙烯硫酸钠（SLES）过程中产生的一种共同产物，也是洗衣洗涤剂和个人护理产品中常用的表面活性剂。1,4-二氧杂环己烷（1,4 二噁烷）具有生态毒性，很难从水中去除，且去除成本高昂^[6]。洗涤剂生产商通过提高 SLES 的催化生产效率或用配方中的其他表面活性剂替代 SLES 来解决这一问题。全球在这方面的研究和开发至今继续进行，旨在提高表面活性剂的微生物吸收效率和程度，减少其对微生物、鱼类和其他海洋生物的毒性。

3 生物基表面活性剂

最近对提高表面活性剂可持续性的另一个关注点聚焦在其生命起点上，即用于制备表面活性

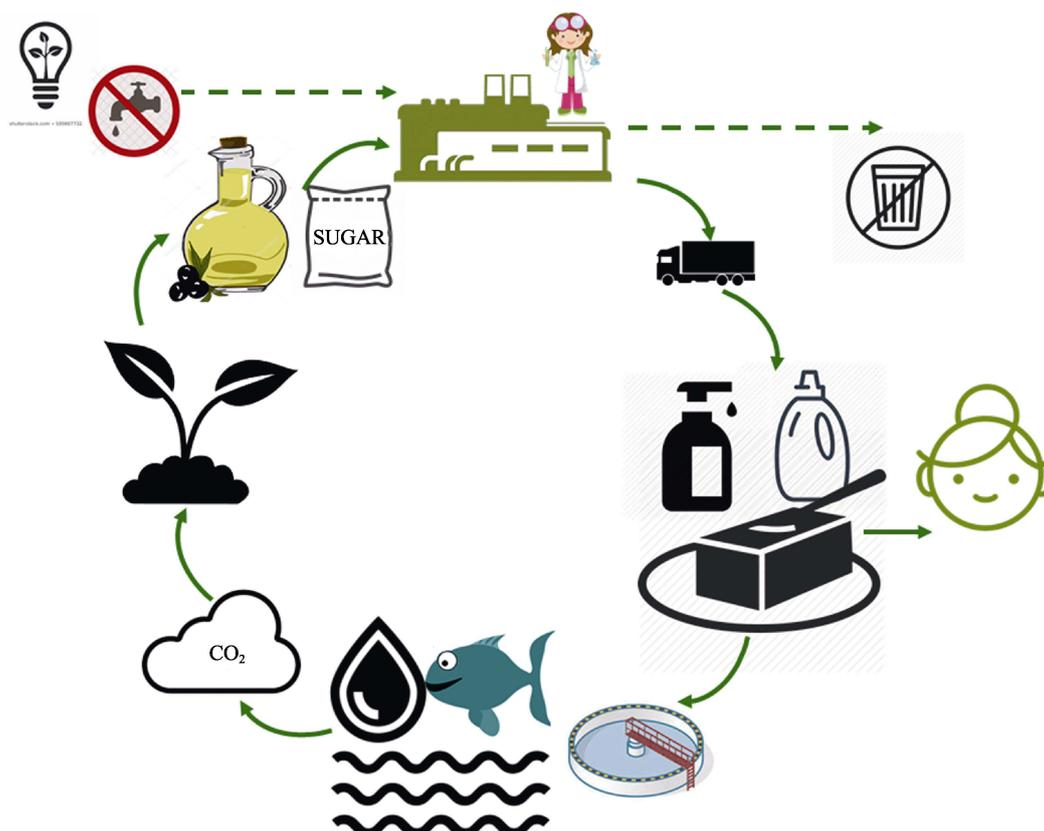


图 3 可持续生产的表面活性剂的生命周期。图左：来自植物中的衍生原料；图上：绿色制造（水、能源和溶剂的最小投入；极好的工人生产安全；废物产品的最小产出）；图右：消费和使用（低毒性）；图下：生态友好型处置（主要在水处理设施、湖泊、河流和海洋中）、产生由植物在呼吸过程中吸收的二氧化碳气体。

Fig.3 Life cycle for a sustainable surfactant. *left*: derivation of feedstocks from plants; *top*: green manufacturing (minimal input of water, energy and solvents; excellent safety for workers; minimal production of waste products); *right*: consumption and use (low toxicity); *bottom*: eco-friendly disposal (mainly in water treatment facilities, lakes, rivers, and oceans), producing CO₂ gas that is taken up by plants during respiration.

剂的原料。近 100 年来，表面活性剂原材料的主要来源是石油和其他化石燃料。虽然化石燃料通常很廉价，且如今很容易获得，但它们在未来几年的可用性是不确定的。此外，由于大气中温室气体特别是二氧化碳含量增加，化石燃料的使用成了主要关注点。而且化石燃料的碳原子，最初处于惰性储存状态（地下），最终将转化为二氧化碳作为它们的最终状态。温室气体与气候变化有关，这可能是近年来极端气候事件的证明，例如，频繁的强大气旋、干旱、全球创纪录的高温以及北极和南极地区冰川融化导致的海洋水位上升等^[7-8]。化石燃料的其他生命阶段也令人担忧，对于潜在发生的环境危害，包括从地面开采到往炼油厂的运输过程中（例如，2008 年墨西哥湾一口油井的深水地平线石油泄漏和 1999 年美国阿拉斯加一艘名为埃克森-瓦尔迪兹的油轮漏油），以及石油炼油厂引燃的火灾。

这些担忧使消费者对生物基表面活性剂的兴趣逐渐增加，例如，关注这些表面活性剂是全部由再生资源衍生的，还是大部分由再生资源衍生的产品？2017 年生物基表面活性剂约占表面活性剂市场的 24%，预计这一比例将增加，尤其在亚洲市场^[1]。最常见的用于制备表面活性剂的生物基组成部分是脂肪酰基，它来源于植物油、其他种子油（如，来自生物能源作物，如麻风树或蓖麻，或使用过的食用油和餐馆油脂）、动物脂肪或微生物“单细胞”油（例如藻类或细菌）和磷脂（植物油精炼时产生的共同产物）等。脂肪酰基可以化学还原生成脂肪醇或脂肪胺。表面活性剂亲水基团的生物基来源包括糖、氨基酸（来源于蛋白质）、甘油（生物柴油生产时产生的廉价和未充分利用的共同产物）和柠檬酸。还有一种可替代的方法，表面活性剂可直接从微生物中回收，称为“生物表面活性剂”。生物基资源（如植物油

和糖)通常用作生物表面活性剂发酵中的碳能来源。详情见 Hayes DG 等 2019 年综述的生物表面活性剂原料行业情况和研究概况^[9]。

图 2 描述了几种主要生物基表面活性剂的分子结构。甲基乙基磺酸盐 (MES) 可能是最常用的阴离子生物基表面活性剂, 通常用于洗涤剂, 尤其是在亚洲地区。酯基季铵盐是一种常见的阳离子生物基表面活性剂, 用作衣服的抗静电剂, 具有抗菌活性, 也可用作游泳池的杀菌剂。糖酯是食品、化妆品和医药品中常见的乳化剂, 而烷基多糖苷 (alkyl polyglycosides, APGs) 是有效的润湿剂和发泡剂, 常用于洗涤剂、个人护理产品和化妆品。甜菜碱, 如图 2 所示的烷基酰胺丙基衍生物, 是用于个人护理产品 (如洗发水、液体肥皂和洗手液) 的常见两性表面活性剂。它们具有优良的去污力、泡沫形成、硬水相容性和对皮肤和头发的温和性。作者与 Ashby RD、Solaiman DKY 共同编撰了关于生物表面活性剂的著作, 《生物表面活性剂: 合成、特性及应用 (第二版)》(Biobased Surfactants: Synthesis, Properties and

Applications (2nd Ed.)), 已于 2019 年美国 AOCS 出版社出版^[10], 书中描述了生物表面活性剂的总体方面和特定类型的详细情况。

工业上制备了几种生物表面活性剂, 尤其是糖脂 (如槐糖脂和鼠李糖脂) 和脂肽 (如表面活性素), 它们的分子结构如图 4 所示。生物表面活性剂通常具有优异的表面活性、高生物降解性、低毒性和高抗菌活性, 但制备成本昂贵。因此, 它们仅用于不计成本的应用行业, 如原油增产、生物修复、化妆品和医药品领域等。最近的研究聚焦在开发更有效的微生物菌株, 使用低成本的碳源 (如废弃食用油), 改进的生物分离 (例如从发酵液中连续去除生物表面活性剂), 以及对发酵产生的生物表面活性剂进一步化学 (或生化) 反应以改变生物表面活性剂分子结构的方法。除了作者共同编撰《生物表面活性剂: 合成、特性及应用 (第二版)》^[10]中关于生物表面活性剂制备有几章全面系统的介绍外, 近年来也有一些这方面的综述论文公开发表^[11-16]。

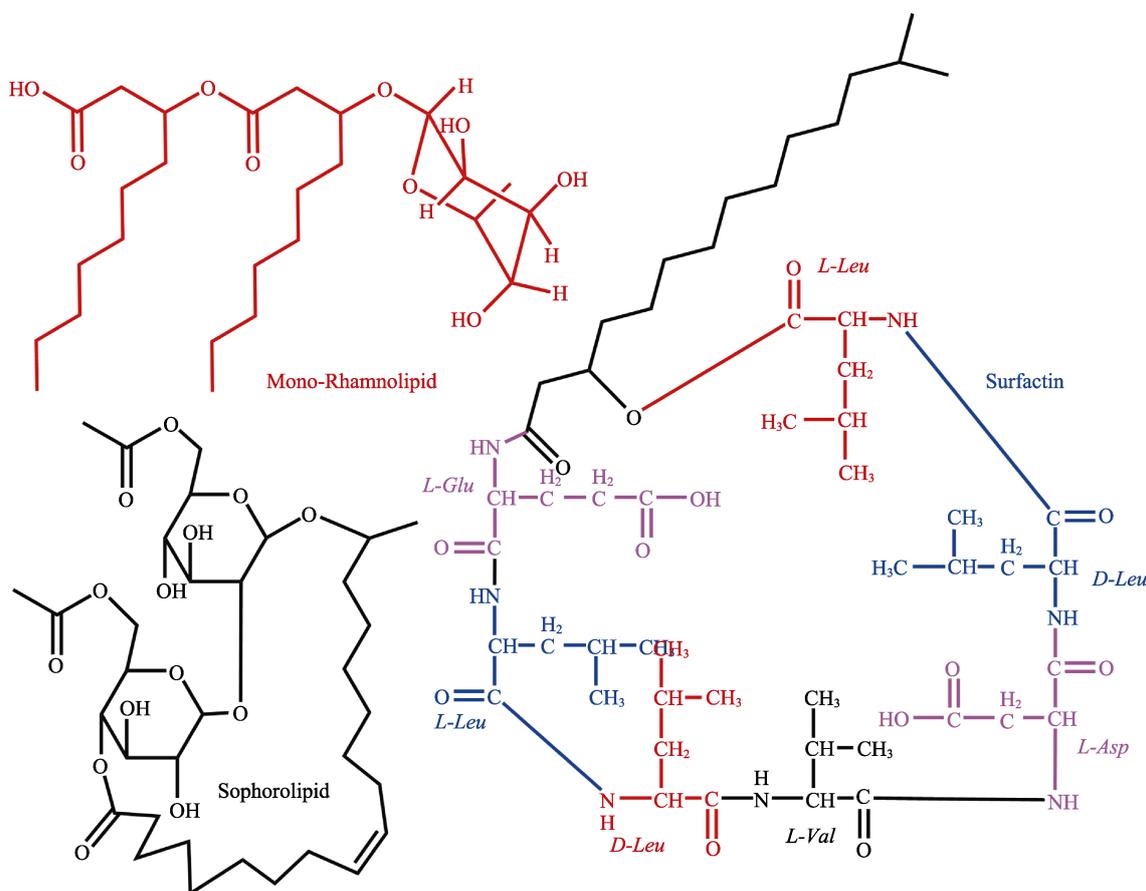


图 4 生物表面活性剂的分子结构。槐糖脂和鼠李糖脂是糖脂, 而表面活性素是一种脂肽。

Fig.4 Molecular structure of biosurfactants. Sophorolipids and rhamnolipids are glycolipids, while surfactin is a lipopeptide.

4 利用酶制备表面活性剂：绿色制造的一个例子

表面活性剂的另一个重要生产过程且需要改善可持续性的阶段，是其制造环节（见图 3）。美国耶鲁大学的保罗·阿纳斯塔斯博士概述了“绿色制造”的 12 项原则^[17]，可概括为：使用一种最少消耗能源和水的工艺实现对初始原料到最终产品的有效转化，同时尽量少使用溶剂水，尽量少产生有毒副产品或废物（如，废金属催化剂），且不会对在操作工艺设施的员工安全造成风险，也不会对消费者造成风险^[18]。传统的表面活性剂制造方法往往不符合绿色制造原则。例如，多元醇-脂肪酸酯传统上是在二甲基甲酰胺或二甲基亚砜（以提高反应物的相容性）等有毒有机溶剂存在下，在高温（100~200 °C）下，通过多元醇（例如糖衍生物或乙二醇）和脂肪酸原料（例如植物油）反应几个小时来制备的^[19]。虽然该反应产物产率很高，但需要重点对下游进行净化^[19]：

（1）因为通常使用化学计量过量的糖，需要去除反应物；（2）需要通过分子蒸馏回收溶剂，这是一个高能耗的过程；（3）有可能需要吸附和漂白以去除醛和酮；（4）以及由于不理想的副反应而导致产生一些深色试剂^[19]。从可持续性角度看，使用酶制备表面活性剂具有诸多固有的优势，如表 1 所述^[20]。该表还列出了更广泛使用酶的主要弊端，特别是其高成本和缓慢的催化速率，以及必须解决的一些问题，包括精准控制反应介质中的水分含量、酶的回收和再利用。

作者科研团队和许多同行都已开发了酶催化过程来制备糖酯，详见有关文献综述^[21-22]，包括蔗糖单酯（图 2）。脂肪酶是制备糖酯和其他表面活性剂最常用的酶。与其他表面活性剂合成酶相比，脂肪酶具有几个优点：在高温（例如 60~100 °C）和溶剂（例如丙酮、烷烃、超临界流体和离子液体）存在下具有相对较高的稳定性，相对较低的对 pH 和离子强度的敏感性，具有通过吸附到基质上被固定的能力，不需辅助因子，成本相对较低。脂肪酶的分子生物化学是酶最具理解代表性的。在大约 65 °C 条件下，在液相酰基供体（游离脂肪酸）中，我们用糖微粒（如蔗糖、果糖和木糖）的亚稳态无溶剂悬浮液作为反应介质制备

表 1 与用生物催化合成取代传统合成表面活性剂有关的优点、缺点和问题

Table 1 Advantages, disadvantages and issues pertaining to the replacement of conventional syntheses of surfactants with biocatalytic syntheses

优点
低温（降低能耗）
不需要极端值的 pH 值和离子强度
减少溶剂使用
改善员工生产安全
独特的选择性（例如，对映选择性和区域选择性）
降低副反应和副产物的产生
降低废物的产生（例如，废催化剂）
减轻下游净化的负担
缺点
高成本
低生物催化稳定性
反应速率慢
反应物需要高度纯化
问题
精确控制水
需要回收和再利用酶（例如，通过固定化）

糖酯。对于纯酰基供体溶剂，可悬浮的糖量较小： $<0.1 \text{ wt}\%$ ；但随着反应的进行，糖酯的形成大大提高了糖的允许浓度，能达到大约 1%~3%。固定化热稳定脂肪酶用于搅拌间歇模式或作为填料柱（约 65 °C）。去除酯化副产物——水分，是操作反应时的一个关键考虑因素。在反应初始阶段，自由蒸发能有效去除水分。然而，当转化率接近约 60% 时，由于接近热力学平衡，反应速率大大减慢，因此需要更强的手段来除水分，以实现进一步的转化（例如蒸发、氮气鼓泡或使用分子筛）。在糖酯制备中，也利用其他基团的亚稳悬浮液，特别是当使用一系列独特的非挥发性溶剂如离子液体时。这些离子液体在室温或接近室温时，由液态的熔融盐组成。我们能够达到 90%~95% 的转化率，最终产品几乎能符合标准化的纯度规格，而不需要下游纯化；脂肪酶被使用了一个月的反应操作后，没有明显的活性损失。然而，该方法需要改进才能满足工业生产操作所需的强效耐用性，特别是提高反应速率和提高使用粗碎、纯化度较低的初始原材料的能力。

脂肪酶已用于制备其他酯类表面活性剂，包括聚甘油蓖麻油酸酯（以蓖麻油为初始原料）和甘油单酯（monoacylglycerols, MAG），这两种都

是常见的食品乳化剂^[23-24]。脂肪酶形成酰胺键的能力已被用于制备正酰化烷基醇胺^[25]。脂肪酶的多功能性表现在氨基酸表面活性剂的制备中转化作用非常强, 详见 2015 年 Bordes R 等和 2016 年 Pinazo A 等关于氨基酸基表面活性剂的综述^[26-27]。氨基酸表面活性剂在个人护理和化妆品中有许多用途, 不仅因为它们在降低界面张力方面具有强效性能, 而且在抗菌方面也具有高活性。氨基酸是表面活性剂合成的有效生物基极性基团, 因为它们有 α -氨基、 α -羧基及其“R”基团中存在的官能团(分别为 ϵ -胺、 ϵ -羧基和精氨酸、谷氨酸和半胱氨酸的巯基)。这些基团允许以脂肪

酸、脂肪胺或脂肪醇为共同底物形成酯、酰胺和硫代酯键。例如, 脂肪酶催化的酰胺化反应可用于制备月桂酰肌氨酸钠(图 5), 该物质用于从月桂酸和肌氨酸的 α -胺基团中制备个人护理产品(例如洗发水、皮肤清洁剂和口腔护理产品)。此外, 图 5 中可作为凝胶剂的色氨酸酰胺, 是通过十六烷胺与色氨酸 α -羧基团之间的酰胺键形成的。这是最具创新的生物催化合成方法之一, 是通过 MAG 或 DAG 的甘油骨架的游离 OH 基团与精氨酸的 α -COOH 基团之间的酯键形成 MAG 或二酰基甘油(diacylglycerols, DAG)与精氨酸之间的结合(图 5)。

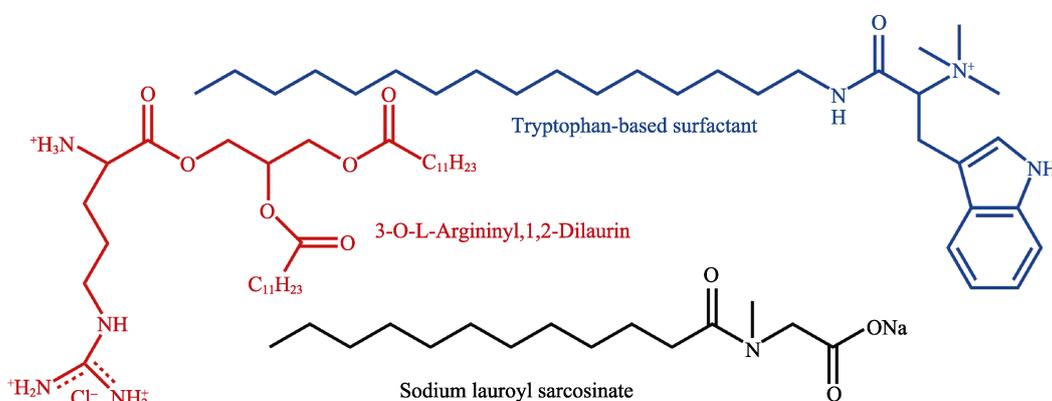


图 5 用酶制备氨基酸表面活性剂的例子

Fig.5 Examples of amino acid surfactants that can be prepared using enzymes. Sodium lauroyl sarcosinate is a commercially available surfactant that is mainly synthesized using chemical catalysts, but can be prepared using enzymes

月桂酰肌氨酸钠是一种商业上可用的表面活性剂, 主要是用化学催化剂合成的, 但也可以用酶制备。

烷基糖苷也是用糖苷酶从二糖和己醇中制备的^[28]。其反应产率低于大多数脂肪酶催化反应获得的产率, 二糖缩醛键被切断, 没有形成二糖-己醇缩醛。糖苷酶对水分含量非常敏感, 与脂肪酶相比, 在几乎无水的非水介质中不能有效催化。必须有大量水存在的情况下, 才能形成烷基糖苷, 因此需使用双相介质: 即低聚糖和糖苷酶的水溶液与富含脂肪醇的溶液平衡。可用葡萄糖基转移酶通过与环糊精的反应, 将烷基糖苷转化为烷基多糖苷(APGs)^[29-30]。

酶也可用于修饰磷脂, 磷脂是一种丰富的天然产生的表面活性剂, 通常用于食品和医药品。磷脂酶 A_1 和 A_2 选择性地分别将脂肪酰基水解或酯化成磷脂甘油骨架的 1-和 2 位。磷脂酶 A_1 衍生

物在商业上是可用的; 然而, 强效的磷脂酶 A_2 衍生物是不可用的。换一种方法, 脂肪酶可以模拟磷脂酶 A_1 的行为。如图 6 所示, 磷脂酰胆碱是最常见常用的磷脂(如大豆或鸡蛋的卵磷脂), 可以用独特的酰基来修饰。在所描述的例子中, 咖啡酸是木质素的一个组成部分, 是木质纤维素生物物质中发现的一种丰富的、暂未充分利用的生物聚合物, 可以通过两个反应步骤将其纳入 1 位: 脂肪酶催化水解在磷脂酰胆碱的 1 位, 然后脂肪酶催化酯化(或酯交换反应)咖啡酸(或咖啡酸甲酯)^[31]。由于生物活性咖啡酰基在乳液的油水界面上的定位, 所得衍生物是一种非常有效的水包油乳剂抗氧化剂。酶修饰的第二个例子是磷脂酶 D 的使用, 它可以用来交换磷脂的极性基团。近年来, 通过蛋白质工程, 磷脂酶 D 的活性和稳定性得到了提高^[32]。如图 6 所示, 工程磷脂酶 D 可以通过反式磷酸化, 用特殊的头部基团, 如氮

基酸苏氨酸，直接取代磷脂酰胆碱的胆碱头部基团，产生独特的磷脂^[32]。然而，磷脂酶 D 对胆

碱头部基团的水解裂解是作为副反应发生的（见图 6）^[32]。

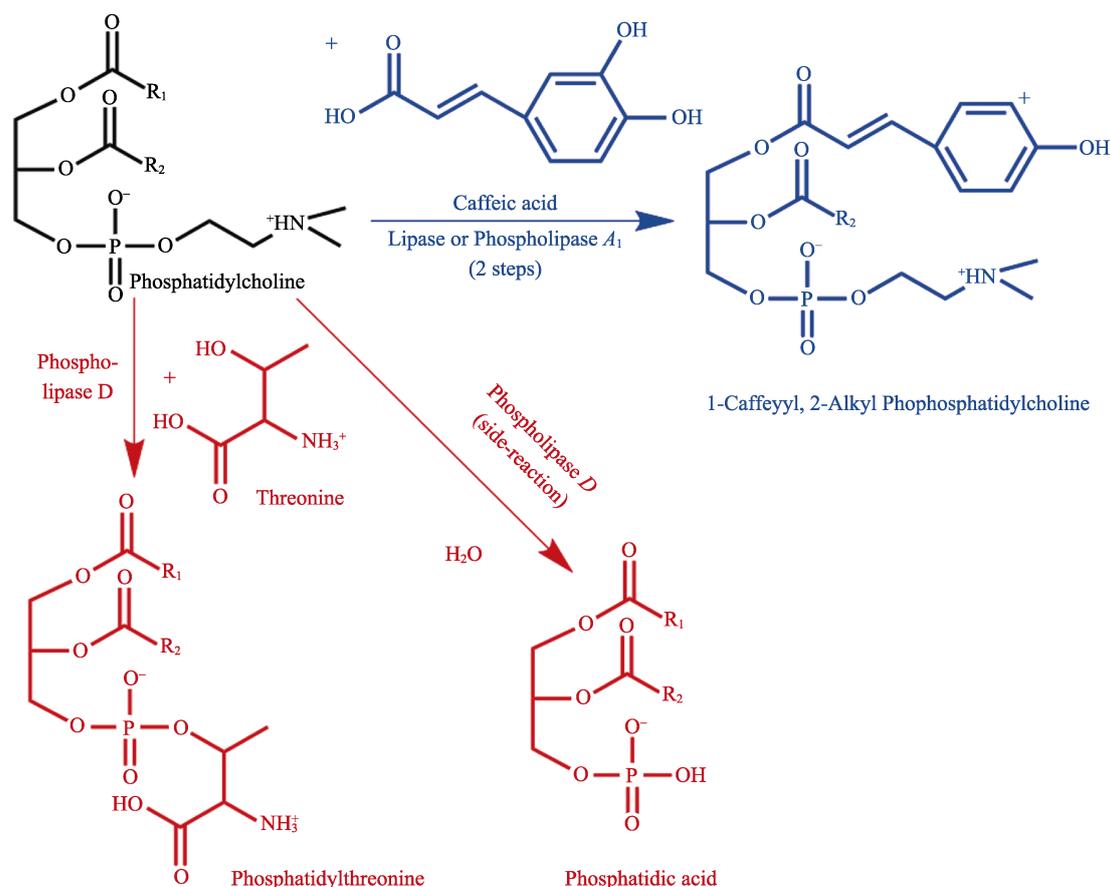


图 6 磷脂酰胆碱的酶改性。R1 和 R2 是 n-烷基链（如，月桂[十二烷基]酰基链对应于 R1=n-C₁₁H₂₃）。此图引用自参考文献^[31-32]。

Fig.6 Enzymatic modification of phosphatidylcholine. R₁ and R₂ are n-alkyl chains (e.g., lauric [dodecanoic] acyl chains correspond to R₁ = n-C₁₁H₂₃). The figure is based on references^[31-32].

5 结论

科学界在加强表面活性剂制备的生态可持续性方面取得了重大进展。提高可持续性的消费者动机将带来对生态友好型产品的持续兴趣。例如，与传统产品相比，许多消费者愿意为环境可持续的产品支付更高的价格^[33-34]。表面活性剂的绿色制造正处于初步发展阶段，但预计在未来几年将影响商业规模的加工生产。酶催化合成生物基表面活性剂和微生物发酵产生的生物表面活性剂将继续取得新的进展。

参考文献：

[1] MARKETS. Market report on biobased surfactants[J]. Pune, India, 2012.
[2] MENZIES J Z, MCDONOUGH K, MCAVOY D, et al. Biodegradation of nonionic and anionic surfactants in domestic wastewater under simulated sewer conditions[J]. Biodegradation, 2017, 28(1): 1-14.

[3] MAGUIRE R J. Review of the persistence of nonylphenol and nonylphenol ethoxylates in aquatic environments[J]. Water Quality Research Journal, 1999, 34(1): 37-78.
[4] MOULAY S, HALIM B, MOHAMED A. Algerian montmorillonite as a builder in a detergent powder[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2003, 6(2): 113-118.
[5] DOLL K M, ERHAN S Z. Polyol and amino acid-based biosurfactants, builders, and hydrogels. In: Hayes D G, Kitamoto D, Solaiman D K Y, Ashby R D, editors. Biobased Surfactants and Detergents: Synthesis, Properties, and Applications[J]. Champaign, IL: AOCS Press, 2009, 425-448.
[6] TAHARA M, OBAMA T, IKARASHI Y. Development of analytical method for determination of 1, 4-dioxane in cleansing products[J]. International Journal of Cosmetic Science, 2013, 35(6): 575-580.
[7] MASLIN M. Climate change: A very short introduction (3rd Ed.)[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 2014.
[8] STOTT P A, CHRISTIDIS N, OTTO F E L, et al. Attribution of extreme weather and climate-related events[J]. Wiley Interdisciplinary Review of Climate Change, 2016, 7(1): 23-41.
[9] HAYES D G, SMITH G A. Biobased surfactants: overview and

- industrial state of the art. In: Hayes D G, Solaiman D K Y, Ashby R D, editors. *Biobased Surfactants* (2nd Ed)[M]. Urbana, IL, USA: AOCS Press, 2019, 3-38.
- [10] HAYES D G, ASHBY R D, SOLAIMAN D K Y, editors. *Biobased surfactants: Synthesis, properties and applications* (2nd Ed.)[M]. Urbana, IL, USA: AOCS Press, 2019.
- [11] de OLIVEIRA M R, MAGRI A, BALDO C, et al. Review: Sophorolipids a promising biosurfactant and it's applications[J]. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 2015, 6(2): 161-74.
- [12] ARAB F, MULLIGAN C N. Rhamnolipids: Characteristics, production, applications, and analysis. In: Mulligan C N, Sharma S K, Mudhoo A, editors. *Biosurfactants: Research Trends and Applications*[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014, 49-104.
- [13] BOGAERT I N A, CIESIELSKA K, DEVREESE B, et al. Sophorolipids: microbial synthesis and application. *Biosurfactants: Production and Utilization --- Processes, Technologies, and Economics* (Surfactant Science Series, Vol 159)[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015, 19-36.
- [14] FENIBO E O, IJOMA G N, SELVARAJAN R, et al. Microbial surfactants: the next generation multifunctional biomolecules for applications in the petroleum industry and its associated environmental remediation[J]. *Microorganisms*, 2019, 7(11): 581.
- [15] HENKEL M, GEISLER M, WEGGENMANN F, et al. Production of microbial biosurfactants: Status quo of rhamnolipid and surfactin towards large-scale production[J]. *Biotechnology Journal*, 2017, 12(7).
- [16] ZANOTTO A W, VALERIO A, de ANDRADE C J, et al. New sustainable alternatives to reduce the production costs for surfactin 50 years after the discovery[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103(21-22): 8647-8656.
- [17] ANASTAS P T, WARNER J C. *Green chemistry: theory and practice*[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [18] SHELDON R A. Metrics of green chemistry and sustainability: past, present, and future[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(1): 32-48.
- [19] HONYDONCKX H E, de VOS D E, CHAVAN S A, et al. Esterification and transesterification of renewable chemicals[J]. *Topics in Catalysis*, 2004, 27(1-4): 83-96.
- [20] COWAN D, OXENBØLL K M, HOLM H C. Enzymatic bioprocessing of oils and fats[J]. *INFORM*, 2008, 19(4): 210-212.
- [21] KARMEE S K. Lipase catalyzed synthesis of ester-based surfactants from biomass derivatives[J]. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 2008, 2(2): 144-154.
- [22] PYO S-H, CHEN J, YE R, et al. Chapter 10 - Sugar Esters. In: Hayes D G, Solaiman D K Y, Ashby R D, editors. *Biobased Surfactants* (Second Edition)[M]. AOCS Press, 2019, 325-363.
- [23] ORTEGA-REQUENA S, GOMEZ J L, BASTIDA J, et al. Study of different reaction schemes for the enzymatic synthesis of polyglycerol polyricinoleate[J]. *Journal of Food Science and Agriculture*, 2014, 94(11): 2308-2316.
- [24] FREITAS L, PAULA A V, dos SANTOS J C, et al. Enzymatic synthesis of monoglycerides by esterification reaction using *Penicillium camembertii* lipase immobilized on epoxy SiO₂-PVA composite[J]. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 2010, 65(1-4): 87-90.
- [25] OTERO C. Selective enzymatic synthesis of N-acylated alkanolamine emulsifiers. In: Hayes D G, Kitamoto D, Solaiman D K Y, Ashby R D, editors. *Biobased Surfactants and Detergents: Synthesis, Properties, and Applications*[M]. Champaign, IL USA: American Oil Chemists' Society Press, 2009, 299-322.
- [26] BORDES R, HOLMBERG K. Amino acid-based surfactants – do they deserve more attention?[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, 222: 79-91.
- [27] PINAZO A, MANRESA M A, MARQUES A M, et al. Amino acid-based surfactants: New antimicrobial agents[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2016, 228: 17-39.
- [28] HANSSON T, ADLERCREUTZ P. Enzymatic synthesis of hexyl glycosides from lactose at low water activity and high temperature using hyperthermostable b-glycosidases[J]. *Biotransformation*, 2002, 20(3): 167-78.
- [29] SVENSSON D, ULVENLUND S, ADLERCREUTZ P. Efficient synthesis of a long carbohydrate chain alkyl glycoside catalyzed by cyclodextrin glycosyltransferase (CGTase)[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, 104(5): 854-61.
- [30] SVENSSON D, ULVENLUND S, ADLERCREUTZ P. Enzymatic route to alkyl glycosides having oligomeric head groups[J]. *Green Chemistry*, 2009, 11(8): 1222-1226.
- [31] ANANKANBIL S, PÉREZ B, BANERJEE C, et al. New phenophospholipids equipped with multi-functionalities: Regiospecific synthesis and characterization[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 523: 169-178.
- [32] DAMNJANOVIĆ J, MATSUNAGA N, ADACHI M, et al. Facile enzymatic synthesis of phosphatidylthreonine using an engineered phospholipase D[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2018, 120(6): 1800089.
- [33] GFK S E. In US, willingness to pay more for environment-friendly products grows[R]. Nuremberg, Germany 2017 [Available from: <https://www.gfk.com/en-us/insights/press-release/in-us-willingness-to-pay-more-for-environment-friendly-products-grows/>]. (Accessed 9 June 2020).
- [34] NIELSEN N V. The sustainability imperative. New insights on consumer expectations[R]. Molendinar, Australia 2015[Available from: <https://www.nielsen.com/us/en/insights/report/2015/the-sustainability-imperative-2/>]. (Accessed 9 June 2020). (作者介绍见下页)。

作者介绍



Douglas G. Hayes 博士:

1963 年出生, 美国田纳西大学 (UT) 生物系统工程和土壤科学系 (BESS) 教授, 是美国田纳西州大学与橡树岭国家实验室的联合教员。兼任美国油脂化学家协会 (AOCS) 理事会理事、《表面活性剂和洗涤剂》(*Journal of Surfactants and Detergents*) 杂志主编、《油棕榈研究》(*Journal of Oil Palm Research*) 和《粮油科学与技术》(*Grain & Oil Science and Technology*) 杂志编委会成员、武汉轻工大学和济南大学的客座教授。曾任美国油脂化学家协会杂志 (*JAOCs*) 高级副编辑。

Douglas G. Hayes 博士于 1986 年在美国爱荷华州大学获得化学工程学士学位, 1991 年在美国密歇根大学获得化学工程博士学位。

他在同行评审的期刊上发表了 85 篇文章, 撰写 23 个书籍章节和 3 本共同编辑的书籍。其研究工作获得了多个奖项, 包括 John J. 和 Dorothy G. McDow 优秀教员奖 (美国田纳西大学生物系统工程和土壤科学系, 2019 年)、Gamma Delta Sigma 团队奖 (美国田纳西大学农业研究所, 2019 年) 和美国田纳西大学农业研究影响奖 (2017 年)。其研究领域包括表面活性剂自组装系统、非水系统中的酶学、生物基和生物降解聚合物、微塑料和纳米塑料以及胶体的小角度散射分析。

(组稿/英译中: 谭洪卓; 术语校对: 宗振刚 (美国))

· 信息窗 ·

关于《粮油食品科技》期刊正规投稿途径的声明

《粮油食品科技》期刊由国家粮食和物资储备局主管、国家粮食和物资储备局科学研究院主办。近期, 有投稿作者反映, 一些不法分子伪造本刊官网网站、冒充编辑部投稿信息, 骗取投稿人投稿其假冒系统、支付高额版面费“发表”文章, 严重侵害了本刊名誉, 影响了广大读者和作者对本刊的信任, 造成不良社会影响。

在此, 本刊编辑部郑重声明: 《粮油食品科技》期刊从未委托过任何机构、任何个人或网站代理征集稿件及相关事宜, 更不会以个人名义向作者收取任何费用。

本刊官方网络投稿平台为 <http://lyspkj.ijournal.cn>, 除此之外的网站均为假冒网站。

咨询电话: 010-58523662/3608

咨询邮箱: bjb@chinagrains.org



期刊官网及投稿平台



期刊微信公众号

请广大作者和读者注意甄别, 谨防受骗。欢迎转发并广而告之。

特此声明!

《粮油食品科技》编辑部

2020 年 2 月 22 日