

# 废弃食用油脂的危害与资源化利用

姚志龙 闵恩泽(中国科学院院士、中国工程院院士)  
北京石油化工学院

姚志龙等.废弃食用油脂的危害与资源化利用.天然气工业,2010,30(5):123-128.

**摘 要** 废弃食用油脂是失去食用价值的油脂废弃物,包括餐饮业废油(俗称地沟油、泔水油、泔水油)、含油皂脚和含油废水。废弃食用油脂中含有大量脂肪酸等含碳有机物,具有污染环境和回收利用的双重性。合理回收利用废弃食用油脂,可替代石油资源作为生产生物柴油、表面活性剂、精细化学品和大宗化学品的重要原料;相反再次食用,则是危害人类身体健康和生存环境的污染物。为此,列举了废弃食用油脂的危害,同时指出了其有益的化工利用方式:制备无磷洗衣粉、制备生物破乳剂、制备脂肪酸、制备脂肪酸甲酯(生物柴油)。

**关键词** 废弃食用油脂 地沟油 危害 资源利用 无磷洗衣粉 生物破乳剂 脂肪酸 生物柴油

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.05.032

## 0 引言

废弃食用油脂是指人类在食用天然植物油和动物脂肪,以及油脂深加工过程中产生的一系列失去食用价值的油脂废弃物,俗称地沟油、泔水油、泔水油等。据专家计算,这些废弃食用油脂的量占食用油消费总量的20%~30%。以我国年均消费食用油量 $2\ 100\times 10^4$  t计,则每年产生废油 $400\times 10^4\sim 800\times 10^4$  t。能够收集起来作为资源的废弃油脂的量在 $400\times 10^4$  t左右<sup>[1]</sup>。废弃油脂中含大量有机物,具有污染环境和回收利用的双重性。这是一笔很重要的替代石油资源。

目前,我国废弃食用油脂没有得到合理利用。相反,废弃食用油脂已成为一种环境污染物,并冲击食品安全。在全球面临能源危机及环境污染日益严重的情况下,对废弃食用油脂进行合理回收利用,替代石油资源作为生产表面活性剂、化工原料、生物柴油等的原料,实现变废为宝,对于改善生态环境、缓解能源危机、促进经济可持续发展等方面都将起到推动作用。

## 1 废弃食用油脂的分类与危害

### 1.1 废弃食用油脂的分类

废弃食用油脂据其来源与组成可分为以下3类。

1) 餐饮过程中产生的废油,也称餐饮废油。餐饮废油与新鲜食用油脂的脂肪酸组成基本一致,主要都含有油酸(C18:1)及亚油酸(C18:2),但脂肪酸类物质的比例发生了较大变化。Kock等认为废弃煎炸油比新鲜食用油脂多了约30%的极性化合物<sup>[2]</sup>。游离脂肪酸含量等性质的变化与总的极性化合物含量呈线性关系,这些变化使得皂化值与酸价都变大,碘值变小<sup>[3-4]</sup>。

2) 食品加工过程中产生的含油皂脚(Soapstock),它是精炼各种植物油时产生的一种副产品,产生量为油脂生产总量的2%~3%,其组成和性质由原料中的脂肪酸决定<sup>[5]</sup>。同餐饮废油相比,皂脚也主要含有油酸和亚油酸,但同时还含有少量的棕榈酸(C16:1)、亚麻酸(C18:3)以及其他脂肪酸<sup>[6]</sup>。此外,皂脚中还含有大量的碳水化合物,如棉籽油皂脚中脂肪酸以及碳水化合物的含量约占其干重的60%<sup>[7]</sup>。

3) 各种含油废水,如橄榄油污水等,含有糖、氮化合物、有机酸、残留的橄榄油及有毒物质。

### 1.2 废弃食用油脂的危害

废弃食用油脂中,危害最大的是餐饮业废油。餐饮业废油被一些不法商贩收购后经过提炼、脱色、脱臭、脱酸等处理后再次作为食用油脂销售,而一些餐饮

作者简介:姚志龙,1971年生,研究员,博士;主要从事生物质化工利用技术和石油化工技术研发工作,现任北京石油化工学院恩泽生物质精细化工实验室副主任。地址:(102617)北京市大兴区黄村清源北路19号北京石油化工学院。电话:(010)81292343。E-mail:yaozL@bipt.edu.cn

单位或小摊贩使用这些油脂,进行低价恶性竞争,以牟取暴利<sup>[8]</sup>。

食用油脂经高温加热,营养价值会降低,原因是高温加热会使油脂中的维生素 A、胡萝卜素、维生素 E 等营养成分被破坏。经高温加热的油脂,其供热量只有未经高温加热油脂的 1/3 左右,不仅不易被机体吸收,而且还妨碍对同时进食的其他食物的吸收。餐饮业废油的形成和精炼过程经长时间反复多次高温加热,不饱和脂肪酸和饱和脂肪酸等营养成分被破坏殆尽,但酚类、酮类和短碳链的游离脂肪酸、脂肪酸聚合物、黄曲霉毒素等多种有毒有害成分却大大增加,其中多环芳烃等致癌物质也开始形成。人们食用掺兑餐饮业废油的食用油时,最初会出现头晕、恶心、呕吐、腹泻等中毒症状。如长期食用,轻者会使人体营养缺乏,重者内脏严重受损甚至致癌<sup>[9]</sup>。瑞士科学家发现,炸土豆条中含有较高的致癌物质——聚丙烯酰胺。动物实验结果表明,废油可缩短果蝇 30% 以上的寿命,增加果蝇的不育率<sup>[10]</sup>。餐饮废油如直接用于养猪业,会导致泔水猪问题,易引起间接人畜感染<sup>[11]</sup>;如直接将其排入下水道,不仅会造成资源浪费,而且还严重污染环境。

## 2 废弃食用油脂的化工利用

### 2.1 废弃食用油脂制备无磷洗衣粉

赵玲等用活性白土在活性白土用量 5%、脱色温度控制在 80~120 °C、脱色时间 25 min 的条件下<sup>[12]</sup>,对废弃食用油脂脱色,可以有效地去除废弃食用油脂中的色素、气味物质及部分杂质;以脱色处理后的废弃食用油脂为原料,以质量分数为 30% NaOH 溶液在温度 100 °C 下对其进行皂化,皂化反应时间 4 h,可获得色泽浅、气味小的皂基,并具有较好的乳化能力和去污效果。梁芳慧等将脱色后地沟油皂化后的产物,直接作为生产洗衣粉的原料<sup>[13]</sup>。研究表明,脱色后地沟油制取的皂料与 LAS、AEO-9、TX-10 具有良好的复配性,加入各种助剂后配成的洗衣粉,具有去污性能较高、粉质柔软、泡沫小、易漂洗等优点,而且主要技术指标均符合国家标准。其优选配方为:地沟油皂料为 8%,碳酸钠为 12%,LAS 为 2%,AEO-9 为 4%,TX-10 为 2%,偏硅酸钠为 4%,4A 沸石为 7%,柠檬酸钠为 9%,其余为硫酸钠。

### 2.2 废弃食用油脂制备生物破乳剂

生物破乳剂是近年发展起来的一种新型破乳剂,是由微生物代谢作用产生的一类具有亲水、亲油基团的表面活性物质。与化学破乳剂相比,生物破乳剂具

有结构更为复杂多样、选择性好、低毒和易生物降解等特点<sup>[14-15]</sup>,可应用于环境保护和石油开采炼制等领域。目前对生物破乳剂的开发已经成为破乳剂研究的重要方向,而高效生物破乳剂产生菌的研究则是开发高效生物破乳剂的关键<sup>[16]</sup>。以生物破乳剂为代表的生物表面活性剂均存在成本过高的问题,主要原因是培养基中的碳源一般采用疏水性的碳氢化合物(如烷烃)的混合物等。这类工业品的价格随石油价格而波动,使得生物破乳剂的原料成本较高。廉价碳源的应用是降低生物破乳剂成本的重要途径之一<sup>[17-18]</sup>。

刘佳等筛选得到高效破乳剂产生菌 *Alcaligenes* sp. XJ-T-1<sup>[19]</sup>,利用破乳菌株 XJ-T-1 以废弃油脂为碳源发酵生产生物破乳剂,与以石蜡为碳源相比,可提高生物破乳剂产量 416 倍,其 CMC-1 提高到 20 倍;废弃油脂培养下的 XJ-T-1 产生的生物破乳剂仍能保持相同的高破乳活性,且均为脂肽类生物表面活性剂,其高效破乳效能和低成本优势有望推进工业化应用。

### 2.3 废弃食用油脂制备脂肪酸

废弃食用油脂中含有大量硬脂酸和油酸,通过对废弃食用油脂水解后,可分离出各种脂肪酸(主要为硬脂酸、油酸)。油脂水解的方式大致分为常压下皂化分离和高压酸化分离这两种类型<sup>[20]</sup>。混合脂肪酸的分离方式大致包括:冷冻压榨法、表面活性剂法、精馏法等<sup>[21]</sup>。

张世敏等以十二烷基苯磺酸钠为乳化剂<sup>[22]</sup>,浓硫酸为催化剂,在常压下水解废弃油脂制备混合脂肪酸,取得了很好的效果,并通过试验分析得到水解反应的最佳条件为:乳化剂用量 8% (重量分数),催化剂量为 10% (重量分数),水量为 300% (重量分数),水解时间 13 h。在此条件下,水解产物的酸值达到 173.3 mgKOH/g。

脂肪酸是油脂化工的基础原料,以脂肪酸为原料衍生的下游产品广泛用于纺织、食品、医药、日用化工、石油化工、橡塑、采矿、交通运输、铸造、金属加工、油墨、涂料等各种行业<sup>[23]</sup>。

### 2.4 废弃食用油脂制备脂肪酸甲酯(生物柴油)及其化工利用

#### 2.4.1 制备脂肪酸甲酯(生物柴油)

生物柴油是指以动植物油或其水解的脂肪酸为原料,与一元醇通过醇解或酯化生产的脂肪酸一元酯。它具有可再生、绿色环保、可替代现有石化柴油等特点,目前已成为最受欢迎的石化柴油替代品<sup>[24]</sup>。但是以动植物油为原料制造生物柴油的成本偏高,而将餐饮废油回收制造生物柴油则是一个很好的解决方

案<sup>[25]</sup>。制备生物柴油是废弃食用油脂回收利用研究最集中的一个领域<sup>[26-29]</sup>。

目前制备生物柴油的主要方法是化学法,它是将废油脂与低碳醇在酸碱催化剂或生物酶催化剂作用下进行转酯化反应,经洗涤干燥即得生物柴油。常用的酸催化剂有浓硫酸、磺酸、盐酸、磷酸、硼酸等;常用的碱催化剂有金属醇盐、KOH、NaOH、KCN、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>等。酸催化对原料要求不高,但反应时间长,温度高,对反应设备也有特殊要求;碱催化工艺转化速度快,效率高,设备成本相对较低,但对原料酸值有要求,酸值过高会产生皂化现象<sup>[30]</sup>。

生物酶催化近年来也有较多的研究报道,该方法具有反应条件温和、醇用量小、无污染物排放等优点。但酶价格昂贵、催化活性稳定性差、反应时间长<sup>[31-32]</sup>。

废油在超强酸、超强固体碱和金属氧化物等催化或无催化剂条件下,与超临界状态的甲醇、乙醇、正丙醇、正丁醇、正戊醇和正己醇等反应可制成生物柴油<sup>[33]</sup>。超临界法制备生物柴油因具有环境友好、反应分离同时进行、时间短和转化率高等优点而成为近年来研究的热点<sup>[34]</sup>。

#### 2.4.2 脂肪酸甲酯的化工利用

脂肪酸甲酯与油脂和脂肪酸相比有很多优点,如储存稳定性好、沸点低、分馏容易、腐蚀性小等。随着人们对脂肪酸甲酯的深入研究,其用途也在不断扩大,除直接作为柴油机燃料外,还被广泛用作化工产品生产的原料<sup>[35]</sup>。脂肪酸甲酯的化工利用包括精制加工(refining processing)的直接利用和化学加工(chemical processing)的间接利用<sup>[36]</sup>。

脂肪酸甲酯的直接利用主要利用其具有良好的润滑和溶解能力,而直接作为润滑剂和工业溶剂。主要包括石油柴油润滑性添加剂、铝箔轧制液、沥青释放剂、工业溶剂等。

脂肪酸甲酯的间接利用主要是作为生产表面活性剂的中间体原料。目前,常用的表面活性剂主要来源于石油、天然气和煤等不可再生资源,不仅难以生物降解,而且易造成环境污染。因此,以天然可再生资源为原料生产表面活性剂已经成为近年来表面活性剂工业的主要发展方向<sup>[37-38]</sup>。以脂肪酸甲酯为原料生产的表面活性剂产品种类很多,如通过加氢生产脂肪醇<sup>[39]</sup>,通过磺化中和生产脂肪酸甲酯磺酸盐(MES)<sup>[40]</sup>,与蔗糖反应生产蔗糖酯(SE)、蔗糖聚酯(SPE)<sup>[41-42]</sup>,与环氧乙烷反应合成乙氧基化脂肪酸甲酯(FMEE)<sup>[43]</sup>,经氨化加氢制备脂肪胺<sup>[44]</sup>,与乙二醇胺热缩合反应生产烷醇酰胺<sup>[45]</sup>等。

#### 2.4.3 联产甘油的化工利用

废弃油脂制备生物柴油生产过程的主要联产物为甘油。甘油的化学名为丙三醇,是无色具有甜味的黏稠液体,能与水以任意比混溶,有强烈的吸湿性,是重要的化工原料。甘油作为化工原料,既可以直接利用,也可以通过生物、化学加工制备其他化工产品。

甘油的直接利用主要是利用其具有较强的吸水性、无毒、具有甜味等特性,来生产化妆品、护肤品、烟草、医药法定药剂以及食品添加剂等。如,利用其具有甜味、无毒,作为食品工业的甜味添加剂;利用其吸水性强、对皮肤无刺激,作为软膏制品(牙膏、香膏、医用软膏等)和护肤品的防干剂;利用其水溶液冰点低,作为防冻剂和致冷剂等。但总体而言,甘油的需求量不大。

1,2-丙二醇(1,2-propanediol 或 1,2-propylene glycol,简称为 1,2-PDO)是无色黏稠稳定的吸水性液体,无味、无臭、易燃、低毒。与水、乙醇和多种有机溶剂混溶,是重要的化工原料,其用途相当广泛。它主要用作生产不饱和树脂、增塑剂、表面活性剂、乳化剂和破乳剂的原料,也可用作吸湿剂、抗冻剂、润滑剂、溶剂和热载体等使用。

1,2-丙二醇的现有生产方法普遍采用环氧丙烷水合法,存在较大的环境污染和成本偏高等问题。以甘油为原料通过氢解合成 1,2-丙二醇目前尚未实现工业化,但已取得一定的研究进展<sup>[46]</sup>。

1,3-丙二醇(1,3-propanediol,简称为 1,3-PDO)是生产聚对苯二甲酸丙二酯(Polytrimethylene terephthalate,简称 PTT)的原料。PTT 具有良好的连续印染特性,抗紫外、臭氧和氮氧化物的着色性,抗内应力,低水吸附,低静电以及良好的生物可降解性等,在地毯、工程塑料、服装面料等领域应用广泛,成为目前国际上合成纤维开发的热点之一。预计到 2010 年全球 PTT 的需求量将超过  $100 \times 10^4$  t。

目前,世界上已实现工业化生产 1,3-丙二醇的合成路线有两条:一种是 Shell 公司的环氧乙烷羰基化法;另一种方法是 Degussa 公司的丙烯醛水合氢化法,该技术于 1997 年出售给 DuPont 公司。化学路线存在的突出问题是它们都是利用乙烯和丙烯等石油化工原料,这样 1,3-丙二醇的合成就会极大地受原油价格的影响,因而发展的趋势是开发可再生资源替代石油资源的新反应路线,比如通过甘油的生物发酵和催化化学转化路线等。DuPont 公司正在研制开发利用微生物发酵法生产 1,3-丙二醇,该法目前尚处于实验室研究阶段<sup>[47]</sup>。以甘油为原料的微生物发酵法合成

1,3-丙二醇,具有反应条件温和、操作简单的优点,但该法收率较低,副产物多且高浓度甘油不利于菌种的存活,将限制其工业应用。因而,研究开发以甘油为底物,通过催化氢解制备1,3-丙二醇的技术是很具竞争性和发展潜力的。

甘油化学法合成1,3-丙二醇主要有3种方法:①甘油脱羟基法;②甘油加氢脱水法;③甘油脱水成丙烯醛后再水合加氢法。Wang等报道了甘油脱羟基制备1,3-丙二醇<sup>[48]</sup>,首先甘油同苯甲醛发生羟醛缩合反应,经提纯后得5-羟基-2-苯基-1,3-二氧六环,将该化合物中的羟基同磺化物反应并水解后,加氢脱除磺酸基,即得1,3-丙二醇。因反应物磺酰氯是一种产量小、价格高的化学品,限制了该法的工业应用,如何降低磺酰氯的生产成本是该技术工业化的关键。Chaminand等将铜、钨、铈等金属催化剂负载在不同载体上制得催化剂<sup>[49]</sup>,用于研究甘油选择加氢脱水制备1,3-丙二醇。结果表明,酸性环境均有利于提高反应速率和目标产物的选择性,产物主要为1,3-丙二醇和1,2-丙二醇。Ott等在亚临界或超临界水中研究甘油脱水成丙烯醛的脱水反应<sup>[50]</sup>。结果表明,硫酸锌的加入,可促使反应的进行,提高丙烯醛的收率,生成的丙烯醛可水合生成1,3-丙二醇。Haas等开发了一种由甘油经三步反应同时生成1,3-丙二醇和1,2-丙二醇的工艺<sup>[51]</sup>。第一步是将甘油在近临界或超临界的条件下脱水生成丙烯醛,第二、三步分别是丙烯醛的水合和氢化反应。这种方法其实就是将生产丙烯醛和丙烯醛水合氢化制备1,3-丙二醇的2个工艺结合了起来,以减少工艺流程和降低生产过程中的毒害作用。同上述方法相比,Suppes使用了新型亚铬酸铜催化,在220℃和常压下有效地将甘油转化为丙二醇,且具有副产物少、工艺简单等优点,由此他获得了2006年美国绿色化学挑战奖的学术奖<sup>[52]</sup>。

环氧氯丙烷(Epichlorohydrin,简称为ECH)是一种易挥发、不稳定的无色液体,有与氯仿、醚相似的刺激性气味,微溶于水,能与多种有机溶剂混溶,与多种有机液体形成共沸物。环氧氯丙烷是一种重要的有机化工原料,主要用于生产环氧树脂、氯醇橡胶、表面活性剂和增塑剂等。我国当前环氧氯丙烷供不应求,主要依赖进口。因此,迫切需要大力发展环氧氯丙烷的生产能力<sup>[53]</sup>。

环氧氯丙烷现在工业上主要以丙烯为原料,经过氯气氯化等多步反应合成。最近Solvay公司报道采用新型Epicerol工艺<sup>[54]</sup>,利用甘油为原料代替丙烯一步生产环氧氯丙烷。该工艺采用新型催化剂,催化甘

油与HCl反应生成二氯丙醇中间体,然后在NaOH碱作用下转化为目标产物。该工艺跟传统的丙烯工艺相比可大大减少氯的排放。在法国Tavaux建成的装置,于2007年上半年投运,环氧氯丙烷生产能力为 $1 \times 10^4$  t/a,由法国生物柴油生产商Diester工业公司供应其所需的甘油。

### 3 结束语

废弃食用油脂中含有大量脂肪酸等有机物,是生产生物柴油、脂肪酸、脂肪醇、表面活性剂、蔗糖聚酯、丙二醇等精细化学品和大宗化工产品的重要原料,同时还可以作为生产生物表面活性剂的有机碳源。这些技术的开发和应用不仅可以部分替代我国有限的油气资源,而且所生产的产品附加值高、可生物降解、环境友好,同时为解决废油脂对环境和社会的危害也找到了有效的出路。

我国废弃食用油资源丰富,但成分复杂、来源不稳定,需要建立合理的回收方法及制度;完善相关的检测方法;加大政策扶持力度;加强环保节约的舆论宣传;加强科研部门与企业的合作,走产业化、规模化发展的路子。

### 参 考 文 献

- [1] 冀星,李淑梅,李丽,等.废弃油脂收集利用体系中存在的问题与治理对策[J].中国资源综合利用,2005(3):9-12.
- [2] KOCK J L F, BOTH A, BLOCH J, et al. Used cooking oil: science tackles a potential health hazard [J]. South African Journal of Science, 1996, 92(11/12):513-514.
- [3] MELTON S L, JAFAR S, SYKES D, et al. Review of stability measurements for frying oils and fried food flavor [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1994, 71(12):1301-1308.
- [4] TYAGI V K, VASISHTHA A K. Changes in the characteristics and composition of oils during deep-fat frying [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1996, 73(4):499-506.
- [5] BENINCASA M, ACCORSINI F R. Pseudomonas aeruginosa LBI production as an integrated process using the wastes from sunflower-oil refining as a substrate [J]. Biore-source Technology, 2008, 99(9):3843-3849.
- [6] DURANT A A, DUMONT M J, NARINE S S. In situ silylation for the multicomponent analysis of canola oil by-products by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Analytica Chimica Acta, 2006, 559(2):227-233.
- [7] DOWD M K. Compositional characterization of cottonseed soapstocks [J]. Journal of the American Oil Chemists' Socie-

- ty, 1996, 73(10):1287-1295.
- [8] 黄飏, 徐娇, 郎晓东. 废弃食用油脂的危害与管理[J]. 中国卫生监督杂志, 2007, 14(2):109-111.
- [9] 王乐, 胡健华, 战锡林. 微波消解——电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)同时测定地沟油中微量元素[J]. 中国卫生检验杂志, 2007, 17(11):1993.
- [10] 尚闻. “垃圾老油”危害健康的致癌物质[J]. 健康人生, 2006(6):4-5.
- [11] 赵伟伟, 史耀疆, 高东胜, 等. 西安市泔水油循环利用模式研究[J]. 生态经济, 2007(8):112.
- [12] 赵玲, 尹平河, 邓琪. 餐饮业废油脂脱色及皂化工艺[J]. 暨南大学学报: 自然科学版, 2004, 25(5):632-636.
- [13] 梁芳慧, 尹平河, 赵玲, 等. 地沟油生产无磷洗衣粉的研究[J]. 广东化工, 2005(9):5-8.
- [14] BANAT I M. Characteristics of biosurfactants and their use in pollution removal - state of the art [J]. Acta Biotechnol, 1995, 15(3):251-267.
- [15] 陈延君, 王红旗, 王然, 等. 鼠李糖脂对微生物降解正十六烷以及细胞表面性质的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(9):21172-2122.
- [16] CHEN C Y, BAKER S C, RICHARD C D. The application of a high throughput analysis method for the screening of potential biosurfactants from natural sources [J]. J Microbiol Meth, 2007, 70(3):503-510.
- [17] MUKHEJEE S, DAS P, SEN R. Towards commercial production of microbial surfactants [J]. Trends Biotechnol, 2006, 24(11):509-515.
- [18] FELIZARDO P, CORREIA M J N, RAPOSO I, et al. Production of Biodiesel from Waste Frying Oils [J]. Waste Manage, 2006, 26(5):487-494.
- [19] 刘佳, 黄翔峰, 陆丽君, 等. *Alcaligenes* sp. XJ2T21 利用废弃油脂生产破乳剂研究 [J]. 环境科学, 2009, 30(6):1779-1784.
- [20] 曹萍, 陈绍伟. 厨房垃圾处理的工艺实验 [J]. 上海环境科学, 1997, 16(9):37-39.
- [21] 许树龙. 厨房的垃圾分类和厨内的垃圾处理机 [J]. 家饰, 2002(3):140-141.
- [22] 张世敏, 查国君, 张无敌, 等. 废弃油脂常压水解制备混合脂肪酸的研究 [J]. 现代农业科技, 2008(14):298-300.
- [23] 王治军, 王伟. 热水解预处理改善污泥的厌氧消化性能 [J]. 环境科学, 2005, 26(1):68-71.
- [24] KALLIGEROS S, ZANNIKOS F, STOURNAS S, et al. An investigation of using biodiesel/marine diesel blends on the performance of a stationary diesel engine [J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 24(2):141-149.
- [25] 嵇磊, 张利雄, 徐南平. 利用高酸值餐饮废油脂制备生物柴油 [J]. 石油化工, 2007, 36(4):393.
- [26] 易伍浪, 韩明汉, 吴芹, 等. 酸离子液体催化废油脂制备生物柴油 [J]. 过程工程学报, 2007, 7(6):1144-1147.
- [27] ZHENG S, KATES M, DUBE M A, et al. Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil [J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(3):267-272.
- [28] 陈志锋, 吴虹, 宗敏华. 固定化脂肪酶催化高酸废油脂酯交换生产生物柴油 [J]. 催化学报, 2006, 27(2):146-150.
- [29] WANG YONG, SHIYI OU, PENGZHAN LIU, et al. Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(1):184-188.
- [30] 刘超锋, 林茹, 孟庆乐. 餐饮废油生产生物柴油简评 [J]. 精细石油化工, 2007, 24(5):66-68.
- [31] ZHANG Y, DUBE M A, MCLEAN D D, et al. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment [J]. Bioresource Technology, 2003, 89(1):1-16.
- [32] 郭萍梅, 黄凤洪, 黄庆德. 高酸值废弃油脂转化生物柴油的技术研究 [J]. 中国油脂, 2006, 31(7):66-69.
- [33] 王存文, 肖建华, 吴元欣, 等. 生物柴油超临界制备工. 中国专利: CN 1594504A [P]. 2005-03-16.
- [34] KUSDIANA D, SAKA S. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment [J]. Bioresource Technology, 2004, 91(3):289-295.
- [35] EDER K. Gas chromatographic analysis of fatty acid methyl esters [J]. Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications, 1995, 671(1/2):113-131.
- [36] 姚志龙, 闵恩泽. 生物柴油(脂肪酸甲酯)化工利用技术进展 [J]. 天然气工业, 2010, 30(1):127-132.
- [37] MARTIN MITTELBAACH, CLAUDIA REMSCHMIDT. Biodiesel-the comprehensive handbook [M]. First Edition. Vienna: Boer-sedruck Ges. m. b, H, 2004: 272-273.
- [38] 谢文磊. 粮油油脂化工产品化学与工艺学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [39] JOSHI K S, JEELANI S A K, BLICKENSTORFER C, et al. Influence of fatty alcohol antifoam suspensions on foam stability [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 2005, 263(1/3):239-249.
- [40] SHERRY A E, CHAPMAN B E, CREEDON M T. Process to improve alkyl ester sulfonate surfactant compositions. US Patent: 542973 [P]. 1995-06-04.
- [41] 汪多仁. 蔗糖脂肪酸聚酯的开发与应用进展 [J]. 淀粉与淀粉糖, 2003(2).
- [42] ZHONGDONG L, HUIHUA L, PENG L, et al. Study on the synthesis and physicochemical properties of sucrose polyester [J]. Chin. J. Reactive Polymers, 2006, 15(1):29-34.
- [43] HRECZUCH W, SZYMANOWSKI J. Synthesis of ethoxylated fatty acid methyl esters: discussion of reaction path-

- way[J].Comun. Jorn. Com. Esp. Deterg.,2001,31:167-178.
- [44] RIGAIL-CEDENO ANDRES, SUNG CHONG SOOK PAIK. Fluorescence and IR characterization of epoxy cured with aliphatic amines [J]. Polymer,2005,46(22):9378-9384.
- [45] ANSGAR B, UWE P, FRANK C. Method of preparing sulphated fatty-acid alkanolamides. World Intellectual Property Organisation(WO) Patent:010084[P].1993-05-27.
- [46] 解从霞,于世涛,刘仕伟,等.生物柴油副产甘油深加工的研究现状[J].生物质化学工程,2008,42(4):35-42.
- [47] HAAS T, JAEGER B, WEBER R, et al. New diol processes:1,3-propanediol and 1,4-butanediol[J].Applied Catalysis A:General,2005,280(1):83-88.
- [48] WANG K Y, MART IN C, HAWLE Y, et al. Conversion of glycerol to 1,3-propanediol from glycerol via selective dehydroxylation[J].Ind. Eng. Chem. Res.,2003,42(13):2913-2923.
- [49] CHAM INAND J, DJAKOV ITCH L A, GALLEZOT P, et al. Glycerol hydrogenolysis on heterogeneous catalysts[J].Green Chemistry,2004,6(8):359-361.
- [50] OTT L, BICKER M, VOGEL H. Catalytic dehydration of glycerol in sub- and supercritical water: A new chemical process for acrolein production [J]. Green Chemistry, 2006,8(2):214-220.
- [51] DEGUSSA AKTIENGESELLSCHAFT, HAAS T, NEHER A, et al. Process for the simultaneous production of 1,2- and 1,3-propanediol: US Patent 5426249[P].1995-06-20.
- [52] 熊捷,宋臻善,叶君.第十一届美国总统绿色化学挑战奖介绍[J].精细化工,2006,23(12):1145-1147.
- [53] 蒋建兴,张陪陪,姚成.甘油生产环氧氯丙烷的发展概况[J].现代化工,2006,26(增刊):71-73.
- [54] FREDDY G. Solvay will make epichlorohydrin from glycerol[J].Ind. Bioprocess,2006,28(3):8-9.

(收稿日期 2010-05-04 编辑 居维清)