

# L-天冬氨酸离子液体催化 不同脂肪酸酯化的实验研究

汪文伟<sup>1</sup>, 赵振兴<sup>1</sup>, 郑礼<sup>1</sup>, 韩本勇<sup>1,2</sup>, 王昌梅<sup>1\*</sup>, 张无敌<sup>1</sup>, 尹芳<sup>1</sup>,  
许玥<sup>1</sup>, 杨斌<sup>1</sup>, 赵兴玲<sup>1</sup>, 吴凯<sup>1</sup>, 柳静<sup>1</sup>, 杨红<sup>1</sup>, 刘士清<sup>1</sup>  
(1. 云南师范大学太阳能研究所, 云南昆明 650500;  
2. 昆明理工大学生命科学与技术学院, 云南昆明 650504)

**摘要:**采用实验室自制的天冬氨酸硫酸盐离子液体[Asp]HSO<sub>4</sub>催化月桂酸和硬脂酸酯化制备相应脂肪酸甲酯。考察了反应时间、反应温度、甲醇与原料物质的量之比以及[Asp]HSO<sub>4</sub>用量对脂肪酸甲酯的影响。结果表明,以月桂酸为原料,在反应时间为24 h、反应温度为65℃,n(甲醇):n(月桂酸)为3:1以及[Asp]HSO<sub>4</sub>质量分数为5%时具有较为优良的催化效果,催化效率可达到91.09%;以硬脂酸为原料时,最佳反应条件为反应时间为15 h、反应温度为55℃,n(甲醇):n(硬脂酸)为5:1以及[Asp]HSO<sub>4</sub>质量分数为5%,催化效率可达到93.16%。该催化剂重复使用4次,催化效率仍然可达到90%以上,具有很好的重复使用性能。

**关键词:**L-天冬氨酸离子液体;酯化反应;月桂酸甲酯;硬脂酸甲酯

中图分类号:TQ645;TK63

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)05-0153-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.05.031

## Experimental study on catalytic esterification of different fatty acids over L-aspartic acid ionic liquid

WANG Wen-wei<sup>1</sup>, ZHAO Zhen-xing<sup>1</sup>, ZHENG Li<sup>1</sup>, HAN Ben-yong<sup>1,2</sup>, WANG Chang-mei<sup>1\*</sup>,  
ZHANG Wu-di<sup>1</sup>, YIN Fang<sup>1</sup>, XU Yue<sup>1</sup>, YANG Bin<sup>1</sup>, ZHAO Xing-ling<sup>1</sup>, WU Kai<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>,  
YANG Hong<sup>1</sup>, LIU Shi-qing<sup>1</sup>

(1. Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. Faculty of Life Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

**Abstract:** Methyl ester of fatty acids are prepared via catalytic esterification of lauric acid and stearic acid over L-aspartic acid sulfate ionic liquid [Asp]HSO<sub>4</sub> made in the laboratory. The effects of reaction time, reaction temperature, the ratios of methanol to lauric acid and stearic acid, and the addition amount of [Asp]HSO<sub>4</sub> on the catalytic preparation are investigated. It is found that an excellent catalytic effect can be realized with a catalytic efficiency of 91.09% when lauric acid is used as raw materials, reaction lasts for 24 h, reaction temperature remains at 65℃, n(methanol):n(lauric acid) is 3:1, and [Asp]HSO<sub>4</sub> dosage is 5%. The catalytic efficiency can reach 93.16% when stearic acid is used as raw material, reaction lasts for 15 h, reaction temperature maintains at 55℃, n(methanol):n(stearic acid) is 5:1, and [Asp]HSO<sub>4</sub> dosage is 5%. The catalytic efficiency can still exceed 90% after the catalyst is reused for 4 times.

**Key words:** L-aspartic acid ionic liquid; esterification reaction; methyl laurate; methyl stearate

随着化石能源的日益消耗和人们环保意识的提高,开发对环境无害且可再生的能源是目前研究的热点。生物柴油作为一种清洁的能源,是由动植物油脂或微生物油脂为原料生产的脂肪酸烷基单酯(甲酯或乙酯),与石化柴油具有相似的燃料特性<sup>[1-2]</sup>。生物柴油本身具有可再生、少污染和安全性能好等优点,但制备过程中使用的传统催化剂存在诸多不足<sup>[3-5]</sup>。离子液体是指由特定的有机阳

离子与无机或有机阴离子构成的在室温或近室温呈液态的熔盐体系<sup>[6]</sup>。因其本身具有不易挥发、较好的化学稳定性等优点,作为催化剂受到了广泛关注<sup>[7-9]</sup>。

Tao等<sup>[11]</sup>使用QSAR模型对离子液体的毒性进行了分析,结果认为离子液体的毒性主要取决于阳离子,并随着阳离子烷基链的长度和支化程度的增加而增大,但氨基酸离子液体可生物降解,易于制

收稿日期:2020-06-28;修回日期:2021-03-11

基金项目:云南省国际科技特派员项目(2015IA022);云南省农村能源工程重点实验室基金项目(2017KF03);云南师范大学大学生科学研究训练项目(ky2017-137,ky2018-142)

作者简介:汪文伟(1997-),男,硕士研究生,研究方向为生物质能与环境工程,879823476@qq.com;王昌梅(1975-),女,博士,讲师,硕士生导师,研究方向为生物质能与环境工程、生物燃油,通讯联系人,wangcmz@163.com。

备,酸性与  $H_3PO_4$  相似,比普通的离子液体更加绿色。由于氨基酸离子液体可生物降解且制备方法较为简单<sup>[12]</sup>,被作为绿色和可持续的催化剂<sup>[13]</sup>。

笔者以 *L*-天冬氨酸与硫酸为原料制备了新型氨基酸离子液体 [Asp]HSO<sub>4</sub> 催化剂,对月桂酸以及硬脂酸制备生物柴油实验的工艺条件进行初探,并对其催化效果进行了评价。考察了反应时间、反应温度、甲醇与原料物质的量的比 [*n*(甲醇):*n*(原料)]以及 [Asp]HSO<sub>4</sub> 质量分数对月桂酸制备生物柴油的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料与设备

#### 1.1.1 材料与试剂

*L*-天冬氨酸、浓硫酸、月桂酸、硬脂酸、甲醇、氢氧化钾、酚酞、乙醇、乙酸乙酯等,均是市售的分析纯或化学纯试剂。

#### 1.1.2 仪器与设备

集热式恒温加热磁力搅拌器 (DF-101S)、电子分析天平 (FA2014N)、电热鼓风恒温干燥箱 (101 型)、电炉、旋转蒸发仪 (RE-52 型)、升降恒温水浴锅 (R501 型)。

合成离子液体以及催化制备脂肪酸甲酯的实验装置为实验室自组装,主要由集热式恒温加热磁力搅拌器和冷凝管组装而成。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 离子液体 ([Asp]HSO<sub>4</sub>) 的制备

离子液体的制备参照文献 [19] 并进行改进,具体步骤如下:称取一定量的 *L*-天冬氨酸置于圆底烧瓶中,加入 50 mL 去离子水,在磁力搅拌器的匀速搅拌下加入物质的量为 *L*-天冬氨酸的 1.5 倍的硫酸,在 80℃ 磁力搅拌下反应 12 h。反应结束后产物用乙酸乙酯反复洗涤,洗涤后产物进行旋转蒸发,真空干燥至恒重的淡黄色液体即为实验所用的离子液体 ([Asp]HSO<sub>4</sub>)。

#### 1.2.2 离子液体催化酯化实验

分别将原料月桂酸、硬脂酸和甲醇按照一定物质的量的比加入圆底烧瓶,并加入一定质量的 [Asp]HSO<sub>4</sub>,在恒温水浴锅上安装回流冷凝装置,在达到设定温度的磁力搅拌器中进行酯化反应并开始计时。反应结束,取出反应物置于分液漏斗中,静置至分层进行分液,下层为催化剂相,上层为脂肪酸甲酯相。下层相减压蒸馏并干燥后进行重复使用,上层经常压蒸馏除去多余甲醇后,按照国标 GB/T

5530—2005 中所述的方法进行酸值测定。

酯化反应的转化率的计算式为:

$$Y(\%) = [(A_0 - A_1)/A_0] \times 100\%$$

式中: *Y* 为转化率,%; *A*<sub>0</sub> 为原料初始酸值 (KOH), mg/g; *A*<sub>1</sub> 为反应后产物酸值 (KOH), mg/g。

#### 1.2.3 因素影响试验设计

##### (1) 催化剂质量分数对酯化反应的影响

在 *n*(甲醇):*n*(月桂酸)=3:1、*n*(甲醇):*n*(硬脂酸)=5:1、月桂酸设定温度为 (65±2)℃、硬脂酸设定温度为 (55±2)℃、月桂酸试验设定时间为 33 h、硬脂酸试验设定时间为 15 h 的反应条件下,通过设置 [Asp]HSO<sub>4</sub> 质量分数梯度进行反应。

##### (2) 醇酸物质的量的比对酯化反应的影响

在设定温度 [月桂酸为 (65±2)℃、硬脂酸为 (55±2)℃]、[Asp]HSO<sub>4</sub> 质量为原料质量设定值 (月桂酸试验中为 5%,硬脂酸试验中为 10%)、时间为设定值 (月桂酸试验中为 33 h,硬脂酸试验中为 15 h) 的反应条件下,通过设置醇酸物质的量比梯度进行反应。

##### (3) 反应温度对酯化反应的影响

在 *n*(甲醇):*n*(月桂酸)=3:1、*n*(甲醇):*n*(硬脂酸)=5:1、[Asp]HSO<sub>4</sub> 质量为原料质量的设定值 (月桂酸试验中为 5%,硬脂酸试验中为 10%)、时间设定值 (月桂酸试验中为 33 h,硬脂酸试验中为 15 h) 的反应条件下,通过设置温度梯度进行反应。

##### (4) 反应时间对酯化反应的影响

在 *n*(甲醇):*n*(月桂酸)=3:1、*n*(甲醇):*n*(硬脂酸)=5:1,设定温度 [月桂酸为 (65±2)℃,硬脂酸为 (55±2)℃]、催化剂 ([Asp]HSO<sub>4</sub>) 质量为原料质量设定值 (月桂酸试验为 5%,硬脂酸试验为 10%),通过设置时间梯度进行反应。

#### 1.2.4 离子液体重复使用性能

在 [Asp]HSO<sub>4</sub> 对月桂酸、硬脂酸的最优催化条件下进行试验,将试验中用的离子液体进行分液和洗涤后继续进行重复试验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 催化剂质量分数对酯化反应的影响

[Asp]HSO<sub>4</sub> 质量分数对转化率的影响如图 1 所示。

由图 1(a) 中可以看出,在催化剂质量分数为 1% 时转化率已经达到了 73.49%。在催化剂质量分数为 5% 时,催化剂的活性中心数目变多,转化率已经达到了 91.05%。说明该催化剂可以有效提高酯

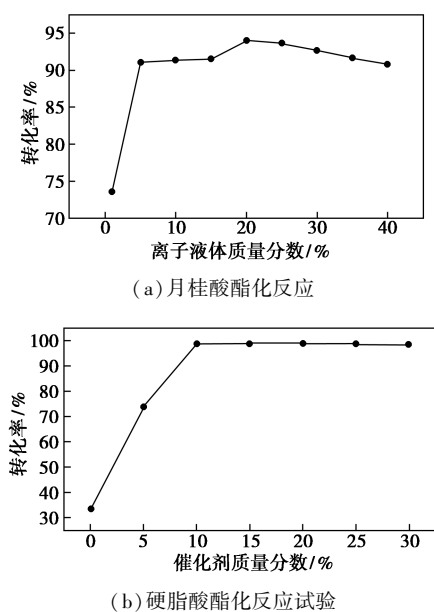


图1 催化剂质量分数对原料甲酯转化率的影响

化反应的效率,并且只需要少量的催化剂就可以达到较高的转化率。继续增加催化剂的质量分数,转化率并没有太大的提升,反而会导致转化率有较小程度的下降,说明该催化剂具有良好的催化性能。但考虑到能耗问题,可以将最优的催化剂质量分数设定在5%。

由图1(b)中可以看出,在不使用催化剂的情况下转化率仅达到33.50%,使用质量分数为5% [Asp]HSO<sub>4</sub> 作催化剂时转化率达到73.96%,说明[Asp]HSO<sub>4</sub> 可以有效地促进酯化反应向正方向进行,增加转化率。增加离子液体的质量分数,转化率增加,质量分数为20%时达到最高转化率98.84%;继续增加催化剂的质量分数,转化率保持稳定。原因是在原料量一定时,离子液体的质量分数继续增加对于转化率并无太大影响<sup>[14]</sup>。因此将最优质量分数定为10%。

通过对比发现,少量[Asp]HSO<sub>4</sub> 对月桂酸的催化效果优于硬脂酸。在[Asp]HSO<sub>4</sub> 质量为原料质量的5%时,月桂酸试验中的转化率已经高于90%,远远高于硬脂酸试验中的转化率73.96%。但随着[Asp]HSO<sub>4</sub> 质量分数的增加硬脂酸试验中的转化率逐渐高于月桂酸试验,在[Asp]HSO<sub>4</sub> 的质量为原料质量的10%时,硬脂酸试验中的转化率就已经达到了98.59%,而月桂酸试验中转化率仅有91.34%。继续增加[Asp]HSO<sub>4</sub> 的质量分数,2个原料的酯化反应中转化率都只有少量的变化,说明离子液体的质量继续增加对于转化率并无太大影响。

## 2.2 醇酸物质的量比对酯化反应的影响

甲醇和原料物质的量比对甲酯转化率的影响如图2所示。

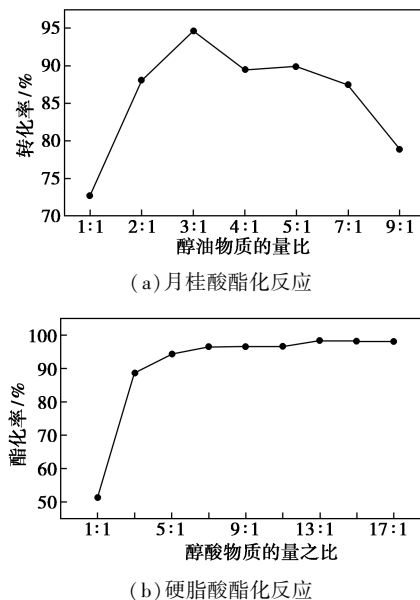


图2 醇酸物质的量比对原料甲酯的影响

由图2(a)中可以看出,转化率与甲醇与月桂酸物质的量的比成正比。当 $n(\text{甲醇}):n(\text{月桂酸})=1:1$ 时,转化率为72.68%; $n(\text{甲醇}):n(\text{月桂酸})=3:1$ 时,转化率达到最高,为98.34%。继续增加甲醇的量,月桂酸甲酯的转化率反而呈现下降的趋势,究其原因是随着甲醇量的增多,反应体系中的月桂酸的量相对较小,反应物与催化剂间的接触变少,抑制了反应向正方向进行,并且甲醇的量过多会导致浪费和后期分离难度增大,因此可将 $n(\text{甲醇}):n(\text{月桂酸})$ 定为3:1。

从图2(b)中可以看出,在 $n(\text{甲醇}):n(\text{硬脂酸})=1:1$ 时,硬脂酸甲酯呈现较低的转化率;继续升高到3:1时,硬脂酸甲酯的转化率急速上升,达到了88.66%;在 $n(\text{甲醇}):n(\text{硬脂酸})=5:1$ 时转化率达到94.27%,呈现较高的转化率;继续增加甲醇的量,转化率并没有较大的增幅,因此考虑到能耗与实际效率,可以将 $n(\text{甲醇}):n(\text{硬脂酸})=5:1$ 设为最优条件。

通过对比发现,[Asp]HSO<sub>4</sub> 在月桂酸酯化试验中具有较为良好的催化性能,在醇酸物质的量比为1:1时,月桂酸试验中的转化率要明显高于硬脂酸试验。继续增加到3:1时发现,月桂酸试验中的转化率依然高于硬脂酸试验;继续增加到5:1时,硬脂酸试验中的转化率开始高于月桂酸试验。说明在[Asp]HSO<sub>4</sub> 的催化下,月桂酸可以节省更多的甲

醇,在减少甲醇用量的情况下月桂酸甲酯相比于硬脂酸甲酯更加具有良好的经济性。

### 2.3 反应温度对酯化反应的影响

反应温度对原料甲酯转化率的影响如图 3 所示。

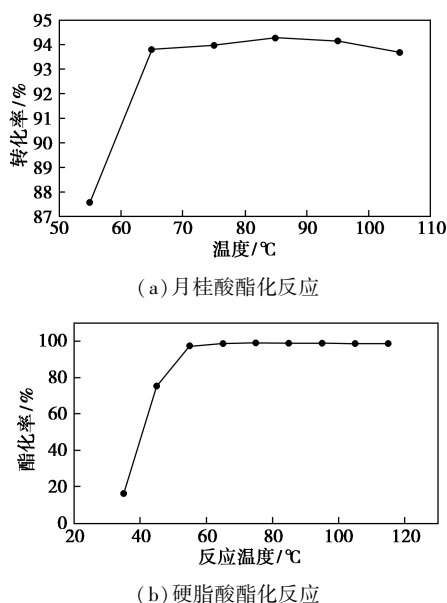


图 3 反应温度对原料甲酯转化率的影响

从图 3(a)中可以看出,在反应温度为 55℃ 时转化率为 87.57%,随着反应温度的升高,转化率呈上升的趋势;反应温度为 65℃ 时,月桂酸甲酯的转化率达到 93.80%,说明该类离子液体具有优秀的低温催化性能。但继续增高反应温度,转化率仅有 2% 以内的增长,原因是温度过高导致底物中的甲醇挥发,从而降低了甲醇的浓度,不利于酯化反应的进行<sup>[14]</sup>。因此考虑到工艺因素,将最优反应温度定在 65℃。

从图 3(b)中可以看出,随着反应温度的升高,转化率提高。在 35℃ 时,硬脂酸甲酯的转化率仅有 16.24%;温度为 45℃ 时,硬脂酸甲酯的转化率已经达到了 75.28%;在反应温度为 55℃ 时,转化率达到 97.23%,说明 [Asp]HSO<sub>4</sub> 对硬脂酸可以在较低的温度下实现较高的转化率。考虑到工艺因素,可以将反应温度定到 55℃。

杨子飞等<sup>[15]</sup>用离子液体 [HSO<sub>3</sub>pmim]<sup>+</sup>[HSO<sub>4</sub>]<sup>-</sup> 催化麻疯树油制备生物柴油时得出,该离子液体在 70℃ 时达到了最优的催化率。张扬等<sup>[16]</sup>在使用双核磺酸功能化离子液体 Bi-[C<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>Hmhm]HSO<sub>4</sub> 催化大豆油制备生物柴油时,得出的最优温度条件是 60℃。刘承先<sup>[14]</sup>在用 Lewis 酸性离子液体 [Et<sub>3</sub>NH]<sup>+</sup>Cl<sup>-</sup>2FeCl<sub>3</sub> 催化文冠果种仁

油制备生物柴油时,其最优的反应温度为 70℃。综上所述,[Asp]HSO<sub>4</sub> 对月桂酸和硬脂酸可以在 55℃ 时实现较高的催化效果,说明该离子液体具有良好的低温性能,如果应用于实际生产中可以较好地降低能耗成本。继续增加反应温度,转化率都没有较为快速的降低,说明添加 [Asp]HSO<sub>4</sub> 作催化剂时没有出现在常压下甲醇蒸发导致的转化率大幅增加的问题。

### 2.4 反应时间对酯化反应的影响

反应时间对原料转化率的影响如图 4 所示。

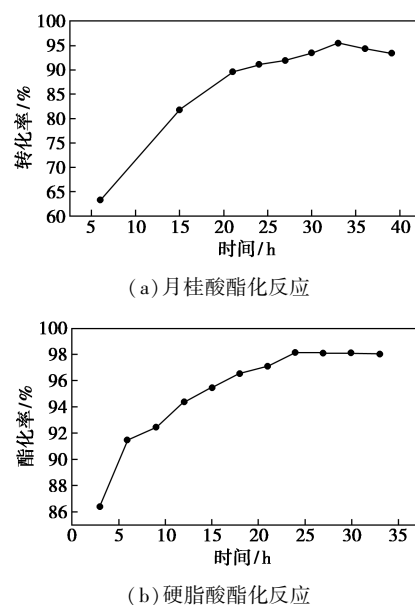


图 4 反应时间对原料甲酯转化率的影响

从图 4(a)中可以看出,随着反应时间的增长,转化率会增大。在反应时间为 6 h 时,转化率仅有 63.28%;在反应时间为 24 h 时,转化率达到 91.10%;继续增加反应时间虽然转化率有所增大,但是幅度不大。在时间达到 33 h 后继续增加反应时间反而会导致转化率的降低。原因是因为酯化反应是一个可逆过程,随着时间的增长反应向负方向进行,导致月桂酸甲酯转化率降低。考虑到能耗问题,在 24 h 时转化率已经超过了 90%,继续增加反应时间会导致成本的提高和资源的浪费。

从图 4(b)中可以看出,硬脂酸酯化试验与月桂酸酯化试验呈现相似的趋势,但是在反应时间为 6 h 时,转化率就已经达到了 91.46%;反应时间为 15 h 时,转化率达到 95.48%,与反应时间为 24 h 时的最高转化率(98.13%)相差不大;在 24 h 之后继续增加时间,转化率会下降。考虑到能耗以及效率的情况下,可以将最优的反应时间设为 15 h。

通过 [Asp]HSO<sub>4</sub> 对月桂酸和硬脂酸的催化的

反应时间对转化率来看, [Asp]HSO<sub>4</sub> 对硬脂酸的催化比对月桂酸的催化进行得更加快速, 并且最大的转化率也要高于月桂酸, 如果同样反应 24 h, 硬脂酸的产率将比月桂酸高出 7%。因为相对于其他因素来说, 反应时间对转化率的影响较小, 说明在本实验中硬脂酸的反应条件要更适合硬脂酸甲酯的转化<sup>[17]</sup>。

### 2.5 离子液体重复使用性能

在单因素实验得出的最优条件下进行离子液体重复使用性能测试, 结果如表 1 所示。由表 1 中可以看出, [Asp]HSO<sub>4</sub> 在重复 4 次后转化率开始下降, 这是因为在多次实验后与催化剂活性位点结合的一些化合物无法完全取出, 导致了催化活性的下降<sup>[18]</sup>。前 4 次仍保持比较优良的催化效果, 说明 [Asp]HSO<sub>4</sub> 具有较好的稳定性和重复使用性能。

表 1 离子液体重复使用后转化率变化 %

重复次数	1	2	3	4	5
硬脂酸实验	93.17	92.57	92.34	91.89	87.41
月桂酸实验	91.15	90.77	90.68	90.52	81.79

所用 [Asp]HSO<sub>4</sub> 催化月桂酸的效率与孙培培等<sup>[20]</sup>以浓硫酸作为催化剂催化月桂酸酯化的效率接近, 但反应温度明显更低、催化剂用量稍多。所用的氨基酸离子液体 [Asp]HSO<sub>4</sub> 催化硬脂酸的效率与王昌梅等<sup>[21]</sup>以离子液体催化剂 [Hnhp]HSO<sub>4</sub> 催化的效果相当, 温度略低, 醇酸物质的量比大大降低, 但催化剂用量更多以及反应时间更长。所用的氨基酸离子液体具有合成原料可再生、绿色环保、合成工艺简单和合成过程中不会污染环境等特性。

### 3 结论

(1) 以 *L*-天冬氨酸和硫酸为原料合成的新型氨基酸离子液体 [Asp]HSO<sub>4</sub> 对月桂酸和硬脂酸具有很好的催化性能。

(2) 离子液体 [Asp]HSO<sub>4</sub> 催化月桂酸酯化的最适条件为: 反应时间为 24 h、反应温度为 65℃、*n*(甲醇):*n*(月桂酸) 为 3:1 以及 [Asp]HSO<sub>4</sub> 质量分数为 10%。

(3) 离子液体 [Asp]HSO<sub>4</sub> 催化硬脂酸酯化的最适条件为: 反应时间为 15 h、反应温度为 55℃、*n*(甲醇):*n*(硬脂酸) 为 5:1 以及 [Asp]HSO<sub>4</sub> 质量分数为 10%。

(4) 该催化剂催化效率与 HSO<sub>4</sub> 的催化效果接

近, 反应温度更低。且具有很好的重复使用性能, 重复使用 4 次, 催化效率仍然可达到 90% 以上。

### 参考文献

- [1] 王九, 吴江, 方建华. 生物柴油生产及应用技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2013: 1-2.
- [2] 裴永浩, 于万舒, 吴桐, 等. 我国生物燃料的现状与展望[J]. 现代化工, 2016, 36(7): 1-4.
- [3] 梁斌. 生物柴油的生产技术[J]. 化工进展, 2005, (6): 577-585.
- [4] 王常文, 崔方方, 宋宇. 生物柴油的研究现状及发展前景[J]. 中国油脂, 2014, 39(5): 44-48.
- [5] 张雁玲, 孟凡飞, 王家兴, 等. 国内外生物柴油发展现状[J]. 现代化工, 2019, 39(10): 9-14.
- [6] 李汝雄, 王建基. 离子液体的合成与应用[J]. 化学试剂, 2001, (4): 211-215.
- [7] 张英锋, 李长江, 包富山, 等. 离子液体的分类、合成与应用[J]. 化学教育, 2005, (2): 7-12.
- [8] Mohammad Fauzi A H, Amin N A S, Mat R. Esterification of oleic acid to biodiesel using magnetic ionic liquid: Multi-objective optimization and kinetic study[J]. Applied Energy, 2014, 114: 809-818.
- [9] 刘超, 胡智霞. 氨基酸离子液体在油酸甲酯合成中的应用研究[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(11): 50-53.
- [10] Natalia Abramenko, Leonid Kustov, Larysa Metelytsia, et al. A review of recent advances towards the development of QSAR models for toxicity assessment of ionic liquids[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 384: 1-38.
- [11] Tao Guohong, He Ling, Sun Ning, et al. New generation ionic liquids: cations derived from amino acids[J]. ChemInform, 2005, 36(50): 176.
- [12] Hou Xuedan, Liu Qiuping, Smith Thomas J, et al. Evaluation of toxicity and biodegradability of cholinium amino acids ionic liquids[J]. PloS one, 2013, 8(3): 1-7.
- [13] Kirchhecker S, Esposito D. Amino acid based ionic liquids: A green and sustainable perspective[J]. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2016, 2: 28-33.
- [14] 刘承先. Lewis 酸性离子液体催化文冠果种仁油制备生物柴油[J]. 化工新型材料, 2015, 43(2): 37-39, 42.
- [15] 杨子飞, 曹阳, 李进. Bronsted 酸性离子液体催化麻疯树油制备生物柴油[J]. 精细石油化工, 2019, 36(2): 14-18.
- [16] 张扬, 王璐璐. Bronsted 双核磺酸功能化离子液体催化制备生物柴油[J]. 中国油脂, 2016, 41(4): 73-77.
- [17] 李欢. Bronsted 酸性离子液体催化芥兰籽油、地沟油酯交换制备生物柴油的机制研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2019.
- [18] 杨建军, 马晓迅, 关卫省. 离子液体在生物柴油合成中的应用研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(8): 1801-1806.
- [19] 韩本勇. 吡咯烷酮与氨基酸离子液体的合成及其催化制备生物柴油的研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2018.
- [20] 孙培培, 周晓庆, 张无敌, 等. 月桂酸制备月桂酸甲酯的实验研究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2011, 31(6): 37-40.
- [21] 王昌梅, 孙雁明, 韩本勇, 等. 离子液体 [Hnhp]HSO<sub>4</sub> 催化硬脂酸酯化的工艺优化[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2017, 37(3): 5-9. ■