

响应面法优化碱催化亮斑扁角水虻幼虫虫脂 制备生物柴油工艺

彭乔烽^{1,2}, 张 栋¹, 马小梅^{2,3}, 刘高强^{1,2}, 丁功涛¹, 周雪雁¹, 皮尔·穆罕默德·阿卜杜勒⁴

(1. 西北民族大学 中国-马来西亚国家联合实验室, 兰州 730030; 2. 西北民族大学 生命科学与工程学院, 兰州 730030; 3. 西北民族大学 生物医学研究中心, 兰州 730030; 4. 马来西亚国立大学 工程与建筑环境学院, 马来西亚 雪兰莪州 万宜 43600)

摘要:为实现亮斑扁角水虻幼虫(Black soldier fly larvae, BSFL)虫脂能源化利用,采用石油醚提取BSFL虫脂,通过碱催化BSFL虫脂甲酯化制备生物柴油。在单因素试验的基础上,利用响应面法优化BSFL虫脂合成生物柴油的工艺条件;使用气质联用仪分析生物柴油的脂肪酸组成,并评价生物柴油性能。结果表明:BSFL虫脂合成生物柴油的最优工艺条件为醇油体积比7.2:1、反应时间2.0 h、KOH添加量为反应体系总质量的1.0%,在此条件下生物柴油产率达93.7%;生物柴油主要脂肪酸组分及含量为C12:0 12.8%、C14:0 3.8%、C16:0 16.2%、C16:1 1.9%、C18:0 4.4%、C18:1 24.2%、C18:2 26.8%、C18:3 4.1%;生物柴油运动黏度(40℃)3.842 5 mm²/s、运动黏度(25℃)5.311 mm²/s、动力黏度(25℃)4.640 mPa·s、密度(25℃)874 kg/m³、密度(15℃)879 kg/m³、酸值(KOH)0.12 mg/g、硫含量26 mg/kg、开口闪点160℃、闭口闪点142℃、残炭小于0.10%。碱催化BSFL虫脂甲酯化制备生物柴油的C14~C18含量较高,性能较好。

关键词:亮斑扁角水虻幼虫;虫脂;生物柴油;甲酯化;响应面法优化

中图分类号:S216.1;TE667 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)04-0069-06

Optimization of alkali-catalyzed synthesis of biodiesel from insecticidal fat of black soldier fly larvae by response surface methodology

PENG Qiaofeng^{1,2}, ZHANG Dong¹, MA Xiaomei^{2,3}, LIU Gaoqiang^{1,2},
DING Gongtao¹, ZHOU Xueyan¹, PEER Mohamed Abdul⁴

(1. China-Malaysia National Joint Laboratory, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, China; 2. College of Life Sciences and Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, China; 3. Biomedical Research Center, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, China; 4. Faculty of Engineering and Built Environment, The National University of Malaysia, Bangi 43600, Selangor, Malaysia)

Abstract: In order to realize the energy utilization of insecticidal fat of black soldier fly larvae (BSFL), biodiesel was synthesized by alkali-catalyzed methyl esterification of insecticidal fat of BSFL extracted with petroleum ether, and on the basis of single factor experiment, the process conditions for the synthesis of biodiesel were optimized by response surface methodology. GC-MS was used to analyze

the fatty acid composition of biodiesel. The performance of biodiesel was also evaluated. The results showed that the optimal conditions for the synthesis of biodiesel from insecticidal fat of BSFL were obtained as follows: volume ratio of alcohol to oil 7.2:1, reaction time 2.0 h, dosage of KOH 1.0% of the total mass of the reaction system. Under these conditions, biodiesel yield reached

收稿日期:2022-02-28;修回日期:2023-01-03

基金项目:中央高校基本科研业务费项目“屠宰血液废弃物能源化与材料化利用研究”(31920220023);甘肃省科技厅“科技助力经济2020”重点专项(SQ2020YFF0405583)

作者简介:彭乔烽(1998),男,硕士研究生,研究方向为环境生物技术(E-mail)154182336@qq.com。

通信作者:丁功涛,副教授,硕士生导师,博士(E-mail)dinggongtao@outlook.com。

93.7%。The main fatty acid composition and content of biodiesel were C12:0 12.8%, C14:0 3.8%, C16:0 16.2%, C16:1 1.9%, C18:0 4.4%, C18:1 24.2%, C18:2 26.8%, C18:3 4.1%。The performance of biodiesel were kinematic viscosity (40 °C) 3.842 5 mm²/s, kinematic viscosity (25 °C) 5.311 mm²/s, dynamic viscosity (25 °C) 4.640 mPa · s, density (25 °C) 874 kg/m³, density (15 °C) 879 kg/m³, acid value 0.12 mgKOH/g, sulfur content 26 mg/kg, open flash point 160 °C, closed flash point 142 °C, residual carbon less than 0.10%。The biodiesel synthesized from insecticidal fat of BSFL has a high content of C14 – C18 and good performance。

Key words: black soldier fly larvae; insecticidal fat; biodiesel; methyl esterification; response surface optimization

亮斑扁角水虻 (*Hermetia illucens*) 俗称黑水虻, 属于水虻科 (Stratiomyidae) 扁角水虻属 (*Hermetia latreille*), 在全球亚热带及热带地区均有分布^[1]。亮斑扁角水虻具有食谱广、食量大、营养需求低、吸收转化率高、虫体资源含量高、抗逆性强、安全性高等特点^[2]。亮斑扁角水虻一代只需约 35 d, 10 日龄时其幼虫 (Black soldier fly larvae, BSFL) 发育基本完全, 短期内可获得大量幼虫^[3]。亮斑扁角水虻可在畜禽粪便和厨余垃圾中进行繁殖^[4], 15 t 厨余垃圾可生产约 1 t 干幼虫^[5], BSFL 干物质中粗脂肪含量较高, 为 31% ~ 35%^[6]。因此, BSFL 具有生长周期短、容易获得、油脂含量高等特点, 将其用于生产虫脂及其下游产物生物柴油具有一定的研究前景。

生物柴油燃烧性能优越, 与石油衍生碳氢化合物的热值相当, 与现有柴油发动机完全兼容但比现有柴油更清洁^[7-9], 因此其具有替代石油衍生燃料的潜力。根据可用性、产量、生产成本和油稳定性, 生产生物柴油的常见油料包括大豆、油菜籽、棕榈、麻疯树籽、辣木籽等^[10]。将食用油作为原料生产生物柴油成本高昂, 生产成本相较于石油基柴油会高出 1.5 倍左右, 从而降低了竞争力^[11]。另外, 为生产生物柴油而持续消费食用油, 可能会对食品供应的市场需求产生负面影响。低成本的非食用原料微藻等制备生物柴油的新方法处于实验室规模的研究阶段^[12-14]。目前, 市场上用于制备生物柴油的动物油脂有猪油、牛油和鸡油等^[15-17], 而成本更低、获取途径更容易的虫脂用作生物柴油原料的研究却鲜有报道。

本试验采用石油醚提取 BSFL 虫脂, 采用碱催化 BSFL 虫脂甲酯化制备生物柴油, 在单因素试验的基础上, 采用响应面法对工艺条件进行了优化, 使用气相色谱-质谱法 (GC-MS) 对制备的生物柴油脂肪酸组成进行分析, 并对生物柴油的燃烧性能进

行了表征, 以期验证 BSFL 虫脂制备生物柴油的可行性, 并为生物柴油的制备提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

BSFL, 10 日龄左右, 2021 年 7 月采集自甘肃国瑞生物环保有限公司, 幼虫食物主要为兰州市餐厅厨余垃圾脱水脱油后渣料。将采集的活体 BSFL 于 60 ~ 70 °C 烘干后挑除成蛹虫, 保存于实验室。石油醚、甲醇、KOH, 分析纯, 兰州双双化学试剂有限公司; 37 种脂肪酸甲酯混标, 上海齐源生物科技有限公司。

7000D - 三重四级杆 - GC/MS 气质联用仪器, 美国安捷伦公司; DFT - 50A 粉碎机, 无锡久平仪器; GNP - 9270 恒温培养箱, 上海精宏试验设备。

1.2 试验方法

1.2.1 BSFL 虫脂提取

将适量干燥的 BSFL 分批放入粉碎机中粉碎 10 min 后收集, 按固液比 1:8 加入石油醚搅拌混合后密闭置于摇床中, 在 50 °C、180 r/min 下振荡萃取 3.0 h 后, 以 5 000 r/min 离心 10 min, 取上清, 蒸馏去除石油醚后得到粗虫脂, 抽滤除去固体杂质后得到 BSFL 虫脂, 常温备用。

1.2.2 生物柴油的制备

将一定量的 BSFL 虫脂预热至 60 °C^[18-20], 甲醇预热至 50 °C 后, 与一定量 KOH 混合于 250 mL 摇瓶中, 置于恒温摇床内, 在 60 °C、220 r/min 密闭条件下反应一定时间后, 将混合物转移到分液漏斗中冷却至室温, 加入过量纯水至出现油水分离, 静置 3.0 h 后回收上层液相, 放入烘箱内 110 °C 干燥至恒重, 得生物柴油产品。计算生物柴油产率 (为生物柴油产品质量与 BSFL 虫脂质量的比值)。

1.2.3 生物柴油脂肪酸组成与性能分析

1.2.3.1 脂肪酸组成分析

根据 GB 5009.168—2016 处理生物柴油, 用 0.22 μm 有机系滤膜过滤后进行 GC-MS 分析。

GC 条件:DB-wax 色谱柱(30 m × 250 μm × 0.25 μm);进样口温度 240 °C;流速 2 mL/min;柱升温程序为 140 °C 保持 5 min,以 4 °C/min 上升到 180 °C 保持 1 min,以 2 °C/min 上升到 200 °C 保持 2 min,以 2 °C/min 上升到 220 °C 保持 2 min,以 5 °C/min 上升到 230 °C 保持 5 min;进样量 1 μL;分流比 20:1。

MS 条件:EI 源,电离电压 70 eV,离子源温度 220 °C,质量扫描范围 40 ~ 292。

1.2.3.2 性能分析

运动黏度、动力黏度参照 NB/SH/T 0870—2013,密度参照 GB/T 1884—2000,酸值参照 GB/T 264—1983,硫含量参照 SH/T 0303—1992,开口闪

点、闭口闪点参照 GB/T 267—1988,残炭参照 GB/T 268—1987,均由青岛市资源化学与新材料研究中心先进润滑材料公共研发平台进行检测。

2 结果与讨论

2.1 生物柴油制备单因素试验

在 KOH 添加量 3.0% (以反应体系总质量计)、反应时间 3.0 h 条件下,探究醇油体积比对生物柴油产率的影响;在 KOH 添加量 3.0%、醇油体积比 8:1 条件下,探究反应时间对生物柴油产率的影响;在反应时间 2.0 h、醇油体积比 8:1 条件下,探究 KOH 添加量对生物柴油产率的影响。结果见图 1。

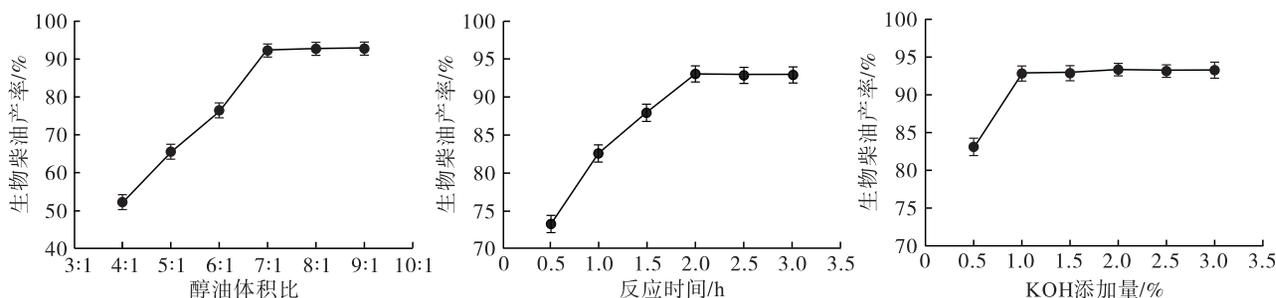


图1 生物柴油制备单因素试验结果

由图1可知:在醇油体积比 4:1 ~ 7:1 范围内生物柴油产率随着甲醇浓度升高而升高,醇油体积比大于 7:1 后生物柴油产率无明显增长;在反应时间 0.5 ~ 2.0 h 范围内生物柴油产率随着反应时间延长而升高,反应 2.0 h 后生物柴油产率无明显增长;在 KOH 添加量 0.5% ~ 1.0% 范围内生物柴油产率随着 KOH 添加量增加而升高,KOH 添加量超过 1.0% 后生物柴油产率无明显增长。

2.2 生物柴油制备响应面试验

在单因素试验基础上,采用三因素五水平中心组合试验设计响应面试验,以醇油体积比(A)、KOH 添加量(B)、反应时间(C)为自变量,生物柴油产率(Y)为响应值,优化碱催化 BSFL 虫脂制备生物柴油的工艺条件。响应面试验因素与水平见表1,响应面试验设计及结果见表2。

表1 响应面试验因素与水平

水平	醇油体积比	KOH 添加量/%	反应时间/h
-1.682	1.95:1	0.16	1.16
-1	4:1	0.5	1.5
0	7:1	1.0	2.0
1	10:1	1.5	2.5
1.682	12.05:1	1.84	2.84

表2 响应面试验设计及结果

试验号	A	B	C	Y/%
1	-1	-1	-1	43.80
2	1	-1	-1	72.40
3	-1	1	-1	55.60
4	1	1	-1	90.30
5	-1	-1	1	49.90
6	1	-1	1	85.50
7	-1	1	1	57.30
8	1	1	1	94.10
9	-1.682	0	0	14.70
10	1.682	0	0	94.60
11	0	-1.682	0	52.20
12	0	1.682	0	93.70
13	0	0	-1.682	82.30
14	0	0	1.682	94.00
15	0	0	0	93.20
16	0	0	0	92.60
17	0	0	0	93.80

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对表2中的数据点进行多元回归分析,得到回归模型: $Y = 93.20 + 23.75A + 12.34B + 3.25C + 0.91AB + 1.14AC - 1.71BC - 13.63A^2 - 7.16B^2 - 1.79C^2 - 0.61ABC - 6.63A^2B - 6.79AB^2 - 2.01A^2B^2$ 。回归模型方差分析见表3。

表3 回归模型方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	9 293.06	13	714.85	1 748.62	<0.000 1 **
A	3 192.00	1	3 192.00	7 808.08	<0.000 1 **
B	861.13	1	861.13	2 106.43	<0.000 1 **
C	144.20	1	144.20	352.73	0.000 3 **
AB	6.66	1	6.66	16.29	0.027 3 *
AC	10.35	1	10.35	25.32	0.015 1 *
BC	23.46	1	23.46	57.39	0.004 8 **
A ²	1 783.32	1	1 783.32	4 362.25	<0.000 1 **
B ²	492.08	1	492.08	1 203.68	<0.000 1 **
C ²	30.60	1	30.60	74.86	0.003 2 **
ABC	3.00	1	3.00	7.34	0.073 2
A ² B	145.46	1	145.46	355.82	0.000 3 **
AB ²	152.86	1	152.86	373.92	0.000 3 **
A ² B ²	12.92	1	12.92	31.60	0.011 1 *
保留值	1.23	3	0.41		
失拟项	0.51	1	0.51	1.41	0.357 4
净误差	0.72	2	0.36		
所有项	9 294.28	16			

注: **为 $p < 0.01$, 差异极显著; *为 $p < 0.05$, 差异显著

由表3可知,模型 p 小于0.01,极显著,表明模

型可靠。失拟项 p 为0.357 4,不显著。该模型的 R^2_{Adj} 为99.93%,变异系数为0.86,表明试验数据拟合性良好,其他因素对试验影响小,能够准确预测生物柴油产率。一次项中 A 、 B 、 C 对生物柴油产率的影响极显著,交互项中 BC 影响极显著, AB 和 AC 影响显著,二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 影响极显著,说明醇油体积比、KOH 添加量和反应时间对生物柴油产率有极显著的影响。

根据拟合的回归方程模型,通过 Design - Expert 8.0.6 软件预测最优工艺条件为醇油体积比 7.2:1、KOH 添加量 1.0%、反应时间 2.0 h,在此条件下生物柴油产率预测值为 94.6%。为了验证试验结果的可靠性,在上述条件下进行 3 组平行试验,生物产油产率平均值为 93.7%,与预测值基本一致,说明该模型能较好地反映生物柴油产率的实际情况。

2.3 生物柴油工艺对比

目前,BSFL 虫脂柴油化的工艺研究有 Jung 等^[21]使用孔材料(SiO_2)高温非催化酯交换,以及 Nguyen 等^[22]的酶催化酯交换。将本试验采用的工艺与已报道的 BSFL 虫脂制备生物柴油工艺进行对比,结果见表4。

表4 生物柴油工艺对比

工艺	载体	反应温度/°C	反应时间	催化剂	醇油比	产率/%
文献[21]	SiO_2	390	1 min	-	20:1(醇体积与油质量比)	94.10
文献[22]	-	26	9.48 h	脂肪酶	6.33:1(物质的量比)	96.18
本试验	-	60	2.0 h	KOH	7.2:1(体积比)	93.70

由表4可知,使用孔材料(SiO_2)高温非催化酯交换反应温度高,酶催化酯交换成本高且反应时间长,这些缺点限制了 BSFL 虫脂柴油化应用前景。本试验优化后的工艺成本低、反应时间短、反应温度低,更利于 BSFL 虫脂柴油化应用。

2.4 生物柴油的脂肪酸组成

生物柴油的 GC-MS 分析结果如图2所示,脂肪酸组成及含量如表5所示。

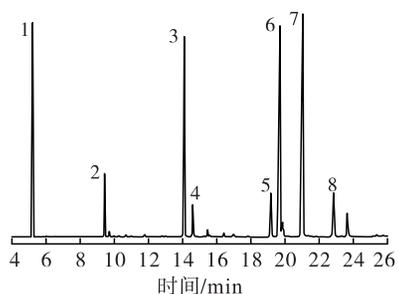


图2 生物柴油 GC-MS 分析结果

表5 生物柴油的脂肪酸组成及含量

峰号	脂肪酸	含量/%
1	C12:0	12.8
2	C14:0	3.8
3	C16:0	16.2
4	C16:1	1.9
5	C18:0	4.4
6	C18:1	24.2
7	C18:2	26.8
8	C18:3	4.1

由表5可知,由碱催化 BSFL 虫脂制备的生物柴油中脂肪酸组成及含量为 C12:0 12.8%、C14:0 3.8%、C16:0 16.2%、C16:1 1.9%、C18:0 4.4%、C18:1 24.2%、C18:2 26.8%、C18:3 4.1%,主要脂肪酸 C12:0、C16:0、C18:1 和 C18:2 总含量为 80.0%。

理想的生物柴油是由长链脂肪酸甲酯(C14 ~ C22)组成,拥有较长的碳直链、较少的双键数目、一定量的氧元素、较少的碳支链,且不含芳香烃结

构^[23]。由表 5 可知,本试验生物柴油 C14:0 ~ C18:3 7 种长链脂肪酸总含量达 81.4%,具有作为燃油的可能性。不饱和脂肪酸含量高的生物柴油,低温性能优异^[24],本试验制备的生物柴油不饱和脂肪酸含量较高(57.0%),同时图 2 中显示杂峰含量不高,表明制备的生物柴油可能低温性能较好,适合于柴油化应用。本试验生物柴油 C18:3 含量为 4.1%,

Jung 等^[21]制备的生物柴油未检出 C18:3,且 C18:1、C18:2 含量较本试验生物柴油的低,可能是由于亮斑扁角水虻生长条件,如饲料类型、生长期、温度、湿度、海拔等不同所致。

2.5 生物柴油的性能

测定本试验制备的生物柴油性能,并与欧盟标准和已有报道相比较,结果如表 6 所示。

表 6 生物柴油性能表征结果

项目	本试验	EN 14214 - 2014	文献[22]	文献[25]
运动黏度(25℃)/(mm ² /s)	5.311			
运动黏度(40℃)/(mm ² /s)	3.842 5	3.5 ~ 5.0	5.2	5.8
动力黏度(25℃)/(mPa·s)	4.640			
密度(25℃)/(kg/m ³)	874			
密度(15℃)/(kg/m ³)	879	860 ~ 900	872	885
酸值(KOH)/(mg/g)	0.12	<0.5	<0.8	1.1
硫含量/(mg/kg)	26	<10.0	未检出	未检出
开口闪点/℃	160			
闭口闪点/℃	142	>101	121	123
残炭/%	<0.10			

由表 6 可知,本试验制备的生物柴油各项性能指标分别为运动黏度(25℃) 5.311 mm²/s、运动黏度(40℃) 3.842 5 mm²/s、动力黏度(25℃) 4.640 mPa·s、密度(25℃) 874 kg/m³、密度(15℃) 879 kg/m³、酸值(KOH) 0.12 mg/g、硫含量 26 mg/kg、开口闪点 160℃、闭口闪点 142℃、残炭小于 0.10%。本试验制备的生物柴油除硫含量偏高外,运动黏度(40℃)、密度(15℃)、酸值、闭口闪点均符合欧盟标准 EN 14214 - 2014 要求。

生物柴油燃烧性能与运动黏度、密度、闪点等因素有关^[24]。由于配备电控燃油喷射系统(共轨)的现代柴油发动机对燃油质量要求较高,较低黏度更有利于柴油的燃烧^[26]。本试验制备的生物柴油密度(15℃)为 879 kg/m³,与 Nguyen^[22](872 kg/m³)、Li^[25]等(885 kg/m³)制备的生物柴油无明显差异,但本试验制备的生物柴油运动黏度(40℃)、酸值均低于 Nguyen^[22]、Li^[25]等制备的生物柴油。

开口闪点和闭口闪点是评估可燃性液体挥发性和热稳定性的重要指标,关乎燃油运输、储存、使用和安全等方面,闪点越高燃油馏分越高,更安全的同时能保护内燃机^[27-29]。本试验制备的生物柴油开口闪点较高,为 160℃,且闭口闪点高于 Nguyen^[22]、Li^[25]等制备的生物柴油。燃油中的硫燃烧后的直接产物为二氧化硫,硫含量越高,燃油污染越大^[30]。本试验虽检测出少量硫(26 mg/kg),但运动黏度、酸值和闭口闪点指标较好,这为 BSFL 虫脂产生

物柴油提供了技术参考,也为生物柴油进一步实现工业化奠定了一定研究基础。

3 结论

以 BSFL 虫脂为原料,在单因素试验基础上,采用响应面法优化碱催化 BSFL 虫脂甲酯化制备生物柴油工艺条件,采用 GC - MS 分析生物柴油脂肪酸组成,并考察生物柴油的性能指标。结果表明:碱催化 BSFL 虫脂制备生物柴油的最优工艺条件为醇油体积比 7.2:1、KOH 添加量 1.0%、反应时间 2.0 h,在此条件下生物柴油产率为 93.7%;生物柴油长链脂肪酸(C14:0 ~ C18:3)含量达 81.4%,各项性能指标为运动黏度(40℃) 3.842 5 mm²/s、运动黏度(25℃) 5.311 mm²/s、动力黏度(25℃) 4.640 mPa·s、密度(25℃) 874 kg/m³、密度(15℃) 879 kg/m³、酸值(KOH) 0.12 mg/g、硫含量 26 mg/kg、开口闪点 160℃、闭口闪点 142℃、残炭小于 0.10%。BSFL 虫脂制备的生物柴油性能较好,安全且耐储存、运输,可作为制备生物柴油的原料。

参考文献:

- [1] 刘兴,孙学亮,李连星,等.黑水虻替代鱼粉对锦鲤生长和健康状况的影响[J].大连海洋大学学报,2017,32(4):422-427.
- [2] 萧鸿发,王国霞,彭凯,等.黑水虻生物学特点及其应用研究进展[J].广东畜牧兽医科技,2020,45(2):27-33.
- [3] 马加康,郭浩然,王立新.新鲜鸭粪对黑水虻幼虫生长发育及粪便转化率的影响[J].安徽科技学院学报,

- 2016, 30(1):12 – 18.
- [4] 许新新, 王颖. 黑水虻资源化利用的研究进展[J]. 农业工程技术, 2020, 40(26):61, 63.
- [5] 窦永芳. 养殖密度、光照条件及餐厨垃圾类型对黑水虻 (*Hermetia illucens* L.) 生长和体成分的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2020.
- [6] 喻国辉, 陈燕红, 喻子牛, 等. 黑水虻幼虫和预蛹的饲料价值研究进展[J]. 昆虫知识, 2009, 46(1):41 – 45.
- [7] MOSAROF M H, KALAM M A, MASJUKI H H, et al. Optimization of performance, emission, friction and wear characteristics of palm and *Calophyllum inophyllum* biodiesel blends[J]. *Energ Convers Manage*, 2016, 118: 119 – 134.
- [8] KAKATI J, GOGOI T K. Biodiesel production from Kutkura (*Meyna spinosa* Roxb. Ex.) fruit seed oil: its characterization and engine performance evaluation with 10% and 20% blends[J]. *Energ Convers Manage*, 2016, 121:152 – 161.
- [9] RUSSO D, DASSISTI M, LAWLOR V, et al. State of the art of biofuels from pure plant oil[J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2012, 16(6):4056 – 4070.
- [10] RASUL M G, AZAD A K, SHARMA S C. Clean energy for sustainable development: comparisons and contrasts of new approaches[M]. New York: Academic Press, 2016.
- [11] MARDHIAH H H, ONG H C, MASJUKI H H, et al. A review on latest developments and future prospects of heterogeneous catalyst in biodiesel production from non – edible oils[J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2017, 67:1225 – 1236.
- [12] ALTUNOZ M, MONTEVECCHI G, MASINO F, et al. Biodiesel properties of *Neochloris oleoabundans* grown in sludge waste [J/OL]. *Clean Eng Technol*, 2021, 5: 100295 [2022 – 02 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100295>.
- [13] GUO H, CHENG J, MAO Y X, et al. Synergistic effect of ultrasound and switchable hydrophilicity solvent promotes microalgal cell disruption and lipid extraction for biodiesel production [J/OL]. *Bioresour Technol*, 2022, 343: 126087 [2022 – 02 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126087>.
- [14] 王蕾. 微藻去除水中营养物质和重金属及生物柴油转化研究[D]. 兰州:兰州大学, 2021.
- [15] 李剑, 蔡思怡, 邹华生. 响应面法优化超声波辅助猪油酯交换反应制备生物柴油的研究[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(4):24 – 29.
- [16] CÜRÜ M, KOCA A, CAN O, et al. Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine[J]. *Renew Energ*, 2010, 35(3):637 – 643.
- [17] WYATT V T, HESS M A, DUNN R O, et al. Fuel properties and nitrogen oxide emission levels of biodiesel produced from animal fats [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2005, 82:585 – 591.
- [18] MANDAL S, KUNDU K. Synthesis of biodiesel by KOH – catalyzed methanolysis of flaxseed oil and determination of fuel properties[J]. *Biofuels*, 2021, 12(8): 999 – 1005.
- [19] 彭忠瑾, 麻成金, 肖旺, 等. 茶叶籽油甲酯化制备生物柴油的反应动力学研究[J]. 农业工程, 2011, 1(3): 50 – 52, 93.
- [20] 苏有勇, 王华, 吴桢芬, 等. 棕榈油酯交换制备生物柴油的反应动力学[J]. 化学工程, 2010, 38(11):39 – 42.
- [21] JUNG S, JUNG J M, TSANG Y F. Biodiesel production from black soldier fly larvae derived from food waste by non – catalytic transesterification [J/OL]. *Energy*, 2022, 238: 121700 [2022 – 02 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121700>.
- [22] NGUYEN H C, LIANG S H, DOAN T T, et al. Lipase – catalyzed synthesis of biodiesel from black soldier fly (*Hermetica illucens*): optimization by using response surface methodology [J]. *Energ Convers Manage*, 2017, 145:335 – 342.
- [23] 卢丽娜, 孙利芹, 田焕玲, 等. 32 株海洋微藻总脂含量及其脂肪酸组成的研究[J]. 中国油脂, 2009, 34(11):68 – 73.
- [24] 黄凤洪, 黄庆德. 生物柴油制造技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2009:104 – 112.
- [25] LI Q, ZHENG L Y, CAI H, et al. From organic waste to biodiesel: black soldier fly, *Hermetia illucens*, makes it feasible[J]. *Fuel*, 2011, 90(4):1545 – 1548.
- [26] SANLI H, ALPTEKIN E, CANAKCI M. Using low viscosity micro – emulsification fuels composed of waste frying oil – diesel fuel – higher bio-alcohols in a turbocharged – CRDI diesel engine [J/OL]. *Fuel*, 2022, 308: 121966 [2022 – 02 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121966>.
- [27] 庞敏. 浅谈不同因素对开口闪点测定的影响[J]. 石化技术, 2020, 27(6):118, 147.
- [28] 张少杰, 郭新良, 杨雪滢, 等. 变压器油闪点测定值的一种基于 $1/T - \ln P$ 线性关系的压力修正方法研究[J]. 绝缘材料, 2022(3):100 – 106.
- [29] 陈芝态, 王彦霞, 欧阳政, 等. 石油产品闭口闪点测定影响因素分析[J]. 广东化工, 2021, 48(11):169, 171.
- [30] 张德义. 提高炼油企业硫回收率降低石油产品的硫含量[J]. 石油化工技术经济, 2000(2):6 – 9.