

## 大豆油与地沟油制备生物柴油全生命周期评价\*

严军华<sup>1,2,3,4</sup>, 王舒笑<sup>1,2,4</sup>, 袁浩然<sup>1,2,3,4†</sup>, 陈勇<sup>1,2,3,4</sup>, 单锐<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;  
3. 中国科学院大学, 北京 10049; 4. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640)

**摘要:** 对以大豆油和地沟油为原料制备的生物柴油进行全生命周期评价, 估算了生物柴油全生命周期各过程的能源消耗及周期排放。对以大豆油和地沟油为原料生产生物柴油的生命周期进行了对比, 结果表明: 以地沟油为原料生产生物柴油的全生命周期总能耗约为以大豆油为原料能耗的 1/8, 其周期排放也低于大豆油生产的生物柴油, CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、VOC、烟尘、PM10 和固体废弃物各项排放较大豆油为原料分别降低 14.2%、56.7%、4.9%、46.3%、96.5%、98.5%、18.8%、61.9%和 10.1%。制备生物柴油的 CO<sub>2</sub> 排放远远小于化石柴油的排放, 其中大豆油生物柴油降低 83.5%, 地沟油生物柴油降低 85.9%, 以地沟油为原料制备生物柴油比以大豆油为原料更具优势。

**关键词:** 大豆油; 地沟油; 生物柴油; 生命周期

**中图分类号:** TK6; X7

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.04.007

## Life Cycle Assessment of Biodiesel Produced from Soybean and Waste Cooking Oil

YAN Jun-hua<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Shu-xiao<sup>1,2,4</sup>, YUAN Hao-ran<sup>1,2,3,4</sup>,  
CHEN Yong<sup>1,2,3,4</sup>, SHAN Rui<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China;

4. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The life cycle assessment (LCA) was used to quantify the emissions and energy consumption for the soybean oil and waste cooking oil biodiesel process. Compared with the soybean biodiesel, the energy consumption of waste cooking oil biodiesel was about 1/8 of soybean biodiesel, while the emissions of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, VOC, smoke, PM10 and solid wastes for waste cooking oil biodiesel decreased by 14.2%, 56.7%, 4.9%, 46.3%, 96.5%, 98.5%, 8.8%, 61.9% and 10.1% respectively. Besides, compared with conventional diesel pathway, the CO<sub>2</sub> emissions of soybean and waste cooking oil biodiesel were decreased by 83.5% and 85.9%, respectively. Obviously, it is more advantageous to produce biodiesel from waste cooking oil than from soybean oil.

**Key words:** soybean oil; waste oil; biodiesel; life cycle assessment

## 0 前 言

随着化石燃料储备的日益减少, 人们越来越重视对可再生能源的开发和利用。生物柴油作为一种绿色、安全、可再生的新能源, 与普通柴油燃料特性相近, 被认为是石化化石燃料的适宜代品<sup>[1-3]</sup>。生物柴油的生产与使用可以减少污染物排放和温室气体排

放, 对国家建设资源节约型社会和发展循环经济有着重大的意义。

生物柴油是以动植物油脂餐饮业废弃油脂为原料, 与甲醇、乙醇等低碳醇进行酯交换反应后获得的长链脂肪酸单烷基酯。其原料来源广泛, 如大豆油、棉籽油、棕榈油以及动物油脂和餐饮废油等<sup>[4-5]</sup>。胡志远等<sup>[6]</sup>对不同原料制备的生物柴油进行了生

\* 收稿日期: 2017-05-04 修订日期: 2017-08-04

基金项目: 国家科技支撑项目 (2015BAL04B02); 中国科学院创新交叉团队项目; 广东省专业镇中小微企业服务平台建设项目 (2012B091400011)

† 通信作者: 袁浩然, E-mail: yuanhr@ms.giec.ac.cn

命周期的评价,评价结果表明生物柴油的生命周期能源消耗和排放较化石柴油有所减少。邢爱华等<sup>[7]</sup>对不同原料制备的生物柴油进行了生命周期经济性评价,结果表明生物柴油的经济性均优于石化柴油。此外,国内外众多学者对生物柴油生命周期进行了分析<sup>[8-10]</sup>,但针对生产原料进行对比分析的生命周期评价很少,尤其是对原料为可食用油与废弃油的比较。

本文对大豆油与地沟油制备生物柴油进行生命周期评价。大豆油是中国最普遍的可食用油,地沟

油作为一种餐饮废弃,两者都可以用来生产生物柴油。本文对可食用油与废弃油制生物柴油生命周期能源消耗和环境排放进行详细的对比与分析,为中国生物柴油发展提供决策依据。

## 1 生命周期评价方法

### 1.1 分析边界的定义

根据国际标准 ISO14040<sup>[11]</sup>的相关原则,对生物柴油的边界进行界定,大豆油与地沟油生产生物柴油的生命周期有不同的边界界定。如图 1 所示。

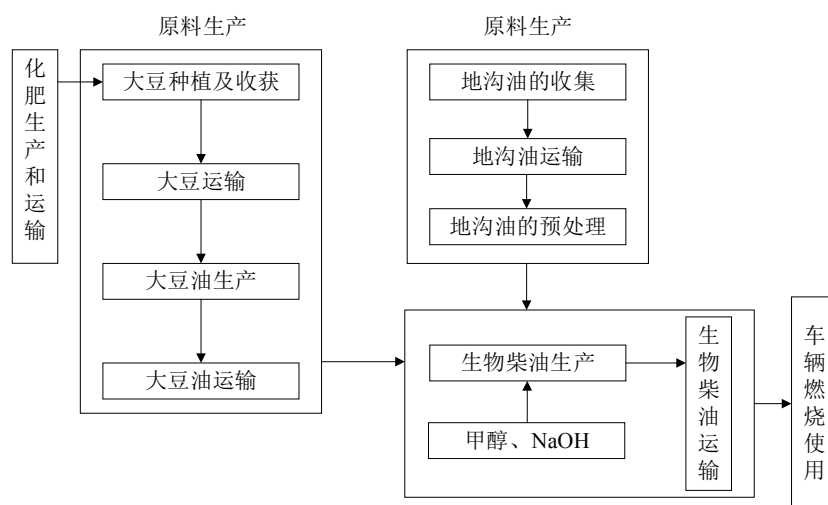


图 1 生命周期框架

Fig. 1 Life cycle framework

以大豆油为原料时,生物柴油的生命周期包括:大豆的种植、大豆的收集与运输、大豆油生产(榨油过程)、生物柴油生产和配送及车辆使用阶段。

以地沟油为原料时,生物柴油的生命周期包括:地沟油的收集与运输,地沟油预处理,生物柴油的生产和配送及车辆使用阶段。

### 1.2 评价指标

生物柴油生命周期的评价指标包括生命周期能源消耗和生命周期排放。

生命周期能耗以标煤和化石柴油为标准进行评价,其他能源消耗(电、天然气)均转换为标煤进行计算。生命周期排放评价指标包括生命周期 CO、CH<sub>4</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、VOC、烟尘和固体废弃物排放指标。能源燃烧产生的 CO、CH<sub>4</sub>、NO<sub>x</sub>、VOC、烟尘和固体废弃物排放系数通过数据收集获得;产生的 SO<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 排放系数通过硫平衡和碳平衡计算得到<sup>[12-13]</sup>。

本文中大豆油与地沟油制备的生物柴油的全生命周期的研究对象是生产 1 kg 生物柴油并用于车辆燃烧使用。

### 1.3 清单分析

根据国际标准 ISO14044<sup>[14]</sup>对生物柴油的全生命周期进行清单分析,生产生物柴油的原料为原料油、甲醇及催化剂,本文中选用的催化剂为氢氧化钠,其催化效率高,反应时间短<sup>[15]</sup>。

以大豆油为原料生产生物柴油时,生产 1 kg 生物柴油需要大豆油 2.271 kg,甲醇 0.624 kg,催化剂 NaOH 0.03 kg。以地沟油为原料生产生物柴油时,需要地沟油 3.573 kg,甲醇 0.624 kg,催化剂 NaOH 0.03 kg。

#### 1.3.1 大豆种植

原料大豆属于一年生的作物,它在一年内吸收 CO<sub>2</sub> 的量就是它在整个生长过程中吸收的量。收集数据得到,每生产 1 kg 生物柴油所需要的大

豆吸收 CO<sub>2</sub> 的量为 2.323 kg<sup>[16]</sup>。大豆的种植过程中能量消耗为化肥（氮肥，磷肥和钾肥）的使用，生产化肥产生的总能量消耗为 55.42 MJ。同时化肥的生产过程产生排放，相关化学品生产的排放数据根据美国能源部阿冈国家实验室发表的 GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation) 模型代入中国化边界条件计算得到<sup>[17]</sup>，如表 1 所示。

### 1.3.2 大豆油制取与地沟油预处理

大豆油的榨取过程采用电机榨油技术，主要能量及动力消耗为电力，处理 1 t 大豆油需要消耗电量 30 kW·h，折合消耗标煤为 0.0639 kg，折算可以得到制备 2.271 kg 大豆油需要消耗能量 1.69 MJ。大豆油

榨取过程中主要消耗电能，因此其生产过程中主要环境排放为产生电能过程中带来的废气及固体废弃物等污染物质，包括 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CH<sub>4</sub>、PM<sub>10</sub> 和固体废弃物<sup>[18]</sup>，具体排放数据在表 2 中列出。

地沟油含有食物残渣和各种杂质，且酸度较高，必须经过去除杂质和水分、脱去脂肪酸、脱胶等过程进行处理<sup>[19]</sup>。地沟油的预处理主要耗电与水，处理得到 3.573 kg 的地沟油所需能量折合消耗标煤为 0.0425 kg，能量即为 1.124 MJ。地沟油预处理阶段主要环境排放为产生电能过程中带来的废气和固体废弃物等污染物质以及生产水过程中带来的污染物，包括 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CH<sub>4</sub>、PM<sub>10</sub> 和固体废弃物，具体排放数据也在表 2 中列出。

表 1 大豆种植过程的环境排放和能源消耗

Table 1 Emissions and energy consumption for the soybean growth

项目	CO <sub>2</sub> / g	SO <sub>2</sub> / g	NO <sub>x</sub> / g	CO / g	CH <sub>4</sub> / g	N <sub>2</sub> O / g	VOC / g	烟尘 / g	能量/MJ
N	1760.23	1.45	1.53	1.02	4.62	0.046	0.16	0.13	30.25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	863.55	1.72	1.36	0.32	1.98	/	0.06	0.12	19.48
K <sub>2</sub> O	259.25	0.26	0.38	0.09	0.37	/	0.04	0.04	5.69
光合作用	-2323.48	/	/	/	/	/	/	/	/
汇总	559.55	3.43	3.27	1.43	6.97	0.046	0.26	0.29	55.42

表 2 原料油制取过程的环境排放和能源消耗

Table 2 Emissions and energy consumption for the oil preparation process

项目	CO <sub>2</sub> / g	SO <sub>2</sub> / g	NO <sub>x</sub> / g	CO / g	VOC / g	CH <sub>4</sub> / g	PM <sub>10</sub> / g	固体废弃物 / g	能量 / MJ
大豆油生产	136.54	3.45	0.51	/	/	0.27	0.20	22.36	1.69
地沟油预处理	96.21	1.25	0.20	/	/	0.09	0.07	15.63	1.124
大豆油运输	13.42	0.0041	0.24	0.0124	0.0082	/	0.0041	0.0041	0.268
地沟油运输	1.06	0.0003	0.02	0.001	0.0006	/	0.0003	0.0003	0.021
生物柴油运输	5.66	0.0017	0.10	0.0052	0.0035	/	0.0017	0.0017	0.113
大豆油生物柴油消耗	3370.35	/	72.76	1.55	/	/	/	/	/
地沟油生物柴油消耗	3370.35	0.04	72.76	1.55	/	/	/	/	/

### 1.3.3 生物柴油的生产

大豆油与地沟油制备生物柴油均需要甲醇与催化剂氢氧化钠。原料甲醇采用煤制备的方法，经过折算，每生产 0.624 kg 甲醇需要消耗能量为 5.12 MJ，此工艺中主要环境排放为 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CH<sub>4</sub>、灰尘和固体废弃物等，具体排放数据在表 3 中列出。催化剂氢氧化钠的制备是氯化钠通过离子膜法进行制取，制备过程主能耗为为电能和蒸汽，经折算每生产 0.03 kg NaOH 需要消耗的能量为 0.65 MJ。制

备 NaOH 过程中主要环境排放是消耗电能及蒸汽，生产电能及蒸汽带来的污染物，包括 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、VOC、CH<sub>4</sub>、PM<sub>10</sub> 和固体废弃物，具体排放数据也在表 3 中给出。

生物柴油的生产采用酯交换反应实验进行，制备过程需要消耗电和蒸汽，电能利用洁净煤火力发电技术生产，蒸汽则由燃烧标煤能量提供。每生产 1 kg 的生物柴油需要电能 22 kW·h，蒸汽 557 kg，折合标煤为 0.0605 kg，即每生产 1 kg 生物柴油需要消

耗能量 1.65 MJ。生物柴油制备过程中主要环境排放是消耗电能及蒸汽,生产电能及蒸汽带来的污染物,包括 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、VOC、CH<sub>4</sub>、PM<sub>10</sub> 和固体废弃物。甲醇、生物柴油生产工艺及生产过程中相关能源消耗来自国内公开出版的文献资料。生产过程产生的相关排放数据<sup>[3,20-21]</sup>,如表 3 所示。

### 1.3.4 运输过程及车辆燃烧使用

大豆油及生物柴油的收集与运输按我国成品油运输结构及其平均运程参考 GREET 中运输模型计算<sup>[22]</sup>,使用柴油卡车进行装载运输,运输过

程中产生的相关排放数据在表 2 中一一列出<sup>[18]</sup>。地沟油的收集使用柴油卡车进行装载运输,以珠三角区域内建厂收集大城市地沟油为模型,故平均运程取 120 km,运输过程中产生的相关排放数据见表 2。

本文中生物柴油的燃烧车辆使用采用在四冲程柴油机中满负荷进行运行,生物柴油在柴油机中消耗时向环境排放 CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 CO。生物柴油燃烧污染物的排放数据来自中国相关实验室<sup>[18]</sup>,每 1 kg 生物柴油燃烧时产生的排放数据在表 3 中列出。

表 3 生物柴油生产过程的环境排放和能源消耗

Table 3 Emissions and energy consumption for the preparation process of biodiesel

项目	CO <sub>2</sub> /g	SO <sub>2</sub> /g	NO <sub>x</sub> /g	CO/g	CH <sub>4</sub> /g	烟尘/g	固体废弃物/g	能量/MJ
NaOH	59.61	1.06	0.17	0.01	0.08	0.06	7.21	0.65
甲醇	0.53	0.31	0.55	/	0.01	1.13	25.65	5.12
生物柴油	175.23	1.62	0.41	0.12	0.08	0.06	11.26	1.65
汇总	235.37	2.99	1.13	0.13	0.17	1.25	44.12	7.42

## 2 生命周期评价结果

### 2.1 生命周期能源消耗

大豆油生产生物柴油的全生命周期中各个阶段的能源消耗情况在表 4 中给出,由表中可得:大豆种植阶段产生的能量消耗为 55.42 MJ;大豆油的榨取能量消耗为 1.69 MJ;甲醇与氢氧化钠的生产能量消耗为 5.77 MJ;生物柴油的生产阶段能量消耗为 1.65 MJ;大豆、大豆油及生物柴油的运输阶段总的能量消耗为 0.381 MJ。大豆油生产 1 kg 生物柴油的全生命周期总能耗为 64.911 MJ。

表 4 大豆油生产 1 kg 生物柴油的能源消耗

Table 4 Energy consumption of 1 kg biodiesel prepared from soybean oil

项目	柴油消耗/MJ	标煤消耗/MJ
大豆生产	/	55.420
运输过程	0.381	/
大豆油生产	/	1.690
甲醇及氢氧化钠生产	/	5.770
生物柴油生产	/	1.650
汇总		64.911

地沟油生产生物柴油的全生命周期中各个阶段的能源消耗情况在表 5 中给出,由表中可得:地沟

油的预处理阶段消耗的能量为 1.124 MJ;地沟油及生物柴油的运输阶段产生的能耗为 0.134 MJ;生产生物柴油阶段及甲醇与氢氧化钾的生产阶段产生的能源消耗与以大豆油制备生物柴油相同。地沟油制备生物柴油的全生命周期的总能源消耗为 8.678 MJ。

表 5 地沟油生产 1 kg 生物柴油的能源消耗

Table 5 Energy consumption of 1 kg biodiesel prepared from waste oil

项目	柴油消耗/MJ	标煤消耗/MJ
地沟油预处理	/	1.124
运输过程	0.134	/
甲醇及氢氧化钠生产	/	5.770
生物柴油生产	/	1.650
汇总		8.678

大豆油与地沟油生产生物柴油生命周期各个阶段的能耗占总能耗的百分比如图 2 所示,从图中可以看出,在大豆油生产生物柴油的生命周期中,主要的能耗处于大豆种植阶段,产生的能耗占总能耗的 85%;其次是生物柴油的生产阶段,其能耗占总能耗的 10%左右;大豆油的榨取及运输阶段的能耗比例很小。而以地沟油为原料生产生物柴油时,主

要的能耗在生物柴油的生产阶段，其能耗占总能耗的 80%左右；地沟油的预处理阶段及运输阶段能耗比例相对较小，大概分别占 10%左右。

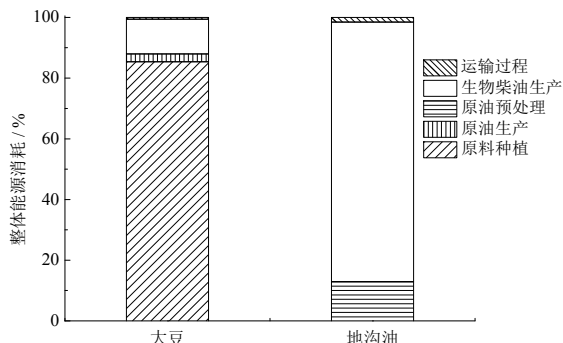


图 2 生物柴油生命周期整体能源消耗对比图  
Fig. 2 Comparison of life cycle total energy consumption of biodiesels from soybean oil and waste oil

综合表 4、表 5 及图 2 可知，以大豆油为原料制备生物柴油产生的能耗是以地沟油为原料的大约 8 倍，一方面以地沟油为原料制备生物柴油可以大幅度的减少生命周期的能耗，另一方面，地沟油为废弃物，以其为原料生产生物柴油可以使其得到合理的二次利用，提高使用价值，符合资源的可持续利用。

表 6 生物柴油生产的环境排放

Table 6 Environmental emissions from the two biodiesels

项目	CO <sub>2</sub> /g	SO <sub>2</sub> /g	NO <sub>x</sub> /g	CO/g	CH <sub>4</sub> /g	VOC/g	烟尘/g	PM <sub>10</sub> /g	固体废弃物/g
大豆油生物柴油	4320.89	9.88	78.01	3.13	7.41	0.27	1.54	0.21	66.49
地沟油生物柴油	3708.65	4.28	74.21	1.68	0.26	0.004	1.25	0.08	59.75

大豆油与地沟油为原料生产生物柴油的生命周期 CO<sub>2</sub> 的排放与化石柴油的 CO<sub>2</sub> 排放的比较在图 3 中展示。从图 3 中可以看出，化石柴油生命周期的 CO<sub>2</sub> 排放量为 26253.45 g，两种生物柴油生命周期的 CO<sub>2</sub> 排放均远远低于化石柴油的排放。以大豆油为原料生产生物柴油的 CO<sub>2</sub> 周期排放为 4320.89 g，较化石柴油 CO<sub>2</sub> 排放降低 83.5%，以地沟油为原料生产生物柴油的 CO<sub>2</sub> 周期排放为 3708.65 g，较化石柴油 CO<sub>2</sub> 排放降低 85.9%。而就两种生物柴油相比较，地沟油为原料的 CO<sub>2</sub> 排放比大豆油为原料排放降低 14.2%。

## 2.2 生命周期排放

表 1 ~ 表 3 分别列出了以大豆油和地沟油为原料生产生物柴油的生命周期中各个阶段的排放，排放分别产生 CO、CH<sub>4</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、VOC、PM<sub>10</sub>、烟尘和固体废弃物。值得注意的是：（1）大豆种植阶段光合作用吸收 CO<sub>2</sub>，与排放的 CO<sub>2</sub> 进行了部分的平衡；（2）整个生物柴油的生命周期过程中排放占比例较大的是生物柴油的燃烧使用阶段，由于大豆油生物柴油中不含 S 元素，所以产生的 SO<sub>2</sub> 排放为 0，而地沟油生物柴油产生的 SO<sub>2</sub> 排放为 0.04 g；（3）生物柴油的车辆使用阶段产生的 NO<sub>x</sub> 的排放最多，占 NO<sub>x</sub> 总排放量的 90%左右；（4）生物柴油生产阶段产生的固体废弃物的排放较多，占总固体废弃物排放的 65%以上。

大豆油与地沟油生产生物柴油的全生命周期过程中产生的 CO、CH<sub>4</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、VOC、PM<sub>10</sub>、烟尘和固体废弃物各个物质的总排放见表 6 中给出。可以看出在大豆油与地沟油生产生物柴油的过程中产生的最大排放为 CO<sub>2</sub>，其排放量分别为 4320.89 g 和 3708.65 g；VOC 与 PM<sub>10</sub> 的排放量极小，排放量均小于 1 g；其他物质的排放量介于 1 ~ 100 之间。

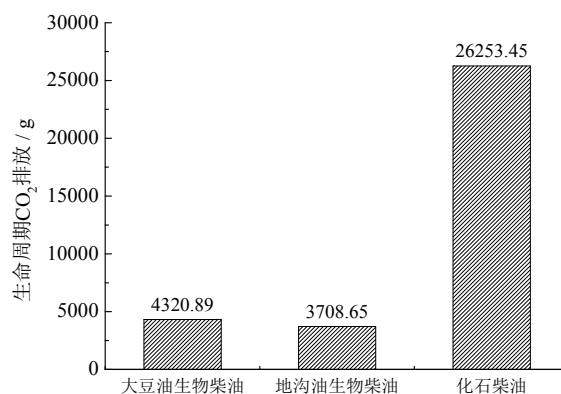


图 3 生物柴油和柴油生命周期 CO<sub>2</sub> 排放对比图  
Fig. 3 Life cycle CO<sub>2</sub> emissions comparison between biodiesel and diesel

生物柴油的全生命周期过程中产生的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{VOC}$ 、烟尘、 $\text{PM}_{10}$  和固体废弃物的排放量柱状图如图 4 所示,从图 4 中可以看出,大豆油与地沟油作为原料生产生物柴油过程中, $\text{NO}_x$  (78.01 g、74.21 g) 和固体废弃物 (66.49 g、59.75 g) 的排放相对较大;  $\text{VOC}$  和  $\text{PM}_{10}$  排放量极小。与大豆油为原料生产生物柴油产生的周期排放相比较,以地沟油为原料生产生物柴油产生周期排放的  $\text{SO}_2$  的排放降低 56.7%,  $\text{NO}_x$  排放降低 4.9%,  $\text{CO}$  排放降低 46.3%,  $\text{CH}_4$  排放降低 96.5%,  $\text{VOC}$  排放降低 98.5%, 烟尘排放降低 18.8%,  $\text{PM}_{10}$  排放降低 61.9%, 固体废弃物排放降低 10.1%。由于以地沟油

为原料生产生物柴油的生命周期中无原料种植阶段,因此与大豆油相比,它的生命周期排放相对较低。

综合表 6、图 3 和图 4 可知,地沟油生产生物柴油的生命周期排放比大豆油生产生物柴油的生命周期排放低,两种生物柴油的排放远远低于化石柴油的排放。两种生物柴油产生的最大排放均为  $\text{CO}_2$  的排放,其次为  $\text{NO}_x$  和固体废弃物。温室气体  $\text{CO}_2$  与  $\text{CH}_4$  的排放较传统化石柴油的排放远远降低,使用生物柴油有利于环境的保护。就地沟油与大豆油生产生物柴油而言,以地沟油为原料更具有优势,整体的能耗低,排放少,也是对废油地沟油的合理利用,同时解决和保护了环境问题。

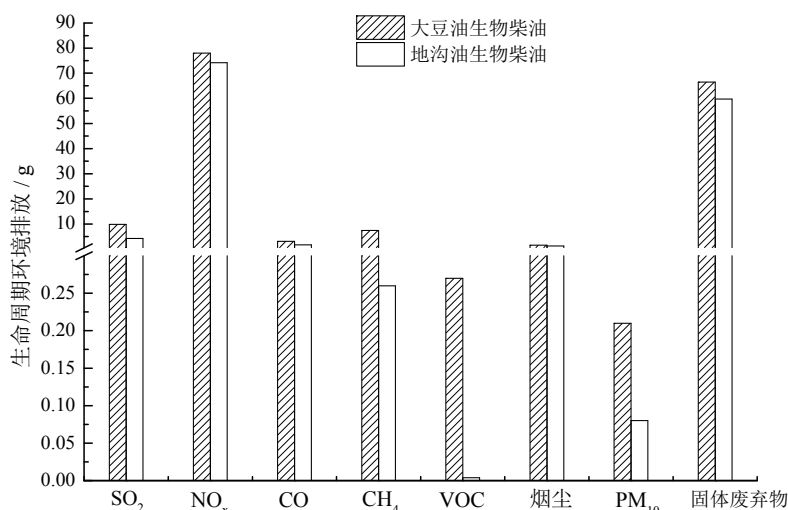


图 4 生物柴油生命周期环境排放图

Fig. 4 Life cycle environmental emissions of biodiesel

### 3 结 论

(1) 大豆油生产生物柴油的全生命周期总能耗远高于地沟油,约为地沟油的 8 倍。以地沟油为原料生产生物柴油不仅节约能源消耗,同时达到地沟油二次利用的目的。

(2) 大豆油生产生物柴油生命周期主要能耗在于大豆种植阶段,约占总能耗的 85%,而地沟油生产生物柴油时主要能耗在于生产阶段,约占总能耗的 80%。

(3) 两种生物柴油的生命周期各个物质的排放远远低于化石柴油的排放,可见生物柴油的推广使用有利于环境保护。

(4) 与大豆油生产生物柴油相比,以地沟油为原料时  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{VOC}$ 、烟尘、

$\text{PM}_{10}$  和固体废弃物各项排放均较低,分别降低 14.2%、56.7%、4.9%、46.3%、96.5%、98.5%、18.8%、61.9%和 10.1%。

(5) 生物柴油的  $\text{CO}_2$  排放远远小于化石柴油的排放,大豆油生物柴油较化石柴油降低 83.5%,地沟油生物柴油则降低 85.9%,使用生物柴油可以大幅度的减少温室气体的排放,对温室效应有所缓解。

(6) 以地沟油为原料生产生物柴油具有生命周期能耗较低、排放低的优点,为我国能源发展开辟了一条新路线,实现了废弃资源的再利用,符合可持续发展 and 环境友好政策。

### 参考文献:

- [1] UNKEFER C J, SAYRE R T, MAGNUSON J K, et al. Review of the algal biology program within the National Alliance for Advanced Biofuels and Bioproducts[J]. Algal

- research, 2017, 22: 187-215. DOI: 10.1016/j.algal.2016.06.002.
- [2] PETERSEN A M, MELAMU R, KNOETZE J H, et al. Comparison of second-generation processes for the conversion of sugarcane bagasse to liquid biofuels in terms of energy efficiency, pinch point analysis and Life Cycle Analysis[J]. Energy conversion and management, 2015, 91: 292-301. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.002.
- [3] DHARMA S, ONG H C, MASJUKI H H, et al. An overview of engine durability and compatibility using biodiesel-bioethanol-diesel blends in compression-ignition engines[J]. Energy conversion and management, 2016, 128: 66-81. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.08.072.
- [4] GAETA-BERNARDI A, PARENTE V. Organic municipal solid waste (MSW) as feedstock for biodiesel production: a financial feasibility analysis[J]. Renewable energy, 2016, 86: 1422-1432. DOI: 10.1016/j.renene.2015.08.025.
- [5] RAJAEIFAR M A, ABDI R, TABATABAEI M. Expanded polystyrene waste application for improving biodiesel environmental performance parameters from life cycle assessment point of view[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2017, 74: 278-298. DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.032.
- [6] 胡志远, 谭丕强, 楼狄明, 等. 不同原料制备生物柴油生命周期能耗和排放评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 141-146. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2006.11.029.
- [7] 邢爱华, 马捷, 张英皓, 等. 生物柴油全生命周期经济性评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(6): 27-36. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2010.06.013.
- [8] ACHTEN W M J, ALMEIDA J, FOBELETS V, et al. Life cycle assessment of *Jatropha* biodiesel as transportation fuel in rural India[J]. Applied energy, 2010, 87(12): 3652-3660. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.07.003.
- [9] ADESANYA V O, CADENA E, SCOTT S A, et al. Life cycle assessment on microalgal biodiesel production using a hybrid cultivation system[J]. Bioresource technology, 2014, 163: 343-355. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.04.051.
- [10] AITKEN D, BULBOA C, GODOY-FAUNDEZ A, et al. Life cycle assessment of macroalgae cultivation and processing for biofuel production[J]. Journal of cleaner production, 2014, 75: 45-56. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.03.080.
- [11] ISO 14040-2006. Environmental management-life cycle assessment- principles and framework[S]. 2006.
- [12] MU D Y, RUAN R, ADDY M, et al. Life cycle assessment and nutrient analysis of various processing pathways in algal biofuel production[J]. Bioresource technology, 2017, 230: 33-42. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.12.108.
- [13] PORTUGAL-PEREIRA J, NAKATANI J, KURISU K, et al. Life cycle assessment of conventional and optimised *Jatropha* biodiesel fuels[J]. Renewable energy, 2016, 86: 585-593. DOI: 10.1016/j.renene.2015.08.046.
- [14] ISO 14044-2006. Environmental management-life cycle assessment- requirements and guidelines[S]. 2006.
- [15] DONG T, GAO D F, MIAO C, et al. Two-step microalgal biodiesel production using acidic catalyst generated from pyrolysis-derived bio-char[J]. Energy conversion and management, 2015, 105: 1389-1396. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.06.072.
- [16] 王修兰. 全球农作物对大气 CO<sub>2</sub> 及其倍增的吸收量估算[J]. 气象学报, 1996, 54(4): 466-473. DOI: 10.11676/qxxb1996.048.
- [17] GNANSOUNOU E, DAURIAT A, VILLEGAS J, et al. Life cycle assessment of biofuels: energy and greenhouse gas balances[J]. Bioresource technology, 2009, 100(21): 4919-4930. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.05.067.
- [18] 董进宁. 生物柴油制取的 LCA 及其技术经济性分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [19] 许英武, 谢晓敏, 黄震, 等. 废煎炸油制生物柴油全生命周期分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 99-103. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2010.02.020.
- [20] PANDEY K K, PRAGYA N, SAHOO P K. Life cycle assessment of small-scale high-input *Jatropha* biodiesel production in India[J]. Applied energy, 2011, 88(12): 4831-4839. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.06.026.
- [21] HUMS M E, CAIRNCROSS R A, SPATARI S. Life-cycle assessment of biodiesel produced from grease trap waste[J]. Environmental science & technology, 2016, 50(5): 2718-2726. DOI: 10.1021/acs.est.5b02667.
- [22] GNANSOUNOU E, RAMAN J K. Life cycle assessment of algae biodiesel and its co-products[J]. Applied energy, 2016, 161: 300-308. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.043.

#### 作者简介:

严军华 (1973-), 男, 博士研究生, 主要从事能源战略分析研究。

袁浩然 (1981-), 男, 博士, 研究员, 主要从事生物质能源转化研究。