

## 以原料种类为基础分类的生物柴油特性综述

高楠<sup>1</sup>, 李文杰<sup>1</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 赵伟<sup>1</sup>, 张洁<sup>1</sup>, 耿莉敏<sup>1</sup>, 贺卫东<sup>2</sup>, 李植林<sup>2</sup>, 邢学军<sup>2</sup>, 王淑云<sup>3</sup>

(1. 长安大学 陕西省交通新能源开发、应用与汽车节能重点实验室, 西安 710078;

2. 陕西建设机械股份有限公司, 西安 710201; 3. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司, 西安 710100)

**摘要:** 生物柴油是良好的石油柴油替代品, 因其环保性能好、发动机启动性能好、燃油性能好、原料来源广、可再生等特点, 具有广泛的应用前景。然而不同原料内脂肪成分及含量不同, 所制备而成的生物柴油在燃烧时, 性能以及排放等特性也呈现出不同的趋势。以生产生物柴油的原料种类为基础, 对生物柴油进行分类, 并对不同种类生物柴油的特性进行综述。对生物柴油的理化性质以及制备工艺进行了详细介绍, 区别于以制取生物柴油的技术迭代为基础的生物柴油分类, 按照原料来源不同对生物柴油进行分类, 这为之后的表格汇总以及各种不同原料生产的生物柴油进行横向对比提供了基础。分别对不同种类原料制备而成的生物柴油使用特性以及变化趋势进行归纳整理, 将试验结果进行直观呈现, 并对不同原料所生产的生物柴油特性进行评价, 所有关于生物柴油的研究都表明, 在污染物排放方面, 发动机在使用大多数生物柴油时都发现 CO 等碳的氧化物的排放量减少, 大部分研究表明碳氢化合物的排放量也减少了, 但是 NO<sub>x</sub> 的排放量增多, 这几乎是所有不同种类生物柴油的共同特点。针对目前不同种类生物柴油在使用过程中的局限性以及不足之处, 提出未来生物柴油使用特性优化的方向。

**关键词:** 原料分类; 生物柴油; 理化性质; 制备工艺; 使用特性

中图分类号: TE626 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2025.03.01

## A Review of the Characteristics of Biodiesel Classified on the Basis of the Type of Raw Material

GAO Nan<sup>1</sup>, LI Wenjie<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, GENG Limin<sup>1</sup>,

HE Weidong<sup>2</sup>, LI Zhilin<sup>2</sup>, XING Xuejun<sup>2</sup>, WANG Shuyun<sup>3</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of New Transportation Energy and Automotive Energy Saving, School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710078, China;

2. Shaanxi Construction Machinery Co., Ltd., Xi'an 710201, China;

3. Shaanxi Coal Chemical Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Biodiesel is a good substitute for petroleum diesel, because of its good environmental performance, good engine starting performance, good fuel performance, wide source of raw materials, renewable and so on, it has a wide application prospect. However, the fat composition and content of different raw materials are

收稿日期: 2024-10-10 改稿日期: 2024-11-24 网络首发日期: 2024-12-06

基金项目: 陕西省科技计划项目(2018JQ5113): 基于能量流分析的柴油机 RCCI 模式应用甲醇和正丁醇的对比研究

参考文献引用格式:

高楠, 李文杰, 张鹏, 等. 以原料种类为基础分类的生物柴油特性综述[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(3): 263-286.

GAO Nan, LI Wenjie, ZHANG Peng, et al. A Review of the Characteristics of Biodiesel Classified on the Basis of the Type of Raw Material[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15(3): 263-286. (in Chinese)



different, and the performance and emission characteristics of the prepared biodiesel also show different trends during combustion. Based on the types of raw materials for biodiesel production, this paper classifies biodiesel and summarizes the characteristics of different kinds of biodiesel. Firstly, the physical and chemical properties and the preparation process of biodiesel was introduced in detail. Secondly, this paper is different from the classification of biodiesel based on the technological iteration of biodiesel production, but classifies biodiesel according to the source of raw materials, which provides a basis for the summary of the table and the horizontal comparison of biodiesel produced from various raw materials. Then, the use characteristics and changing trends of biodiesel prepared from different kinds of raw materials are summarized and sorted out in the table, and the summarized experimental results are visually presented, the characteristics of biodiesel produced from different raw materials were evaluated, in all the studies on biodiesel, it has been shown that in terms of pollution emissions, the engine found that the emission of CO and carbon oxides was reduced when using most biodiesel, and most studies showed that the emission of hydrocarbons was also reduced, but the emission of NO<sub>x</sub> was increased, which is almost a common feature of all different types of biodiesel. Finally, according to the limitations and shortcomings of different types of biodiesel in the use process, the future direction of biodiesel use characteristics optimization was proposed.

**Keywords:** raw materials classification; biodiesel; physical and chemical properties; preparation process; practical performance

随着社会的飞速发展,石油、煤炭等不可再生能源消耗量日益增加,能源燃烧对生态环境的污染程度不断加剧,因此,人们对绿色能源的兴趣越来越大<sup>[1]</sup>。生物柴油因其可再生和污染物排放量少等特点,可作为传统燃料的替代燃料,被视为最有前途的能源之一<sup>[2-3]</sup>。

生物柴油是从各种植物油和动物脂肪中提取的脂肪酸甲酯。生物柴油具有以下优点。

(1) 生物柴油在发动机上使用时,不需要对传统柴油内燃机进行额外改造,储存方式也与石油柴油相同,这使生物柴油具有广泛使用的基础<sup>[4]</sup>。

(2) 生物柴油原料来源十分广泛,可以通过植物脂肪制取,可以通过动物脂肪制取,可以通过人工培育富含脂肪的藻类制取,还可以通过人类废弃的食用油制取。归根结底,生物柴油制取所需原料都源于光合作用,但是动植物、藻类以及人类废弃食用油的碳循环速度远超石油和柴油,相较于使用过程中的CO<sub>2</sub>排放,在循环过程中通过光合作用吸收的CO<sub>2</sub>更多,所以生物柴油不仅为可再生能源,也更加环保<sup>[1]</sup>。

(3) 生物柴油的排放相较传统石油、柴油更加环保。使用生物柴油作为车用燃料,可使废气中硫

氧化物排放量减少100%,芳烃减少75%~90%,致癌物减少90%。此外,生物柴油燃烧产生的CO<sub>2</sub>远低于植物整个生长过程中所吸收的CO<sub>2</sub>,有利于缓解温室效应,响应国家节能减排的号召<sup>[5]</sup>。

(4) 在使用过程中,由于生物柴油含氧量高,基本不含硫,并且具有非常好的润滑性,对油耗、燃料可燃性、输出功率和发动机转矩没有影响<sup>[6]</sup>。

除了以上优点,生物柴油也有一些缺点。

当生物柴油用作车用燃料时,NO<sub>x</sub>的排放量与石油柴油相比略有增加。原料对生物柴油的性能影响很大,如果原料中棕榈酸或硬脂酸等饱和脂肪酸含量高,则生物柴油的低温流动性可能较差。如果多不饱和脂肪酸含量较高,则生物柴油的氧化稳定性可能较差。由于制备工艺的问题,使生物柴油中含有少量酒精,在使用时会产生一些有毒有害的排放物(乙醛、苯、1,3-丁二烯)<sup>[7-11]</sup>。

目前,关于生物柴油的研究已经取得了大量成果。对于生物柴油使用的研究也不仅仅局限于单一原料和单一制备路线,不仅有学者通过将不同原料制成的生物柴油进行混合来提高生物柴油的整体使用特性,还有学者通过改进制备路线,由乙基合成生物柴油,使用特性较甲基路线所合成的生物柴油

也有较大提高。本文对相关学者的大量研究成果进行分类总结,首先,按照原料来源不同对生物柴油进行分类,而不是按照生物柴油制取技术进行分类;然后,分别对不同种类原料制备而成的生物柴油使用特性进行归纳整理;最后,针对目前不同种类生物柴油在使用过程中的局限性以及不足之处,提出未来生物柴油使用特性优化的方向。

## 1 生物柴油理化性质及制备工艺

### 1.1 生物柴油理化性质

生物柴油的物理特性是重要的燃料性质,如密度、粘度、表面张力和闪点等。因为生物柴油的物理特性与传统矿物柴油相似,所以生物柴油才可以在不对柴油机燃油喷射系统和燃烧室进行改装的情况下使用。而生物柴油的化学特性则是生物柴油燃烧性能好坏的评判标准,也是生物柴油与传统石油柴油的主要区别,主要的化学特性有氧含量、十六烷值和热值等。

#### 1.1.1 密度

生物柴油的密度是影响其在发动机上使用的最重要的燃料特性之一。燃料密度是一项重要的物理性质,它直接影响热值、十六烷值等燃料指标<sup>[12]</sup>。生物柴油的密度通常高于传统石油柴油,这是因为燃料的密度值与燃料中存在的烃类链的脂肪酸饱和水平和碳链长度有关。生物柴油的密度随着链长(碳原子数)的减少和双键数(不饱和度)的增加而增加<sup>[13-14]</sup>。燃料在柴油发动机中应用时,燃料的密度会影响喷雾特性。生物柴油的密度取决于脂肪酸含量、摩尔质量、含水量和温度,特别受其生产所使用的原料的影响。大豆油、菜籽油和棕榈油是常用的原料,然而不可食用的植物油,如麻风树也被作为生产生物柴油的合适原料而研究<sup>[15]</sup>。生物柴油混合物的密度随着生物柴油混合比例的增加而增加,许多研究表明,生物柴油、石油柴油和生物柴油混合物的密度随温度升高而降低,并且它们的密度随温度变化的趋势十分相似<sup>[16-21]</sup>,如图1所示。

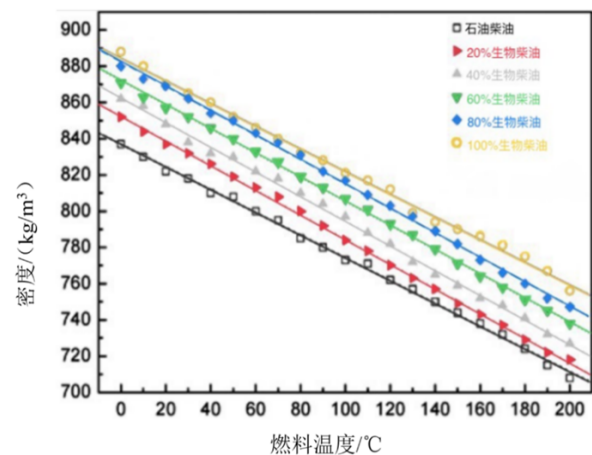


图1 燃料密度随温度变化曲线

#### 1.1.2 粘度

在分析柴油机缸壁附近的液体流动时,粘度是一项重要的燃料性质,它是对流体受剪切应力变形的阻力的度量,流场中的剪切阻力是由分子间摩擦引起的。一般来说,生物柴油在40 °C时的粘度范围比生物柴油标准(ISO-3104)中反映的常规矿物柴油略高,较高的粘度既影响燃料发动机的喷雾特性,也影响其燃烧特性,高粘度的生物柴油需要更长的时间才能蒸发并与燃烧室中的空气混合<sup>[19-22]</sup>。对于高粘度的燃料油,一般需经预热,使粘度降至一定水平,然后进入燃烧器以使其在喷嘴处易于喷雾雾化。

#### 1.1.3 表面张力

表面张力被定义为单位长度的液体表面所需的能量,即液体表面能量与表面积之比,它取决于分子间的作用力,一般来说,燃料分子间的作用力取决于液体燃料类型。生物柴油的表面张力是分析燃料喷雾、雾化和汽化特性的一个重要因素,因为较高的表面张力会影响喷射液体燃料喷雾的解体<sup>[23-25]</sup>。传统石油柴油和生物柴油在293 K下的表面张力分别约为28.0、31.7 mN/m<sup>[26]</sup>。在柴油发动机中,燃油喷射和雾化是燃料在燃烧室燃烧的第1阶段。进入气缸中的氧气与喷入燃料表面的雾化液滴发生反应,燃烧产生的热量释放到气缸中。在生物柴油的喷雾液滴形成和喷雾破碎过程中,表面张力、粘度和液滴惯性是最相关的因素。DAVANLOU等<sup>[27]</sup>研究了燃料粘度和表面张力对4种不同液体

燃料的喷射影响, 结果表明, 随着表面张力的降低, 喷雾直径减小。

#### 1.1.4 闪点

闪点被定义为燃料在空气中暴露于火焰或火花时能形成可燃混合物的最低温度。燃点是可燃蒸气继续形成并稳定燃烧的最低温度, 在处理、储存和安全管理生物柴油时, 闪点是一个需要考虑的重要燃料特性, 表1总结了了几种不同原料生产的生物柴油的闪点。

表1 不同生物柴油的闪点

原料	闪点/°C
大豆油 <sup>[28]</sup>	178
花生油 <sup>[28]</sup>	176
棕榈油 <sup>[29]</sup>	151.71
蓖麻籽油 <sup>[29]</sup>	285.71
葵花籽油 <sup>[28]</sup>	139
菜籽油 <sup>[30]</sup>	170
麻风树油 <sup>[31]</sup>	184.50
动物脂肪 <sup>[32]</sup>	117
卡兰贾油 <sup>[32]</sup>	237
#2 柴油 <sup>[32]</sup>	60~72

表1中生物柴油的闪点平均值为182.10 °C, 是矿物柴油(60~72 °C)的2.53~3.03倍。从这些数据中可以明显看出, 生物柴油的闪点明显高于矿物柴油。当考虑在一般情况下使用生物柴油时, 较高的闪点对测试和处理测试燃料更安全, 更高的闪点确保了生物燃料和乘客的安全性。

#### 1.1.5 氧含量

石油柴油和生物柴油在化学结构和成分方面的主要区别之一是其氧含量。生物柴油与石油柴油相比的一个显著优势是生物柴油的分子结构中氧含量更高<sup>[33-34]</sup>。氧含量的变化归因于生产燃料所用的不同原料的氧化程度及其化学成分。用作生物柴油生产原料的高饱和油含氧量更高, 燃烧干净且稳定。生物柴油的氧含量提高了燃烧速率, 缩短了燃烧持续时间, 因此, 生物柴油的高氧含量可以提高燃烧效率, 减少CO、碳氢化合物和其他有害物质的排放量<sup>[35-36]</sup>。

#### 1.1.6 十六烷值

在柴油发动机中, 点火和燃烧性能是测试燃料最重要的因素。通常, 十六烷值与点火延迟期有关, 并取决于测试燃料的成分和不饱和度<sup>[37]</sup>。由于点火延迟较短, 较高的十六烷值会提前燃烧正时<sup>[38]</sup>。十六烷值与点火延迟之间的关系表明, 较高的十六烷值会缩短点火延迟。此外, 十六烷值还受脂肪酸链长度和双键数量的影响。生物柴油的十六烷值随着链长的增加而增加, 随着双键数量的增加而降低<sup>[39]</sup>。生物柴油的平均十六烷值高于石油柴油, 由于点火延迟较短, 较高的十六烷值往往会提高缸内峰值燃烧温度<sup>[38-48]</sup>, 收集到的部分生物柴油与石油柴油十六烷值如图2所示, 大多数生物柴油的十六烷值高于石油柴油的十六烷值。

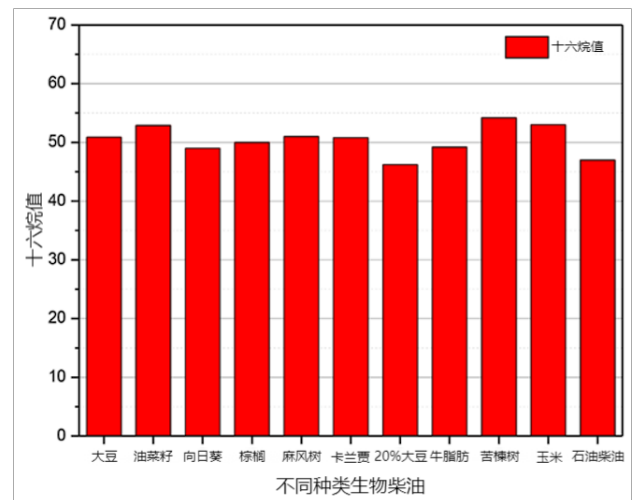


图2 部分生物柴油和石油柴油十六烷值<sup>[37, 39-47]</sup>

#### 1.1.7 热值

在确定生物柴油是否适合柴油发动机时, 最重要的特性之一是测试燃料的热值。大豆生物柴油的低热值(不包含燃料的汽化潜热)为37.04 MJ/kg, 比石油柴油的43.07 MJ/kg低14.05%<sup>[32-50]</sup>。图3显示了部分生物柴油与传统石油柴油的低热值比较。

生物柴油及其混合物的热值取决于测试中生物柴油的混合比例。为了补偿生物柴油及其混合物较低的低热值, 就需要在发动机的每个循环中喷射更多的燃料, 以提供相同的发动机功率输出。生物柴油的热值受其分子量和双键数的影响, 一般来说, 生物柴油的热值随着碳原子数量的增加而增加, 而

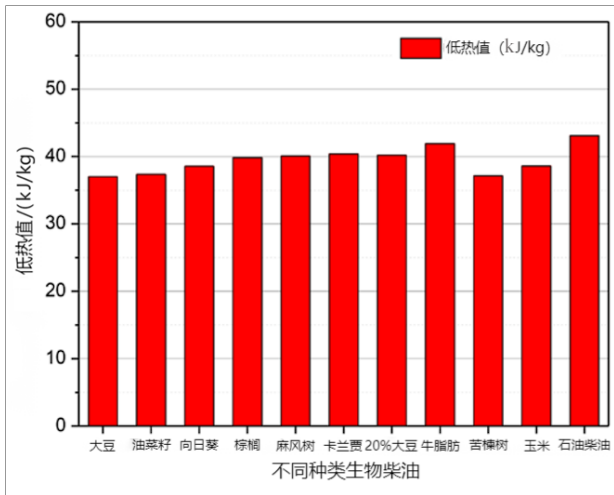


图3 部分生物柴油和石油柴油低热值 [37, 39-47]

随着双键数量的增加而降低 [38]。

## 1.2 生物柴油制备工艺

生物柴油的成分组成对其密度、粘度、表面张力等物理性质有显著影响。发动机的性能和排放特性取决于生物柴油的特性 [51]。生物柴油可以通过4种主要技术生产：直接使用和原油混合、微乳液、酯交换和热解 [52]。现在常用的生物柴油生产技术是酯交换反应 [53-55]。

直接使用法是将粗植物油与柴油混合或稀释以提高粘度的方法，以1:10~2:10的比例混合是比较成功的 [55]。然而MA Fangrui等 [56]的研究中指出，由于粘度过高、油中的酸成分不理想和树胶含量较高等问题，这样通过直接混合法混合而成的混合油不适用于柴油发动机。

ABBASZADEH等 [55]为了解决植物油的高粘度问题提出微乳液工艺。微乳液是指通过将植物油与合适的溶剂混合制成生物柴油，研究中符合要求的溶剂有甲醇、乙醇和丁醇。这种工艺的缺点是燃料会不完全燃烧，从而导致发动机产生积碳。

油的热解是一个加热过程，在这个过程中将一种有机物转化为另一种有机物。MOHAN等 [57]在研究中发现，通过热解过程生产的生物柴油燃料适用于柴油发动机。然而，由于在此过程中去除了氧气，所以燃料的燃烧性能降低 [55]。虽然该生产工艺具有设备昂贵、热值低、挥发性较差和不稳定的缺点 [58]，但仍然具备一些优点，如较低的加工成

本、工艺简单、浪费较少、无污染等 [59]。ITO等 [60]就曾提出热解法适用于生物柴油的加工生产。

研究中发现酯交换反应是生产生物柴油的最佳选择，该反应可以降低油的粘度，使生产出的生物柴油更加适配于柴油机 [55]。酯交换反应的常规工艺流程如图4所示。反式酯化过程是指在催化剂的作用下，由油原料酸化后的酸化油与醇反应生成甘油和甲酯。之后该过程继续进行，并分离出生物柴油和甘油，然后进行醇回收。回收的醇再循环到最初的工艺中，而产生的甲酯则被送去纯化，也称为洗涤步骤。然后，它将经过干燥过程，得到生物柴油。影响酯交换反应速率的因素有催化剂类型、醇与植物油的摩尔比、水和游离脂肪酸的含量、温度和反应时间 [54-55]。

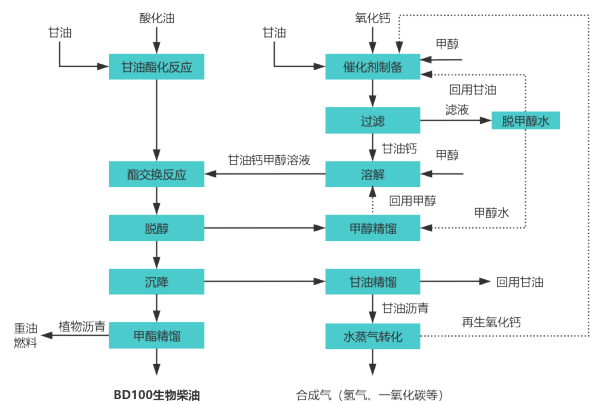


图4 一种生物柴油的酯交换反应过程 [55]

## 2 生物柴油种类

现有的生物柴油按照技术迭代大致可以分为：第1代生物柴油、第2代生物柴油和第3代生物柴油。第1代生物柴油是通过可食用植物油或动物脂肪的酯交换反应制备而成；第2代生物柴油原料较多，包括有机废物、木材、生物质和废弃食用油等；第3代生物柴油采取的原料为生长周期较短，且富含脂肪的藻类作为原料，制取生物柴油的工艺与第1代生物柴油类似 [61]。

上述分类方法虽然将生物柴油按照发展先后顺序及原料进行分类，但原料种类分类不够明确，尤其在现有的大量研究中，许多原料掺混制成的生物

柴油种类难以区分, 归类整理难度较高。随着生物柴油制备工艺的发展, 目前生物柴油原料的来源越来越广泛, 已经存在第 4 代、第 5 代生物柴油, 按此分类比较繁杂且重叠较多<sup>[62]</sup>。因此, 本文将按照生产原料的种类对生物柴油进行分类, 将生物柴油大致分为植物油生物柴油(可食用和不可食用)、动物脂肪生物柴油、藻类生物柴油以及废弃原料生物柴油 4 类。

### 2.1 以植物油为原料的生物柴油

以植物油为基础的生物柴油在 19 世纪 90 年代被引入和研究, 当时 Rudolph Diesel 发明了用于农业部门机器的柴油发动机<sup>[3]</sup>。1920 年, 石油燃料的低成本降低了对生物柴油的需求, 人们因此对柴油发动机进行改造, 以匹配石油柴油燃料的性能。20 世纪 70 年代的石油危机重新燃起了人们对植物油的兴趣, 并且因为石油危机, 可再生的生物柴油在市场中占据了优势<sup>[63]</sup>。然而, 因为生物柴油高粘度的物理特性, 现代柴油发动机中使用传统植物油所合成的生物柴油效果并不理想, 所以相关学者开始对生产低粘度植物油的方法进行研究, 推出了酯交换法、热解法、溶剂共混法等多种方法。1977 年, 巴西科学家 Expedito Parente<sup>[64]</sup> 申请了第 1 个在工业上生产生物柴油工艺的专利。1979 年, 南非启动了使用葵花籽油生产生物柴油的研究<sup>[65]</sup>。

### 2.2 以动物油(脂肪)为原料的生物柴油

生物柴油由脂肪酸烷基酯的混合物组成, 这些脂肪酸烷基酯来源于可再生的脂质原料, 如植物油和动物脂肪, 基本上是三酰基甘油。食用植物油是生产生物柴油的常用原料, 但废弃动物脂肪(Waste Animal Fat, WAF)也是合适的脂质资源<sup>[66]</sup>。

### 2.3 以藻类为原料的生物柴油

使用从藻类中提取的油被认为是一种替代使用耕地食物生产生物柴油的方法, 可以避免耕地作物生产粮食和生产生物柴油产生竞争<sup>[6]</sup>。藻类可分为微藻和大藻, 两者都被研究作为生物燃料的来源<sup>[7, 67]</sup>。MACEIRAS 等<sup>[8, 68]</sup> 研究了使用大型藻类作为原料生产生物柴油和其他生物燃料。经研究发

现, 藻类作为生物柴油原料生产的优点很多, 不仅碳循环周期短(生长周期短), 其含油量也十分可观<sup>[8, 68]</sup>。

### 2.4 以废弃食用油为原料的生物柴油

废弃食用油作为柴油燃料的优点是液体性质的便携性、现成的可用性、可再生性、较高的热含量、较高的闪点、较高的十六烷值、较低的硫和芳香烃含量以及可生物降解性, 这些物理性质决定以废弃食用油作为原料所合成的生物柴油在燃烧时能具备很好的性能, 并且排放有害物较少<sup>[66]</sup>。由废弃食用油原料生产的生物柴油可以克服当前生物柴油技术的社会经济劣势, 降低生产成本, 并能应对气候变化和能源危机的许多挑战<sup>[69]</sup>。

生物柴油具有十六烷值高、含硫量低的特点, 一般与传统石油柴油按一定比例混合使用, 对改善传统柴油车尾气中碳氢化合物、CO、颗粒物的排放有明显效果。生物柴油的不同组成比例对其密度、粘度、表面张力等物理性能有很大影响, 内燃机的性能和排放特性也取决于生物柴油的这些物理性能。如果要大规模使用生物柴油作为内燃机的替代燃料, 还需要对内燃机的不同性能参数、颗粒物和碳氢化合物混合物的排放特性、压力上升速率、发动机爆震、润滑油降解、发动机缸体耐久性等进行研究<sup>[62]</sup>。

表 2 为不同原料的生产对比分析, 表 3 简单总结了不同原料来源的生物柴油的优缺点。

## 3 不同种类生物柴油使用研究成果综述

由于生物柴油大多是经过与石油柴油混合后再进行使用, 所以对其纯度进行规定。B100 是生物柴油的纯度标准, 其数值越高, 代表生物柴油含量越高, 例如: B100, 指 100% 为生物柴油; B2, 指 2% 生物柴油, 98% 石油柴油; B5, 指 5% 生物柴油, 95% 石油柴油, 以此类推<sup>[70]</sup>。目前, 使用最广泛的生物柴油是以可食用植物油为原料生产的。数据显示, 目前全球生物柴油的主要原材料中: 棕榈油占比 33%, 是印度尼西亚、马来西亚等东南亚热带国家主要使用的原料油; 大豆油占比 27%, 是

表 2 生物柴油不同原料生产对比分析

	可食用植物作物	不可食用植物作物	动物脂肪	藻类	废弃食用油
与食物生产的分歧	产生很大分歧	没有	几乎没有	没有	没有
原料储备	多	少	少	非常少	少
土地利用效率	中等	中等		高	
生产可行性	受到限制	受到限制	可行性高	可行性高	可行性高
原料产地限制	受到限制	受到限制	不受产地限制	不受产地限制	不受产地限制
减少排放的潜力	中等	中等	优秀	优秀	优秀
代替石油的能力	中等	中等	优秀	优秀	优秀
现有基础设施利用	利用率高	利用率高	利用率高	几乎不能直接利用	利用率高
商业技术利用	利用率高	几乎不能直接利用	几乎不能直接利用	几乎不能直接利用	几乎不能直接利用
生产过程难易程度	中等	中等	中等	困难	中等
生产成本	高	高	高	高	高
生产所需产业规模	中等	高	高	高	高

表 3 不同来源生物柴油优缺点比较

原料种类	优点	缺点
植物油 可食用	制备工艺成熟、原料来源广泛，成品生物柴油性能较好	容易引发分歧、成本较高
植物油 不可食用	来源广泛、较环保、可使用荒林中的植物	原料较难获得、种类繁多需要进一步研究
动物脂肪	制备成品性能好、原料易得、经济性较好	不易运输与储存、原料成分分布不均
废弃食用油	可以直接利用、工艺简单、原料易得、经济性较好	油品参差不齐
藻类	种植简单、含油量高	工艺繁琐、设备成本高昂

美国、巴西、阿根廷等国家主要使用的原料油；菜籽油占比 16%，是欧盟国家主要使用的原料油；废弃油脂占比 15%，中国生物柴油主要采用废弃油脂作为原料，由于其环保减碳价值也被世界许多生物柴油企业采用<sup>[71]</sup>。

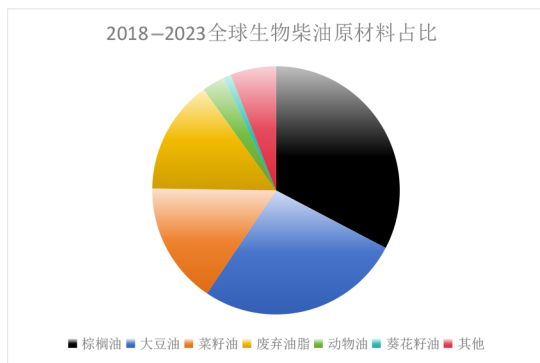


图 5 2018-2023 年全球生物柴油原材料占比<sup>[71]</sup>

由于可食用植物油作为原料生产生物柴油会引起食品与能源产业的竞争，更多学者看到了这方面可能存在的危机，所以对其他种类原料生产的生

物柴油进行了更多的研究。不少研究结果表明，其他种类生产的生物柴油在使用时表现出的特性也十分优异。

### 3.1 以植物油为原料的生物柴油

以植物油作为生物柴油的生产原料是比较理想的，通过光合作用可以实现较短周期的循环再生，植物生物柴油碳循环过程如图 6 所示。



图 6 植物生物柴油碳循环<sup>[1]</sup>

选择合适的原料是保证生物柴油低成本的关键。生物柴油的原料应尽可能满足生产生物柴油的两个要求,即低成本和大规模生产<sup>[72]</sup>。一般来说,以植物油为原料所生产的生物柴油原料可分为两类,一类是可食用的植物油,如大豆油、棕榈油等;一类是不可食用的植物油,如麻风树油、亚麻籽油等<sup>[1]</sup>。

### 3.1.1 以可食用植物油为原料

目前,生物柴油主要是从传统种植的食用油料植物中生产出来的,这也导致了这些农作物在作为食品或燃料方面产生了分歧。从可食用油中提取的生物柴油经济性和可持续性在目前看来并不理想,这也使人们开始关注其他原料制成的生物柴油<sup>[62]</sup>。其他可以生产生物柴油的原料包括不可食用的植物油、废弃食用油、藻类以及动物脂肪。它们作为生产原料既不会使粮食作物的用途产生分歧,也不会因生产生物柴油而导致土地开垦<sup>[73]</sup>。

在1900年的巴黎世界博览会上,展出了1台以花生油为燃料的小型柴油发动机,这是第1次使用植物油作为柴油发动机的燃料<sup>[74]</sup>。关于植物油酯的第1篇学术报道可能要追溯到1980年<sup>[75]</sup>,来自南非的研究人员描述了在柴油发动机中使用葵花籽油甲酯,并且这些酯的使用缓解了植物油在使用过程中粘度过高的问题。

棕榈油作为生物柴油的生产原料应用比较广泛。在研究当中,ABU-HAMDEH等<sup>[76]</sup>分别对由甲基路线合成的,原料为杏仁油和棕榈油的B10、B30和B50进行测试,令发动机在不同的转矩状态下运转,NO<sub>x</sub>、颗粒物、CO以及碳氢化合物的排放量均低于传统石油柴油。KARAVALAKIS等<sup>[77]</sup>对由甲基路线合成的,由椰子油和棕榈油混合油为原料的B5、B20和B40分别进行了欧洲新车排放测试工况循环(New European Driving Cycle, NEDC)、城市工况循环(Urban Driving Cycle, UDC)和雅典驾驶循环(Athens Driving Cycle, ADC)测试,结果表明,它们的NO<sub>x</sub>排放量较石油柴油都有所增加,B20和B40的颗粒物排放量较石油柴油减少较多,NEDC碳氢化合物排放量较石油柴油增加,而

ADC则减少,B40的CO排放量较石油柴油减少47%,但CO<sub>2</sub>排放量有少许增加。NG等<sup>[78]</sup>进行了两组试验测试,在第1组试验测试中,使用由甲基路线合成的,原料为棕榈油的B50和B100进行变工况测试,转速由1 800 r/min逐渐增加到2 800 r/min,负荷由0.5 kW逐渐增加到2.5 kW,试验测试表明,在这种测试条件下生物柴油的性能与石油柴油相当;第2组试验测试中,生物柴油的合成路线与原料相同,试验条件为固定的发动机额定工况,NO<sub>x</sub>、颗粒物以及碳氢化合物的排放量较石油柴油都有所下降。ALTUN<sup>[79]</sup>采用了以甲基路线合成的,以棕榈油、棉籽油和凤尾鱼油混合而成的混合油为原料的B20和B100,在额定转速1 500 r/min工况下进行试验测试,结果表明,较超低硫柴油性能相似,但NO<sub>x</sub>和碳氢化合物排放量较高,CO排放量略有降低。

玉米油、大豆油和菜籽油均为生活中常见的食用油,而作为生物柴油生产原料,许多学者也对它们的使用特性进行了研究。QI Donghui等<sup>[80]</sup>对由甲基路线合成的,原料为大豆油的B30、B50、B80和B100,在发动机上由15%~90%额定负荷工况进行测试,NO<sub>x</sub>的排放量较石油柴油有所增加,CO排放量则减少。GODIGANUR等<sup>[81]</sup>采用由甲基路线合成的,原料为玉米油的B20、B40、B60和B80进行试验测试,结果表明,NO<sub>x</sub>排放量较石油柴油增多,但碳氢化合物和CO排放量降低。不同的是PUHAN等<sup>[82]</sup>采用乙基路线合成的,原料为玉米油的B100在1 500 r/min的固定转速工况下进行测试,试验发现B100较石油柴油NO<sub>x</sub>、颗粒物、CO以及碳氢化合物排放量均降低,CO<sub>2</sub>排放量增加,不仅排放性能优秀,燃烧也更加充分,性能突出。ARMAS等<sup>[83]</sup>采用甲基路线合成的,以大豆为原料的B100在2 400 r/min和64 Nm的固定工况下进行试验测试,对比燃料为超低硫柴油,结果显示除颗粒物排放量略有增加,NO<sub>x</sub>、碳氢化合物及CO排放量均减少,燃烧与排放性能均表现优异。RAHEMAN等<sup>[84]</sup>采用甲基路线合成的,以玉米油为原料的B20、B40、B60、B80和B100,在1 500 r/min固定

转速工况下进行试验测试，对比燃料为高速柴油机用柴油，结果显示 $\text{NO}_x$ 排放量增加，CO排放量减少。SERRANO等<sup>[85]</sup>还采用以甲基路线合成的，由84%大豆油和16%棕榈油混合而成的混合油为原料的B7和B20，在不同循环驾驶工况下进行试验测试，结果显示，B7的 $\text{NO}_x$ 排放量较石油柴油增加5%，而B20的 $\text{NO}_x$ 排放量较石油柴油减少了20%。MAKAREVICIENE等<sup>[86]</sup>采用以甲基路线合成的，以菜籽油为原料的生物柴油进行测试，燃烧较石油柴油更加充分，发动机性能更好，各项排放物都降低。BUYUKKAYA<sup>[87]</sup>采用了以甲基路线合成的，以菜籽油为原料的生物柴油在不同转速工况下进行试验测试，结果显示，以菜籽油为原料合成的生物柴油纯度越高，发动机工作性能越好，且CO排放量越少，B5的CO排放量较石油柴油低了5%，但B100的CO排放量较石油柴油低了35%。

其他可食用油作为生物柴油的生产原料也被众多学者进行了广泛研究。NABI等<sup>[88]</sup>对由甲基路线合成的，原料为棉籽油的B10、B20和B30在固定转矩的发动机中进行测试，结果显示与传统石油柴油相比，B30的 $\text{NO}_x$ 排放量增加了10%，但CO排放量降低了24%，B20的颗粒物排放量降低24%。SERRANO等<sup>[85]</sup>采用由甲基路线合成的，以米糠油为原料的B20，分别在发动机25%、50%、75%和100%额定负荷工况下进行试验测试，试验结果表明，该生物柴油在25%、50%和75%额定负荷工况下较2号柴油 $\text{NO}_x$ 排放量有所升高。KALLIGEROS等<sup>[89]</sup>分别采用以甲基路线合成的，原料为向日葵油和橄榄油的生物柴油，在1500 r/min的固定转速下进行试验测试，两种不同原料所合成的B10、B20和B50均在测试试验中表现良好，不仅燃烧充分，发动机性能得到提升，且各项排放物较石油柴油均降低，但原料成本较高。GHORBANI等<sup>[90]</sup>采用了由甲基路线合成的，以向日葵油和大豆油混合而成的混合油为原料的B10进行试验测试，试验结果显示，其 $\text{NO}_x$ 、CO和 $\text{CO}_2$ 排放量较石油柴油均升高。AGARWAL等<sup>[91]</sup>采用了以甲基路线合成的，以米糠油为原料的生物柴油，在额定转速1500 r/min

的工况下进行试验测试，与石油柴油相比工作性能更佳， $\text{NO}_x$ 、碳氢化合物和CO排放量均低于石油柴油。MOHAN等<sup>[92]</sup>采用了以甲基路线合成的，以麻花油为原料的B20，在额定转速1500 r/min的工况下进行试验测试，结果显示，其较石油柴油 $\text{NO}_x$ 排放量减少28%。

### 3.1.2 以不可食用植物油为原料

食用植物油是生产生物柴油的首要 and 主要原料。然而，食用植物油的使用伴随着严重的环境问题，如森林砍伐、重要土壤资源的破坏和大量可耕地的消耗<sup>[93]</sup>。此外，植物油的价格已经大幅上涨，这无疑影响了以食用油为基础的燃料的经济性<sup>[94]</sup>。从食用油中生产生物柴油，实际上是将粮食资源转化为车用燃料，从而使粮食的用途出现分歧。因此，选择食用植物油作为生物柴油的潜在原料，不是一个长期的选择，一种可行的解决方案是从非食用油中生产生物柴油<sup>[95]</sup>。

麻风树及麻风树果有剧毒，为不可食用植物，但是关于将它们作为原料生产生物柴油的研究十分广泛。CHAUHAN等<sup>[96]</sup>对以麻风树油为原料合成的B5、B10、B20、B30和B100进行试验测试，发现其 $\text{NO}_x$ 和 $\text{CO}_2$ 排放量较石油柴油增多，但碳氢化合物、CO以及颗粒物的排放量有所减少。PAUL等<sup>[97]</sup>采用由甲基路线合成的，以麻疯树果为原料的B100，在额定转速1500 r/min工况下进行试验测试，结果表明，其 $\text{NO}_x$ 和 $\text{CO}_2$ 排放量均高于石油柴油，但颗粒物排放量低于石油柴油。TAN Piqiang等<sup>[98]</sup>则采用由乙基路线合成的，以麻疯树果为原料的B25、B50、B75和B100进行试验测试，测试结果显示，其各项有害物排放指标均低于石油柴油，且燃烧充分，性能较好。HULWAN等<sup>[99]</sup>采用甲基路线合成的，以麻风树果为原料的生物柴油进行试验测试，发现其在高负荷工况下，性能较好，燃烧充分，CO排放量低于石油柴油，但是在低负荷工况下，由于油粘度较高，燃烧不充分，性能较差，CO排放量高于石油柴油。SAHOO等<sup>[100]</sup>在研究中发现，与柴油相比，植物生物柴油及其混合物的燃料性能与柴油相当。他们的试验结果表明，酯交换过

程改善了麻风树油在密度、热值、粘度、闪点、浊点和倾点等方面的燃料性能,且麻风树油、卡兰贾油的甲酯具有与石油柴油较接近的燃料性能值。因此,在现有发动机中应用这些燃料(生物柴油及其混合物)不需要对原有发动机进行改装。试验中,在全油门发动机性能测试中,三缸拖拉机发动机使用所有生物柴油混合物,在 1 200 r/min 和 1 400 r/min 低转速工况下,功率没有明显变化。

除麻风树和麻风树果外,还有许多不可食用的植物可以作为生物柴油的生产原料。RAMADHAS 等<sup>[101]</sup>由甲基路线合成的,以橡胶树种子油为原料合成的 B10、B20、B50、B75 和 B100,在固定转速 1 500 r/min 工况下进行试验测试,燃烧都比较充分,碳氢化合物和 CO 排放量都低于石油柴油,但 NO<sub>x</sub> 排放量均高于石油柴油,值得一提的是,由于 B100 含氧量较高,燃烧充分,其 CO<sub>2</sub> 排放量略高于石油柴油。USTA<sup>[102]</sup>采用由甲基路线合成的,以烟草籽油为原料的 B17.5,在 1 500~3 000 r/min 转速工况下进行试验测试,结果显示,NO<sub>x</sub> 排放量较石油柴油高 5%,而在 1 500~2 500 r/min 转速工况下,CO 排放量低于石油柴油。LAHANE 等<sup>[103]</sup>采用由甲基路线合成的,以卡兰贾油为原料的生物柴油,在额定转速 1 500 r/min 工况下进行试验测试,结果表明,其 NO<sub>x</sub> 排放量高于石油柴油,但颗粒物、CO、和碳氢化合物排放量均低于石油柴油。LIN 等<sup>[104]</sup>采用甲基路线合成的,以蓖麻子油为原料的 B100,在固定转速 3 000 r/min 工况下进行试验测试,发现 NO<sub>x</sub> 排放量高于石油柴油。

通过对以上研究分析可知,使用混合非食用生物柴油与石油柴油的效果可以通过确定发动机功率/转矩、制动热效率、制动比油耗和排放量来评估<sup>[105]</sup>。在额定转速下,50%麻风树生物柴油和柴油混合物的功率增幅最大<sup>[100]</sup>。NO<sup>[66]</sup>研究发现,与柴油相比,生物柴油通常会导致氮氧化物排放量增加,而碳氢化合物、CO 和颗粒物排放量减少,还指出,一台未经任何改装的柴油发动机,在 20% 的植物油和 80% 的柴油混合燃料上也能成功运行,并且不会损坏发动机部件。

### 3.2 以动物脂肪为原料

植物油是生产生物柴油的常用原料,但 WAF 也是合适的脂质资源<sup>[65]</sup>。油和脂肪具有相似的化学结构和物理性质,如在非极性有机溶剂中不溶于水,且具有相似的疏水性和溶解度。然而,关于动物脂肪在生物柴油生产方面的研究还没有像植物油那样广泛。动物脂肪中,非常高的脂肪酸含量和脂肪酸的各种成分构成差异是它和油之间的主要区别<sup>[106]</sup>。此外,油在室温下通常为液体,而许多动物脂肪和油脂由于其饱和脂肪酸含量高,往往以固体为主<sup>[107]</sup>。由于许多动物肉类加工公司收集和处埋动物尸体,这些公司能很方便地得到大量的 WAF,因此,从这些非常便宜的原材料中获得生物柴油可能是一个很好的机会。使用 WAF 作为生物柴油生产的原料,除了有助于生物柴油的供应外,还无须对其进行额外处理<sup>[53]</sup>。

已有许多学者对直接使用动物脂肪来生产生物柴油进行了研究。VARUVEL 等<sup>[108]</sup>利用鱼油废料与柴油混合,通过试验验证了 4.5 kW 柴油机的排放性能特性,在提升热制动效率的同时还发现,因为生物柴油含氧量高,燃烧充分且完全,具有良好的燃烧速率,碳氢化合物以及颗粒物排放量也有所降低。WYATT 等<sup>[109]</sup>利用碱催化反式酯化技术研究了生物柴油的制备及牛肉、猪油和鸡脂肪的特性。在洋马 100 单缸直喷式柴油机上,以动物脂肪衍生酯和大豆生物柴油混合的 B20,进行了 NO<sub>x</sub> 排放试验。结果证明,与不使用豆油的燃料相比,这 3 种动物脂肪基燃料的排放水平较低。AGARWAL<sup>[35]</sup>为了计算发动机的燃烧性能,对燃油喷射和喷射压力进行了各种试验,为了验证以动物脂肪为原料的生物柴油与柴油混合的燃料性能和排放特性,并且证明生物柴油可以用作石油柴油的替代燃料,无须对发动机进行任何改装。结果显示,制动热效率可以随着喷射压力的增加而提高。这证明了发动机使用生物柴油时,提高发动机缸内喷射压力可以降低制动比油耗。使用动物脂肪甲酯和混合燃料可以研究柴油机的排放和性能,与石油柴油相比,动物生

物柴油CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>和颗粒物的排放量都有所减少，并且随着喷射压力和燃油喷射时间的增加，CO<sub>2</sub>和碳氢化合物排放量减少，但NO<sub>x</sub>排放量略有增加，热效率因喷射压力的增加而提高。MA Fangrui等<sup>[110]</sup>验证了牛油制备生物柴油时通过酯交换法可以去除1, 2-二(三乙氧基硅基)乙烷和甘油，并且它含有高脂肪酸甲酯，是可以用作发动机燃料的生物柴油。SWAMINATHAN等<sup>[111]</sup>使用鱼油为原料合成的B100在1 500 r/min工况下进行试验，结果表明，该生物柴油的CO排放量较石油柴油大幅减少。PEREIRA等<sup>[112]</sup>以牛油为原料，由乙基路线合成出生物柴油，并在3 600 r/min工况下进行试验，发现纯度较低的生物柴油NO<sub>x</sub>和CO排放量较石油柴油有所增加，而纯度较高时则均低于石油柴油的燃烧排放量。

废弃动物脂肪作为食品垃圾，是更经济的原料选择。GÜRÜ等<sup>[113]</sup>以WAF甲酯为原料对柴油发动机进行了试验。虽然试验中的生物柴油热值较低，但其密度超出传统石油柴油较多，对该生物柴油进行试验后发现，在2 200 r/min和3 000 r/min时，燃油经济性分别增加了3.12%和4.79%。AHMED等<sup>[114]</sup>用WAF甲酯和废弃食用油与柴油混合进行了试验，结果表明，B50具有良好的放热性能，并能降低排放量。ADEWALE等<sup>[115]</sup>详细讲述了用WAF进行酯交换法制备生物柴油的过程和试验结果，结果表明，酯交换法制备动物生物柴油会降低燃料NO<sub>x</sub>排放量，燃料十六烷值高，燃料氧化稳定性好。

### 3.3 以藻类为原料

藻类是微小的水生植物，它利用CO<sub>2</sub>、阳光和水，将其转化为生物质、脂质和氧气。藻类等微生物可以通过非常出色的光合作用将阳光、水和CO<sub>2</sub>转化为更多藻类<sup>[116]</sup>。微藻的种类超过10 000种，大致的微藻分类如图7所示。与其他绿色植物相比，它的生长速度最快。海藻不需要淡水，也不像其他饲料那样需要单独的土地。从藻类中生产脂质

对生物柴油工业的发展起到了促进作用。

藻类能作为生产生物柴油原料的另一个原因是含油量。大多数藻类的含油量在20%~50%之间，有些藻类的含油量高达70%<sup>[116-117]</sup>。在不久的将来，为了解决粮食生产与生物燃料生产之间所产生的分歧，藻类生物质可以发挥重要作用。与其他生物柴油原料相比，种植微藻所需的土地要少得多，并且产油率相当好，这使微藻成为一种很有前景的生物柴油替代原料。

考虑到微藻的CO<sub>2</sub>消耗能力、含油量、没种植土地面积需求等优势，与其他原料相比，微藻及其与石油柴油的混合燃料是一种很有前景的柴油机替代燃料<sup>[118]</sup>。

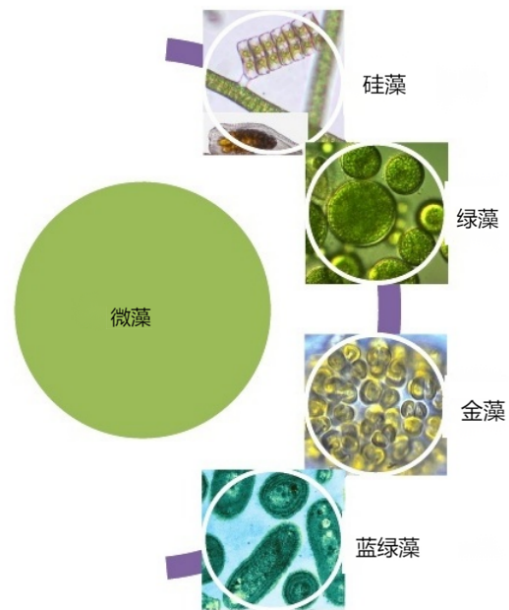


图7 藻类大致分类

藻的种类十分繁杂，因此，对不同种类的藻进行研究是一项长久的工作。TAYARI等<sup>[61]</sup>利用小球藻合成出生物柴油，在柴油机上进行试验测试，发现在工作性能方面有效热效率(Brake Thermal Efficiency, BTE)比石油柴油低15%~20%，有效燃油消耗率(Brake Specific Fuel Consumption, BSFC)比石油柴油高出12%~15%，有效功率(Brake Power, BP)比石油柴油低15%~20%，证明小球藻生物柴油在燃烧工作性能上逊色于石油柴油，但燃油经济

性优于石油柴油；在排放方面，CO 排放量比石油柴油减少 33%~44%，CO<sub>2</sub> 排放量减少 5%~28%，碳氢化合物排放量减少了 40%~50%，但 NO<sub>x</sub> 排放量高于石油柴油 3%~5%。RAJAK 等<sup>[119]</sup> 利用螺旋藻合成出生物柴油并进行试验，在工作性能方面 BTE 比石油柴油低了 3.3%~8%，BSFC 高出 3.3%，BP 低于石油柴油 3.3%~8%；在排放方面，CO、NO<sub>x</sub> 和碳氢化合物排放量比石油柴油低，但 CO<sub>2</sub> 排放量高于石油柴油。KARTHIKEYAN 等<sup>[120]</sup> 利用海藻和褐藻合成出生物柴油，其工作性能与排放性能与石油柴油类似。SUKUMAR 等<sup>[121]</sup> 利用海毒藻通过甲基路线合成出生物柴油，试验测试表明，其在性能方面表现优异，BTE 与 BSFC 均高于石油柴油；在排放方面，CO 排放量高于石油柴油，NO<sub>x</sub> 排放量低于石油柴油。PRABHU 等<sup>[122]</sup> 利用淡水藻合成生物柴油，并在发动机高转速工况下进行试验测试，发现其 BTE 和 BP 低于石油柴油，但 BSFC 高于石油柴油。KARTHIKEYAN 等<sup>[123]</sup> 以葡萄球菌藻油合成出生物柴油，试验测试后发现其性能方面与石油柴油比较相似；在排放方面，CO<sub>2</sub> 排放量比石油柴油略低，而 NO<sub>x</sub> 排放量比石油柴油略高。TSAOUSIS 等<sup>[124]</sup> 利用生藻油合成出生物柴油，经过试验测试后，发现其在性能方面 BTE 和 BP 低于石油柴油，而 BSFC 高于石油柴油；在排放方面，CO 排放量略低于石油柴油，CO<sub>2</sub> 排放量高于石油柴油，但 NO<sub>x</sub> 排放量远低于石油柴油。

### 3.4 以废弃食用油为原料

实现低成本生物柴油生产的一个新颖想法是使用低成本原料，如废弃食用油<sup>[125]</sup>。使用废弃食用油具有很多优点，并且可以防止废弃食用油被排放到排水系统中造成污染<sup>[54]</sup>。使用从餐馆、咖啡馆和家庭厨余收集的废弃食用油生产用于公共交通的燃料已经实现<sup>[126]</sup>。然而，所生产的生物柴油的质量可能会有所不同，因为废弃食用油的物理和化学性质取决于新鲜食用油的含量<sup>[127]</sup>，不同的废弃食用油特性可能会影响生物柴油生产的一致性<sup>[128]</sup>。

PRABU 等<sup>[129]</sup> 在四冲程风冷柴油机，对废弃食用油生物柴油燃料性能进行了试验，试验研究了 B20、B30、B40 和 B100 混合燃料的生物柴油排放。研究表明，在热效率、放热率以及碳氢化合物、CO<sub>2</sub> 和 CO 排放方面，B30 是这些生物柴油混合燃料中的最佳混合燃料。在其他研究中<sup>[130]</sup> 发现，废弃食用油的 B20 和 B5 生物柴油混合燃料具有更好的排放效果，其与石油柴油相比，产生的 CO 和碳氢化合物排放量显著降低。研究发现，废弃食用油生物柴油混合燃料的 B10、B20 和 B30 在内燃机使用过程中<sup>[131]</sup>，当废弃食用油浓度增加时，制动热效率降低，此外，还发现与柴油制动热效率最接近的生物柴油为 B10，且比油耗随生物柴油掺合比例的增加而增加。YILDIZHAN 等<sup>[132]</sup> 在变压缩比发动机上对由废弃食用油制成的生物柴油与石油柴油混合后的混合燃料进行了测试，发现 CO 排放量随着压缩比的增加而减少，且当生物柴油掺混比例增加时，会导致 NO<sub>x</sub> 排放量增加，在 80% 发动机负荷时，B80 的 NO<sub>x</sub> 排放量是最高的<sup>[133]</sup>，同时，NO<sub>x</sub> 排放量最低的是 B20。NO<sub>x</sub> 排放量的不同可能与燃料混合物中的氧含量有关，由于 B80 的含氧量高于 B20，因此，B80 的 NO<sub>x</sub> 排放量高于 B20。VALENTE 等<sup>[134]</sup> 研究了以废弃食用油生物柴油为燃料的柴油发电机组的废气排放。分别对生物柴油 B25、B50 和 B75 的混合燃料进行了测试，发动机负荷从 0~25 kW 逐渐增加。在生物柴油混合燃料试验中，柴油运行的原始发动机设置保持不变。对混合燃料的主要物理化学特性进行了测量，以帮助分析排放结果。结果表明，燃料中添加生物柴油增加了 NO<sub>x</sub>、CO 和碳氢化合物的排放量。CO<sub>2</sub> 和颗粒物排放量也随着生物柴油的使用而增加。低负荷时 NO<sub>x</sub> 增加较多，高负荷时 CO 和碳氢化合物排放量增加较多。测试 B50 生物柴油时，CO<sub>2</sub>、CO、碳氢化合物和 NO<sub>x</sub> 排放量在整个负荷范围内的平均增幅分别为 8.5%、20.1%、23.5% 和 4.8%。ULUSOY 等<sup>[135]</sup> 在四冲程直喷式柴油机上试验了废弃食用油生物柴油，得到了颗粒物排放量和 NO<sub>x</sub> 排放量更高

的结果，但CO和碳氢化合物排放量较低。MADHESHIYA等<sup>[136]</sup>分析了废弃食用油和芥菜油混合油作为生物柴油原料的生物柴油，发现其CO和颗粒物排放量低于柴油，但NO<sub>x</sub>排放量高于柴油。各种原料生产的生物柴油排放情况汇总见表4。

通过比较测试燃料的制动热效率和有效燃油消耗率，比较生物柴油和基准矿物柴油的性能特征。由于与传统石油柴油相比，生物柴油的热值略低且密度较高，所以通常生物柴油和混合物的有效燃油消耗率高于矿物柴油，在表5中进行了总结。

表4 生物柴油排放汇总

原料（默认为甲基合成路线）	作者	排放（与传统石油柴油比较）				
		NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	碳氢化合物	颗粒物
杏仁、棕榈	ABU-HAMDEH等 <sup>[76]</sup>	下降	下降		下降	下降
棉籽	NABI等 <sup>[88]</sup>	增加（10%，B30）	下降（24%，B30）			下降（24，B20）
大豆	QI Donghui等 <sup>[80]</sup>	增加	下降			
椰子、棕榈	KARAVLAKIS等 <sup>[77]</sup>	增加	下降（B40，47%）	增加		下降（B20，B40）
棕榈	NG等 <sup>[78]</sup>	下降			下降	下降
玉米	GODIGANUR等 <sup>[81]</sup>	增加	下降		下降	
玉米（乙基）	PUHAN等 <sup>[82]</sup>	下降	下降	增加	下降	下降
大豆	ARMAS等 <sup>[83]</sup>	下降	下降		下降	增加
玉米	RAHEMAN等 <sup>[84]</sup>	增加	下降			
米糠		增加				
大豆（84%）、棕榈（16%）	SERRANO等 <sup>[85]</sup>	增加（B7，5%）； 下降（B20，20%）				
菜籽	MAKARVICIENE等 <sup>[86]</sup>		下降			
向日葵	KALLIGEROS等 <sup>[89]</sup>		下降			
橄榄			下降			
向日葵、大豆	GHORBANI等 <sup>[90]</sup>	增加	增加	增加		
棕榈、棉籽、凤尾鱼	ALTUN <sup>[79]</sup>	增加	下降		增加	
菜籽	BUYUKKAYA <sup>[87]</sup>		下降（B5，5%； B100，35%）			
米糠	AGARWALA等 <sup>[91]</sup>	下降	下降		下降	
麻花	MOHAN等 <sup>[92]</sup>	下降（28%）				
麻风树果	CHAUHAN等 <sup>[96]</sup>	增加	下降	增加	下降	下降
橡胶树种子	RAMADHAS等 <sup>[101]</sup>	增加	下降	增加（B100）	下降	
烟草籽	USTA <sup>[102]</sup>	增加（5%）	下降			
卡兰贾	LAHANE等 <sup>[103]</sup>	增加	下降		下降	下降
麻风树果	PAUL等 <sup>[97]</sup>	增加		增加		下降

续表

原料 (默认为甲基合成路线)	作者	排放 (与传统石油柴油比较)				
		NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	碳氢化合物	颗粒物
麻风树果 (乙基)	TAN Piqiang 等 <sup>[98]</sup>		下降			
麻风树果	HULWAN 等 <sup>[99]</sup>			下降 (高负荷工况); 增加 (低负荷工况)		
蓖麻子	LIN 等 <sup>[104]</sup>	增加				
	NO <sup>[66]</sup>	增加	下降		下降	下降
鱼油	VARUVEL 等 <sup>[108]</sup>		下降	下降		
动物脂肪	GÜRÜ 等 <sup>[113]</sup>					
牛油、猪油、鸡油 (与牛油、猪油、鸡油所制备的生物柴油和大豆生物柴油相混合的生物柴油对比)	WYATT 等 <sup>[109]</sup>	下降				
动物脂肪	AGARWAL 等 <sup>[35]</sup>		下降		增加	下降
动物脂肪 动物脂肪、废弃食用油	AHMED 等 <sup>[114]</sup>		下降		增加	
牛油	MA Fangrui 等 <sup>[110]</sup>					
废弃动物脂肪	ADEWALE 等 <sup>[115]</sup>	下降				
鱼油	SWAMINATHAN 等 <sup>[111]</sup>		明显下降			
牛油 (乙基)	PEREIRA 等 <sup>[112]</sup>	增加 (纯度较低); 下降 (纯度较高)	增加 (纯度较低); 下降 (纯度较高)			
小球藻	TAYARI 等 <sup>[61]</sup>	增加 (3%~5%)	下降 (33%~44%)	下降 (5%~28%)	下降 (40%~50%)	
螺旋藻	RAJAK 等 <sup>[119]</sup>	下降	下降	增加	下降	
海藻、褐藻	KARTHIKEYAN 等 <sup>[120]</sup>			相似		
藻类	SUKUMAR 等 <sup>[121]</sup>	下降	增加			
淡水藻	PRABHU 等 <sup>[122]</sup>					
葡萄球菌藻	KARTHIKEYAN 等 <sup>[123]</sup>	增加		下降		
生藻	TSAOUSIS 等 <sup>[124]</sup>	明显下降	下降	增加		
废弃食用油	PRABU 等 <sup>[129]</sup>		下降 (B30)	下降 (B30)	下降 (B30)	
废弃食用油	ADAILEH 等 <sup>[130]</sup>		下降		下降	
废弃食用油	PATEL 等 <sup>[131]</sup>					
废弃食用油	YILDIZHAN 等 <sup>[132]</sup>	增加	增加			
废弃食用油	VALENTE 等 <sup>[134]</sup>		增加			
废弃食用油	ULUSOY 等 <sup>[135]</sup>	增加	下降		下降	增加

续表

原料（默认为甲基合成路线）	作者	排放（与传统石油柴油比较）				
		NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	碳氢化合物	颗粒物
废弃食用油、芥菜油	MADHESHIYA等 <sup>[136]</sup>	增加	下降			下降

表5 生物柴油性能汇总

原料（默认为甲基合成路线）	作者	性能（与传统石油柴油比较）	
		制动热效率	有效燃油消耗率
废弃食用油、油菜籽、玉米生物柴油混合石油柴油	TESFA等 <sup>[137]</sup>	下降	增加
菜籽油B10、B20和B30	YOON等 <sup>[138]</sup>	下降	增加
棉籽油B25、B50、B75和B100	SATHIYAGNANAM等 <sup>[139]</sup>	增加	增加
菜籽油生物柴油+乙醇混合石油柴油	LABECKAS等 <sup>[140]</sup>	无变化	增加
棕榈+麻风树B10	NALGUNDWAR等 <sup>[141]</sup>	增加	下降
椰子B5和B15	LIAQUAT等 <sup>[142]</sup>	下降	增加
辣木B10和乔木B25混合	RAJARAMAN等 <sup>[143]</sup>	略有下降	增加
辣木B10和乔木B20混合	MOFIJUR等 <sup>[144]</sup>	下降	增加
辣木B10	RAHMAN等 <sup>[145]</sup>	无变化	增加
辣木B5和乔木B10混合	MOFIJUR等 <sup>[146]</sup>	下降	增加
废弃食用油B20、B40、B80和B100	GOPAL等 <sup>[147]</sup>	下降	增加
水黄皮生物柴油	LIN等 <sup>[148]</sup>	下降	增加
大豆生物柴油	AL等 <sup>[149]</sup>	下降	增加
棉籽生物柴油	GAUTAM等 <sup>[150]</sup>	下降	增加

根据上述研究结果可知，当固定式发动机使用生物柴油-柴油混合物，且发动机承受较大负荷时，大气污染物的排放量通常会增加<sup>[151]</sup>。然而，在某些情况下，当混合物中的生物柴油浓度保持不变时，排放物会减少<sup>[152]</sup>。大多数研究表明，由甲基路线生产的生物柴油，其颗粒物、碳氢化合物和CO的排放量会减少。在对由乙基路线生产的生物柴油的试验中也观察到同样的情况。就CO排放而言，以菜籽油、麻风树、废弃食用油、大豆油和葵花籽油为原料合成的生物柴油在试验过程中的排放量减少了。另一方面，用凤尾鱼、菜籽油、棕榈油、棉籽油和废弃食用油制备的生物柴油的碳氢化合物排放量增加，而用废弃食用油和大豆油制备的生物柴油的颗粒物排放量增加。

此外，与使用柴油相比，由废弃食用油和菜籽油制成的生物柴油可以显示出CO、碳氢化合物和

颗粒物排放量的增加或减少。关于CO<sub>2</sub>排放，所有对由乙基路线生产的生物柴油的研究都表明其排放量增加，而对于甲基路线生产的生物柴油，大部分的研究发现其排放量增加，少部分的研究发现其排放量减少。这是因为乙醇具有较大的化学结构，它具有更多的碳原子。此外，XUE Jinlin<sup>[153]</sup>的研究证实了生物柴油的CO<sub>2</sub>排放量比柴油高，这是由于生物柴油结构中存在氧气，从而使燃料能完全燃烧。然而，当生物柴油来自可再生能源并且在分析中考虑整个生命周期时，CO<sub>2</sub>排放量可以显著减少。

其中一项研究还分析了NO<sub>x</sub>的排放情况<sup>[153]</sup>，它是造成酸雨的重要污染物，对人体健康、结构和水源造成严重的负面影响。当使用甲基路线的生物柴油-柴油混合物时，大多数的研究呈现出更大的值。同时，当采用杏仁、棕榈、麻风树、印度麻花、废弃油、菜籽、米糠、大豆、橄榄和葵花籽油等原料时，NO<sub>x</sub>的排放量降低了。对于乙基路线的

生物柴油, 其中一半的生物柴油减少了氮氧化物排放量。根据相关文献<sup>[153-154]</sup>可知, 氮氧化物排放与燃烧温度之间存在相关性, 其中温度与发动机负荷直接相关。因此, 发动机负荷的增加会导致污染物排放量的增加。在本文提到的研究中, 当发动机负荷增加时, 氮氧化物 $\text{NO}_x$ 排放量会增加, 只有少数几个研究得到了 $\text{NO}_x$ 排放量减少的结果, 其余的研究没有评估这一参数。此外, 根据 XUE Jinlin<sup>[153]</sup>的研究可以发现, 混合燃料中生物柴油的比例也会影响氮氧化物的排放。

考虑到本文分析的原料, 使用大豆油生产生物柴油的废气中颗粒物、CO、碳氢化合物和 $\text{CO}_2$ 的浓度较低。当燃烧温度和混合燃料中生物柴油的比例增加时, 颗粒物排放浓度会出现例外<sup>[155]</sup>。与大豆油生物柴油相比, 棕榈油生物柴油的颗粒物、CO和碳氢化合物排放量相似。然而, 混合燃料中生物柴油浓度较低以及发动机负载或转速较高时, 颗粒物排放浓度较高。只有当混合燃料中生物柴油的比例较低时, 碳氢化合物的浓度才会增加。对于 $\text{NO}_x$ 排放, 大多数研究发现, 在使用B20混合燃料时减少, 以及在发动机负荷或转速增加和/或降低时减少<sup>[155]</sup>。对于废弃食用油, 使用B50和增加发动机曲轴的角速度会导致 $\text{CO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 浓度更高, 碳氢化合物和颗粒物浓度更低。当发动机负荷增加时, 混合物会导致CO、碳氢化合物(B10-B50混合物)和 $\text{NO}_x$ (预热生物柴油)的减少, 并且发现在使用预热生物柴油的情况下, CO浓度变得更高<sup>[156]</sup>。根据 XUE Jinlin<sup>[153]</sup>的研究可知, 将该生物柴油与柴油混合使用可以降低颗粒物、碳氢化合物和CO的排放量, 但 $\text{NO}_x$ 的浓度较高。

最后, 由以上研究可知, 用微藻生产的生物柴油混合物可以用作任何类型的发动机的燃料。大部分研究都是在Kirlosker发动机上进行的。结果表明, 几乎所有发动机的制动功率都得到了提高, 仅少数研究观察到制动功率下降。由于制动比油耗和制动热效率取决于制动功率, 随着制动功率的增加, 其他参数也随之增加。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

生物柴油作为燃料可广泛用于交通领域和航空领域, 目前, 美国、欧洲等国家和地区已经基本实现强制添加生物柴油, 我国生物柴油目前尚未进入国有成品油体系, 主要用于民用砂船、挖掘机动力等。由于生物柴油制备工艺的不断迭代, 相同原料的生物柴油由于制备工艺的不同被分为不同种类, 不利于对生物柴油的使用特性进行归纳整理。本文详细介绍了不同原料制成的生物柴油的使用特性, 详细综述了以植物油、动物油、藻类和废弃食用油作为原料所制成的生物柴油的研究现状。首先, 详细介绍了生物柴油的理化性质以及现有的几种生物柴油制备工艺, 并区别于以制取生物柴油的技术迭代为基础, 按照原料来源不同对生物柴油进行分类, 通过将由不同原料制成的不同浓度生物柴油在内燃机上应用时的性能和排放, 与传统石油柴油进行对比, 直观地体现出不同生物柴油的应用优势, 为生物柴油原料选用提供了帮助; 然后, 分别对不同种类原料制备而成的生物柴油使用特性等相关研究, 按照分类进行归纳整理, 以表格的方式直观呈现; 最后针对目前不同种类生物柴油在使用过程中的局限性以及不足之处, 提出未来生物柴油使用特性优化的方向。

### 4.2 展望

(1) 以可食用农作物为原料制备生物柴油虽然制备工艺较完善, 但是会引发食品生产和生物柴油生产的竞争, 降低粮食产量。在后续生物柴油发展进程中, 应避免这种竞争发生, 可以尝试使用转基因<sup>[157]</sup>的方法培育出专为生产生物柴油的作物, 从而避免粮食危机, 增加产量。

(2) 以不可食用植物提取油脂为原料制备生物柴油虽然优点很多, 原料来源种类丰富, 但是原料提取比较困难, 且没有类似于可食用农作物制备生物柴油那样完备的工艺流程。应挑选适宜在荒地种植生长, 且生长周期较短的植物品种, 利用荒地种植, 并在之后发展其生产工艺水平。

(3) 动物脂肪可以作为成本低廉的原料制作生物柴油，但是其缺点也十分明显，大量的饱和脂肪酸会提高其酯交换反应的难度。如果能有一种低成本的催化剂来降低其酯交换反应的难度，那么动物脂肪在生物柴油生产方面的潜力将大大提高。

(4) 藻类也是非常优秀的生物柴油生产原料，其碳循环的周期较短，十分适合人工养殖，并作为生产原料，可以在沿海或沿河等环境中大规模养殖。

(5) 废弃食用油的来源十分广泛，但是难以收集，并且废弃食用油的成分大多数情况下都难以统一，这为后续的酯交换反应增加了难度。可以对城市中收集到的废弃食用油进行预处理，使其脂肪酸含量达到某一便于进行酯交换反应的标准，再进行生物柴油的生产。

(6) 大多数生物柴油在应用时虽然不需要对内燃机进行额外改装，但是其性能和排放表现并不出色，这一点通过与石油柴油进行混合可得到改善。如果能得到不同种类生物柴油在内燃机上应用的最

佳配比，将对提高燃料性能，减少发动机排放做出巨大贡献。

(7) 当生物柴油用作车用燃料时， $\text{NO}_x$ 的排放量与石油柴油相比略有增加。如何降低使用过程中发动机 $\text{NO}_x$ 的排放量将是未来工作的重点。在发动机排气管处增添 $\text{NO}_x$ 捕捉装置或采用废气循环燃烧等方式，是有效降低 $\text{NO}_x$ 排放量的措施。

(8) 燃料添加剂是一种不可或缺的工具，不仅可以减少燃料的缺点，还可以帮助生产符合国际和地区标准的特定燃料。在生物柴油中添加燃料添加剂可以改善燃料质量、燃烧和传热率，提高燃料混合物稳定性、燃料经济性和排放性能。为了达到国际标准，生物柴油中加入了许多类型的添加剂，如抗氧化剂、十六烷值改进剂、润滑剂、缓蚀剂、冷流改进剂和纳米颗粒等<sup>[158]</sup>。针对生物柴油低温流动性差以及生物柴油氧化稳定性可能较差的缺点，提出一种生物柴油添加剂，这种添加剂不仅能加强生物柴油的低温流动性，还有很强的结合氧的能力。

## 参考文献 (References)

- [1] 张萌, 贾文川. 微藻制备生物柴油技术综述[J]. 当代化工, 2018, 47(4): 827-830.  
ZHANG Meng, JIA Wenchuan. A Review of Microalgae Biodiesel Preparation Technology [J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(4): 827-830. (in Chinese)
- [2] ARO E M. From First Generation Biofuels to Advanced Solar Biofuels[J]. *Ambio*, 2016, 45(S1): 24-31.
- [3] ORCHARD B, DENIS J, COUSINS J. Developments in Biofuel Processing Technologies[J]. *World Pumps*, 2007, 2007(487): 24-28.
- [4] ABDULLAH A Z, SALAMATINIA B, MOOTABADI H, et al. Current Status and Policies on Biodiesel Industry in Malaysia as the World's Leading Producer of Palm Oil [J]. *Energy Policy*, 2009, 37(12): 5440-5448.
- [5] MÁRCIO DE ALMEIDA D, DA SILVA M A V, FRANCA L S, et al. Comparative Study of Emissions from Stationary Engines Using Biodiesel Made from Soybean Oil, Palm Oil and Waste Frying Oil [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70: 1376-1392.
- [6] AJANOVIC A. Biofuels Versus Food Production: Does Biofuels Production Increase Food Prices? [J]. *Energy*, 2011, 36(4): 2070-2076.
- [7] RAZON L F, TAN R R. Net Energy Analysis of the Production of Biodiesel and Biogas from the Microalgae: *Haematococcus Pluvialis* and *Nannochloropsis* [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(10): 3507-3514.
- [8] MACEIRAS R, RODRI M, CANCELA A, et al. Macroalgae: Raw Material for Biodiesel Production [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(10): 3318-3323.
- [9] CHEN Huihui, ZHOU Dong, LUO Gang, et al. Macroalgae for Biofuels Production: Progress and Perspectives [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 47: 427-437.
- [10] PETRY B R, RIAL R C, FREITAS O N, et al. Macroalgae *Fucus Vesiculosus* Oil: Biodiesel Production Using Alkaline Transesterification [J]. *Química Nova*, 2021, 44: 410-414.
- [11] KNIGHT M, PARKE M. A Biological Study of *Fucus Vesiculosus* L. and *F. Serratus* L. [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1950, 29(2): 439-514.
- [12] TAT M E, VAN GERPEN J H, SOYLU S, et al. The Speed of Sound and Isentropic Bulk Modulus of Biodiesel at 21°C from Atmospheric Pressure to 35 MPa [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2000, 77(3): 285-289.

- [13] MARTÍNEZ G, SÁNCHEZ N, ENCINAR J, et al. Fuel Properties of Biodiesel from Vegetable Oils and Oil Mixtures. Influence of Methyl Esters Distribution [J]. Biomass Bioenergy, 2014, 63: 22–32.
- [14] GIAKOUMIS E G. A Statistical Investigation of Biodiesel Physical and Chemical Properties, and Their Correlation with the Degree of Unsaturation [J]. Renewable Energy, 2013, 50: 858–878.
- [15] MEHER L C, KULKARNI M G, DALAI A K, et al. Transesterification of Karanja (Pongamia Pinnata) Oil by Solid Basic Catalysts [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2006, 108(5): 389–397.
- [16] VERDUZCO L F R. Density and Viscosity of Biodiesel as a Function of Temperature: Empirical Models [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19: 652–665.
- [17] YOON S H, PARK S H, LEE C S. Experimental Investigation on the Fuel Properties of Biodiesel and Its Blends at Various Temperatures [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(1): 652–656.
- [18] TATE R E, WATTS K C, ALLEN C A W, et al. The Densities of Three Biodiesel Fuels at Temperatures up to 300 C [J]. Fuel, 2006, 85(7–8): 1004–1009.
- [19] AGARWAL A K, DHAR A, GUPTA J G, et al. Effect of Fuel Injection Pressure and Injection Timing on Spray Characteristics and Particulate Size-Number Distribution in a Biodiesel Fuelled Common Rail Direct Injection Diesel Engine [J]. Applied Energy, 2014, 130: 212–221.
- [20] FREITAS S V D, SEGOVIA J J, MARTÍN M C, et al. Measurement and Prediction of High-Pressure Viscosities of Biodiesel Fuels [J]. Fuel, 2014, 122: 223–228.
- [21] SHAHABUDDIN M, KALAM M A, MASJUKI H H, et al. An Experimental Investigation into Biodiesel Stability by Means of Oxidation and Property Determination [J]. Energy, 2012, 44(1): 616–622.
- [22] BARABÁS I. Predicting the Temperature Dependent Density of Biodiesel-Diesel-Bioethanol Blends [J]. Fuel, 2013, 109: 563–574.
- [23] EJIM C E, FLECK B A, AMIRFAZLI A. Analytical Study for Atomization of Biodiesels and Their Blends in a Typical Injector: Surface Tension and Viscosity Effects [J]. Fuel, 2007, 86(10–11): 1534–1544.
- [24] AHMED M A, EJIM C E, FLECK B A, et al. Effect of Biodiesel Fuel Properties and Its Blends on Atomization [C]//SAE Technical Papers, 2006–01–0893, 2006.
- [25] SHU Qing, WANG Jinfu, PENG Baoxiang, et al. Predicting the Surface Tension of Biodiesel Fuels by a Mixture Topological Index Method, at 313 K [J]. Fuel, 2008, 87(17–18): 3586–3590.
- [26] PRATAS M J, FREITAS S, OLIVEIRA M B, et al. Densities and Viscosities of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2010, 55(9): 3983–3990.
- [27] DAVANLOU A, LEE J D, BASU S, et al. Effect of Viscosity and Surface Tension on Breakup and Coalescence of Bicomponent Sprays [J]. Chemical Engineering Science, 2015, 131: 243–255.
- [28] SRIVASTAVA A, PRASAD R. Triglycerides-Based Diesel Fuels [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2000, 4(2): 111–133.
- [29] MEJÍA J D, SALGADO N, ORREGO C E. Effect of Blends of Diesel and Palm-Castor Biodiesels on Viscosity, Cloud Point and Flash Point [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 43: 791–797.
- [30] SORIANO JR N U, MIGO V P, MATSUMURA M. Ozonized Vegetable Oil as Pour Point Depressant for Neat Biodiesel [J]. Fuel, 2006, 85(1): 25–31.
- [31] SARIN A, ARORA R, SINGH N P, et al. Effect of Blends of Palm-Jatropha-Pongamia Biodiesels on Cloud Point and Pour Point [J]. Energy, 2009, 34(11): 2016–2021.
- [32] GRABOSKI M S, MCCORMICK R L. Combustion of Fat and Vegetable Oil Derived Fuels in Diesel Engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(2): 125–164.
- [33] GRABOSKI M S, MCCORMICK R L, ALLEMAN T L, et al. The Effect of Biodiesel Composition on Engine Emissions from a DDC Series 60 Diesel Engine [R]. National Renewable Energy Laboratory, Report No: NREL/SR-510-31461, 2003.
- [34] BECHTOLD R L. Alternative Fuels: Transportation Fuels for Today and Tomorrow [Z]. SAE International, 2002.
- [35] AGARWAL A K. Biofuels (Alcohols and Biodiesel) Applications as Fuels for Internal Combustion Engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, 33(3): 233–271.
- [36] LEE C S, PARK S W, KWON S I. An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-Blended Fuels [J]. Energy & Fuels, 2005, 19(5): 2201–2208.
- [37] GÜLÜM M, BILGIN A. Density, Flash Point and Heating Value Variations of Corn Oil Biodiesel-Diesel Fuel Blends [J]. Fuel Processing Technology, 2015, 134: 456–464.
- [38] RAMÍREZ-VERDUZCO L F, RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ J E, DEL RAYO JARAMILLO-JACOB A.

- Predicting Cetane Number, Kinematic Viscosity, Density and Higher Heating Value of Biodiesel from Its Fatty Acid Methyl Ester Composition [J]. *Fuel*, 2012, 91 (1) : 102–111.
- [39] LAPUERTA M, ARMAS O, RODRIGUEZ-FERNANDEZ J. Effect of Biodiesel Fuels on Diesel Engine Emissions [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, 34 (2) : 198–223.
- [40] KNOTHE G, MATHEAUS A C, RYAN III T W. Cetane Numbers of Branched and Straight-Chain Fatty Esters Determined in an Ignition Quality Tester [J]. *Fuel*, 2003, 82(8) : 971–975.
- [41] LOPES S M, FUREY R, GENG P. Calculation of Heating Value for Diesel Fuels Containing Biodiesel [J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2013, 6 (2) : 407–418.
- [42] SHEHATA M S, ATTIA A M A, RAZEK S M A. Corn and Soybean Biodiesel Blends as Alternative Fuels for Diesel Engine at Different Injection Pressures [J]. *Fuel*, 2015, 161 : 49–58.
- [43] RATHORE V, TYAGI S, NEWALKAR B, et al. Jatropa and Karanja Oil Derived DMC-Biodiesel Synthesis: A Kinetics Study [J]. *Fuel*, 2015, 140 : 597–608.
- [44] ALI O M, MAMAT R, ABDULLAH N R, et al. Analysis of Blended Fuel Properties and Engine Performance with Palm Biodiesel-Diesel Blended Fuel [J]. *Renewable Energy*, 2016, 86 : 59–67.
- [45] MERLIN A Z, MARCEL O A, MAX A O L, et al. Development and Experimental Investigation of a Biodiesel from a Nonedible Woody Plant: The Neem [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52 : 201–208.
- [46] AGARWAL A K, DHAR A, GUPTA J G, et al. Effect of Fuel Injection Pressure and Injection Timing of Karanja Biodiesel Blends on Fuel Spray, Engine Performance, Emissions and Combustion Characteristics [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 91 : 302–314.
- [47] GOODRUM J W, GELLER D P. Influence of Fatty Acid Methyl Esters from Hydroxylated Vegetable Oils on Diesel Fuel Lubricity [J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(7) : 851–855.
- [48] KINAST J A. Production of Biodiesels from Multiple Feedstocks and Properties of Biodiesels and Biodiesel/Diesel Blends: Final Report; Report 1 in a Series of 6 [R]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2003.
- [49] KOO J Y, MARTIN J K. Droplet Sizes and Velocities in a Transient Diesel Fuel Spray [C]//SAE Technical Papers, 900397, 1990.
- [50] KNOTHE G. Improving Biodiesel Fuel Properties by Modifying Fatty Ester Composition [J]. *Energy & Environmental Science*, 2009, 2(7) : 759–766.
- [51] AGARWAL A K, PARK S, DHAR A, et al. Review of Experimental and Computational Studies on Spray, Combustion, Performance, and Emission Characteristics of Biodiesel Fueled Engines [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2018, 140 (12) : 120801.1–120801.30.
- [52] VYAS A P, VERMA J L, SUBRAHMANYAM N. A Review on FAME Production Processes [J]. *Fuel*, 2010, 89(1) : 1–9.
- [53] JANAUN J, ELLIS N. Perspectives on Biodiesel as a Sustainable Fuel [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(4) : 1312–1320.
- [54] SIDDIQUEE M N, ROHANI S. Lipid Extraction and Biodiesel Production from Municipal Sewage Sludges: A Review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(2) : 1067–1072.
- [55] ABBASZADEH A, GHOBADIAN B, OMIDKHAH M R, et al. Current Biodiesel Production Technologies: A Comparative Review [J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 63 : 138–148.
- [56] MA Fangrui, HANNA M A. Biodiesel Production: A Review [J]. *Bioresource Technology*, 1999, 70(1) : 1–15.
- [57] MOHAN D, PITTMAN JR C U, STEELE P H. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-Oil: A Critical Review [J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(3) : 848–889.
- [58] FRENCH R, CZERNIK S. Catalytic Pyrolysis of Biomass for Biofuels Production [J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(1) : 25–32.
- [59] SINGH S P, SINGH D. Biodiesel Production Through the Use of Different Sources and Characterization of Oils and Their Esters as the Substitute of Diesel: A Review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14 (1) : 200–216.
- [60] ITO T, SAKURAI Y, KAKUTA Y, et al. Biodiesel Production from Waste Animal Fats Using Pyrolysis Method [J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 94 (1) : 47–52.
- [61] TAYARI S, ABEDI R, ABEDI A. Investigation on Physicochemical Properties of Wastewater Grown Microalgae Methyl Ester and Its Effects on CI Engine [J]. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, 24 (1) : 72–87.

- [62] LIN Lin, ZHOU Cunshan, VITTAYAPADUNG S, et al. Opportunities and Challenges for Biodiesel Fuel [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(4): 1020–1031.
- [63] TALEBIAN-KIAKALAEH A, AMIN N A S, MAZAHERI H. A Review on Novel Processes of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil [J]. *Applied Energy*, 2013, 104: 683–710.
- [64] LIM S, TEONG L K. Recent Trends, Opportunities and Challenges of Biodiesel in Malaysia: An Overview [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(3): 938–954.
- [65] MORAES M S A, KRAUSE L C, DA CUNHA M E, et al. Tallow Biodiesel: Properties Evaluation and Consumption Tests in a Diesel Engine [J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(3): 1949–1954.
- [66] NO S Y. Inedible Vegetable Oils and Their Derivatives for Alternative Diesel Fuels in CI Engines: A Review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 131–149.
- [67] AHMAD A L, YASIN N H M, DEREK C J C, et al. Microalgae as a Sustainable Energy Source for Biodiesel Production: A Review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 584–593.
- [68] URRÉJOLA S, MACEIRAS R, PÉREZ B L, et al. Analysis of Macroalgae Oil Transesterification for Biodiesel Production [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2012, 29: 1153–1158.
- [69] BHUIYA M M K, RASUL M G, KHAN M M K, et al. Second Generation Biodiesel: Potential Alternative to Edible Oil-Derived Biodiesel [J]. *Energy Procedia*, 2014, 61: 1969–1972.
- [70] NREL. Biodiesel Handling and Use Guide: Fourth Edition (Revised) [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2008: 1–56.
- [71] 中商产业研究院. 2023 年全球及中国生物柴油市场现状及竞争格局预测分析(图) [EB/OL]. (2023-06-14). <https://www.askci.com/news/chanye/20230614/103009268670980970866216.shtml>.  
China Business Industry Research Institute. Forecast and Analysis of the Current Situation and Competitive Landscape of the Global and Chinese Biodiesel Market in 2023 [EB/OL]. (2023-06-14). <https://www.askci.com/news/chanye/20230614/103009268670980970866216.shtml>. (in Chinese).
- [72] SILITONGA A S, MASJUKI H H, MAHLIA T M I, et al. Overview Properties of Biodiesel Diesel Blends from Edible and Non-Edible Feedstock [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22: 346–360.
- [73] BANKOVIĆ-ILIĆ I B, STOJKOVIĆ I J, STAMENKOVIĆ O S, et al. Waste Animal Fats as Feedstocks for Biodiesel Production [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 32: 238–254.
- [74] DIESEL E. Diesel: der Mensch, das Werk, das Schicksal [M]. Hamburg: Hamburg Wilhelm Heyne Verlag, 1983.
- [75] DIESEL E. Diesel: Man, Work, Fate [M]. Hamburg: Hamburg Wilhelm Heyne Verlag, 1983. (in German)
- [76] BRUWER J J, BOSHOFF B V D, HUGO F J C, et al. Sunflower Seed Oil as an Extender for Diesel Fuel in Agricultural Tractors [Z]. 1980.
- [77] ABU-HAMDEH N H, ALNEFAIE K A. A Comparative Study of Almond and Palm Oils as Two Bio-Diesel Fuels for Diesel Engine in Terms of Emissions and Performance [J]. *Fuel*, 2015, 150: 318–324.
- [78] KARAVALAKIS G, ALVANOU F, STOURNAS S, et al. Regulated and Unregulated Emissions of a Light Duty Vehicle Operated on Diesel/Palm-Based Methyl Ester Blends over NEDC and a Non-Legislated Driving Cycle [J]. *Fuel*, 2009, 88(6): 1078–1085.
- [79] NG J H, NG H K, GAN S. Characterisation of Engine-Out Responses from a Light-Duty Diesel Engine Fuelled with Palm Methyl Ester (PME) [J]. *Applied Energy*, 2012, 90(1): 58–67.
- [80] ALTUN Ş. Effect of the Degree of Unsaturation of Biodiesel Fuels on the Exhaust Emissions of a Diesel Power Generator [J]. *Fuel*, 2014, 117: 450–457.
- [81] QI Donghui, CHEN Hao, GENG Liming, et al. Experimental Studies on the Combustion Characteristics and Performance of a Direct Injection Engine Fueled with Biodiesel/Diesel Blends [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(12): 2985–2992.
- [82] GODIGANUR S, MURTHY C H S, REDDY R P. 6BTA 5.9 G2-1 Cummins Engine Performance and Emission Tests Using Methyl Ester Mahua (Madhuca Indica) Oil/Diesel Blends [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(10): 2172–2177.
- [83] PUHAN S, VEDARAMAN N, SANKARANARAYANAN G, et al. Performance and Emission Study of Mahua Oil (Madhuca Indica Oil) Ethyl Ester in a 4-Stroke Natural Aspirated Direct Injection Diesel Engine [J]. *Renewable Energy*, 2005, 30(8): 1269–1278.
- [84] ARMAS O, YEHLIU K, BOEHMAN A L. Effect of Alternative Fuels on Exhaust Emissions During Diesel Engine Operation with Matched Combustion Phasing [J]. *Fuel*, 2010, 89(2): 438–456.

- [84] RAHEMAN H, GHADGE S V. Performance of Compression Ignition Engine with Mahua (*Madhuca Indica*) Biodiesel[J]. *Fuel*, 2007, 86(16): 2568–2573.
- [85] SERRANO L, LOPES M, PIRES N, et al. Evaluation on Effects of Using Low Biodiesel Blends in a EURO 5 Passenger Vehicle Equipped with a Common-Rail Diesel Engine[J]. *Applied Energy*, 2015, 146: 230–238.
- [86] MAKAREVICIENE V, JANULIS P. Environmental Effect of Rapeseed Oil Ethyl Ester[J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(15): 2395–2403.
- [87] BUYUKKAYA E. Effects of Biodiesel on a DI Diesel Engine Performance, Emission and Combustion Characteristics[J]. *Fuel*, 2010, 89(10): 3099–3105.
- [88] NABI M N, RAHMAN M M, AKHTER M S. Biodiesel from Cotton Seed Oil and Its Effect on Engine Performance and Exhaust Emissions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(11–12): 2265–2270.
- [89] 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.
- [90] GHORBANI A, BAZOOYAR B, SHARIATI A, et al. A Comparative Study of Combustion Performance and Emission of Biodiesel Blends and Diesel in an Experimental Boiler[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4725–4732.
- [91] AGARWAL D, SINHA S, AGARWAL A K. Experimental Investigation of Control of NO<sub>x</sub> Emissions in Biodiesel-Fueled Compression Ignition Engine [J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(14): 2356–2369.
- [92] MOHAN B, YANG W, RAMAN V, et al. Optimization of Biodiesel Fueled Engine to Meet Emission Standards Through Varying Nozzle Opening Pressure and Static Injection Timing[J]. *Applied Energy*, 2014, 130: 450–457.
- [93] BANKOVIĆ-ILIĆ I B, STAMENKOVIĆ O S, VELJKOVIĆ V B. Biodiesel Production from Non-Edible Plant Oils[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(6): 3621–3647.
- [94] GUI M M, LEE K T, BHATIA S. Feasibility of Edible Oil vs. Non-Edible Oil vs. Waste Edible Oil as Biodiesel Feedstock[J]. *Energy*, 2008, 33(11): 1646–1653.
- [95] SAJJADI B, RAMAN A A A, ARANDIYAN H. A Comprehensive Review on Properties of Edible and Non-Edible Vegetable Oil-Based Biodiesel: Composition, Specifications and Prediction Models[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 63: 62–92.
- [96] CHAUHAN B S, KUMAR N, CHO H M. A Study on the Performance and Emission of a Diesel Engine Fueled with *Jatropha* Biodiesel Oil and Its Blends [J]. *Energy*, 2012, 37(1): 616–622.
- [97] PAUL G, DATTA A, MANDAL B K. An Experimental and Numerical Investigation of the Performance, Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with *Jatropha* Biodiesel [J]. *Energy Procedia*, 2014, 54: 455–467.
- [98] TAN Piqiang, HU Zhiyuan, LOU Diming, et al. Exhaust Emissions from a Light-Duty Diesel Engine with *Jatropha* Biodiesel Fuel [J]. *Energy*, 2012, 39(1): 356–362.
- [99] HULWAN D B, JOSHI S V. Performance, Emission and Combustion Characteristic of a Multicylinder DI Diesel Engine Running on Diesel-Ethanol-Biodiesel Blends of High Ethanol Content[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 5042–5055.
- [100] SAHOO P K, DAS L M, BABU M K G, et al. Comparative Evaluation of Performance and Emission Characteristics of *Jatropha*, *Karanja* and *Polanga* Based Biodiesel as Fuel in a Tractor Engine [J]. *Fuel*, 2009, 88(9): 1698–1707.
- [101] RAMADHAS A S, MURALEEDHARAN C, JAYARAJ S. Performance and Emission Evaluation of a Diesel Engine Fueled with Methyl Esters of Rubber Seed Oil [J]. *Renewable Energy*, 2005, 30(12): 1789–1800.
- [102] USTA N. An Experimental Study on Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Tobacco Seed Oil Methyl Ester [J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(15–16): 2373–2386.
- [103] LAHANE S, SUBRAMANIAN K A. Effect of Different Percentages of Biodiesel-Diesel Blends on Injection, Spray, Combustion, Performance, and Emission Characteristics of a Diesel Engine [J]. *Fuel*, 2015, 139: 537–545.
- [104] LIN Y S, LIN H P. Spray Characteristics of Emulsified Castor Biodiesel on Engine Emissions and Deposit Formation [J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(12): 3507–3516.
- [105] ATABANI A E, SILITONGA A S, ONG H C, et al. Non-Edible Vegetable Oils: A Critical Evaluation of Oil Extraction, Fatty Acid Compositions, Biodiesel Production, Characteristics, Engine Performance and Emissions Production [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 211–245.
- [106] KARMAKAR A, KARMAKAR S, MUKHERJEE S. Properties of Various Plants and Animals Feedstocks for Biodiesel Production [J]. *Bioresource Technology*, 2010,

- 101(19):7201-7210.
- [107] ÖNER C, ALTUN Ş. Biodiesel Production from Inedible Animal Tallow and an Experimental Investigation of Its Use as Alternative Fuel in a Direct Injection Diesel Engine[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(10):2114-2120.
- [108] VARUVEL E G, MRAD N, TAZEROUT M, et al. Experimental Analysis of Biofuel as an Alternative Fuel for Diesel Engines [J]. *Applied Energy*, 2012, 94: 224-231.
- [109] 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]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2005, 82: 585-591.
- [110] MA Fangrui, CLEMENTS L D, HANNA M A. Biodiesel Fuel from Animal Fat. Ancillary Studies on Transesterification of Beef Tallow [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, 37(9): 3768-3771.
- [111] SWAMINATHAN C, SARANGAN J. Performance and Exhaust Emission Characteristics of a CI Engine Fueled with Biodiesel (Fish Oil) with DEE as Additive [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 39: 168-174.
- [112] PEREIRA R G, TULCAN O E P, FELLOWS C E, et al. Sustainability and Mitigation of Greenhouse Gases Using Ethyl Beef Tallow Biodiesel in Energy Generation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 29: 269-276.
- [113] GÜRÜ M, KOCA A, CAN Ö, et al. Biodiesel Production from Waste Chicken Fat Based Sources and Evaluation with Mg Based Additive in a Diesel Engine [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(3): 637-643.
- [114] AHMED S A, RAHAMATHULLAH I, JAFER K S. Investigation of Petro-Diesel, Waste Animal Fat Biodiesel with Waste Cooked Oil Biodiesel Different Blends in Single Cylinder Four-Stroke Water-Cooled CI Engine [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021, 43(12): 1413-1428.
- [115] ADEWALE P, DUMONT M J, NGADI M. Recent Trends of Biodiesel Production from Animal Fat Wastes and Associated Production Techniques [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 574-588.
- [116] SONKAR S K, BARENDAR P, MISHRA P. Biodiesel, Promising Fuel and Its Impact on Performance of IC Engine [J]. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2020, 9(4): 2601-2608.
- [117] MAO G, SHI K, ZHANG C, et al. Biodiesel Fuel from *Chlorella Vulgaris* and Effects of Its Low-Level Blends on the Performance, Emissions, and Combustion Characteristics of a Nonroad Diesel Engine [J]. *Journal of Energy Engineering*, 2020, 146(3): 4020016.1-4020016.12.
- [118] KALE B N, PATLE S D. State of Art Review of Algal Biodiesel and Its Blends Influence on Performance and Emission Characteristics of Compression Ignition Engine [J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2022, 7: 100431.1-100431.12.
- [119] RAJAK U, NASHINE P, VERMA T N. Effect of Spirulina Microalgae Biodiesel Enriched with Diesel Fuel on Performance and Emission Characteristics of CI Engine [J]. *Fuel*, 2020, 268: 117305.1-117305.10.
- [120] KARTHIKEYAN S, PRATHIMA A, PERIYASAMY M, et al. Performance Analysis of  $Al_2O_3$  and  $C_{18}H_{34}O_2$  with *Kappaphycus Alvarezii*-Brown Algae Biodiesel in CI Engine [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 33: 4180-4184.
- [121] SUKUMAR R, RAO M M, KRISHNA A G. Performance, Combustion and Emission Strategies of *Hazantus* Algae Methyl Ester Blends Using Cerium Oxide Nanoparticles as Additive [J]. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2020, 29(4): 65-73.
- [122] PRABHU A, VENKATA RAMANAN M, JAYAPRABAKAR J. Effect of Compression Ratio on the Performance of CI Engine Fuelled with Freshwater Algae Biodiesel [J]. *International Journal of Ambient Energy*, 2020, 41(1): 80-83.
- [123] KARTHIKEYAN S, KALAIMURUGAN K, PRATHIMA A. Investigation on the Emission Quality Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Algae Biofuel with Nano Additives [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2017, 39(21): 2046-2052.
- [124] TSAOUSIS P, WANG Y, ROSKILLY A P, et al. Algae to Energy: Engine Performance Using Raw Algal Oil [J]. *Energy Procedia*, 2014, 61: 656-659.
- [125] DEMIRBAS A. Biodiesel from Waste Cooking Oil Via Base-Catalytic and Supercritical Methanol Transesterification [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(4): 923-927.
- [126] YAAKOB Z, MOHAMMAD M, ALHERBAWI M, et al. Overview of the Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 184-193.
- [127] TAKAHASHI O. Challenge of Climate Protection and BDF from Used Cooking Oil in the City of Kyoto, Japan [R]. Bali, Indonesia: ICLEI, 2007.
- [128] LEUNG D Y C, WU X, LEUNG M K H. A Review on Biodiesel Production Using Catalyzed Transesterification

- [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 1083–1095.
- [129] PRABU S S, ASOKAN M A, ROY R, et al. Performance, Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine Fuelled with Waste Cooking Oil Bio-Diesel/Diesel Blends with Additives [J]. *Energy*, 2017, 122: 638–648.
- [130] ADAILEH W M, ALQDAH K S. Performance of Diesel Engine Fuelled by a Biodiesel Extracted from a Waste Cooking Oil [J]. *Energy Procedia*, 2012, 18: 1317–1334.
- [131] PATEL M J, PATEL T M, RATHOD G R. Performance Analysis of CI Engine Using Diesel and Waste Cooking Oil Blend [J]. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2015, 12(2): 27–33.
- [132] YILDIZHAN Ş, ULUDAMAR E, ÇALIK A, et al. Fuel Properties, Performance and Emission Characterization of Waste Cooking Oil (WCO) in a Variable Compression Ratio (VCR) Diesel Engine [J]. *European Mechanical Science*, 2017, 1(2): 56–62.
- [133] SHIRNESHAN A. HC, CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> Emission Evaluation of a Diesel Engine Fueled with Waste Frying Oil Methyl Ester [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013, 75: 292–297.
- [134] VALENTE O S, PASA V M D, BELCHIOR C R P, et al. Exhaust Emissions from a Diesel Power Generator Fuelled by Waste Cooking Oil Biodiesel [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 431: 57–61.
- [135] ULUSOY Y, ARSLAN R, TEKIN Y, et al. Investigation of Performance and Emission Characteristics of Waste Cooking Oil as Biodiesel in a Diesel Engine [J]. *Petroleum Science*, 2018, 15: 396–404.
- [136] MADHESHIYA A K, VEDRTNAM A. Energy-Exergy Analysis of Biodiesel Fuels Produced from Waste Cooking Oil and Mustard Oil [J]. *Fuel*, 2018, 214: 386–408.
- [137] TESFA B, MISHRA R, ZHANG C, et al. Combustion and Performance Characteristics of CI (Compression Ignition) Engine Running with Biodiesel [J]. *Energy*, 2013, 51: 101–115.
- [138] YOON S K, KIM M S, KIM H J, et al. Effects of Canola Oil Biodiesel Fuel Blends on Combustion, Performance, and Emissions Reduction in a Common Rail Diesel Engine [J]. *Energies*, 2014, 7(12): 8132–8149.
- [139] SATHIYAGNANAM A P, SARAVANAN C G. Experimental Studies on the Combustion Characteristics and Performance of a Direct Injection Engine Fueled with Biodiesel/Diesel Blends with SCR [C]//*Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2011)*, July 6–8, 2011, London, UK. Newswood Limited, 2011: 2231–2236.
- [140] LABECKAS G, SLAVINSKAS S, MAŽEIKA M. The Effect of Ethanol-Diesel-Biodiesel Blends on Combustion, Performance and Emissions of a Direct Injection Diesel Engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 79: 698–720.
- [141] NALGUNDWAR A, PAUL B, SHARMA S K. Comparison of Performance and Emissions Characteristics of DI CI Engine Fueled with Dual Biodiesel Blends of Palm and Jatropha [J]. *Fuel*, 2016, 173: 172–179.
- [142] LIAQUAT A M, MASJUKI H H, KALAM M A, et al. Effect of Coconut Biodiesel Blended Fuels on Engine Performance and Emission Characteristics [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 56: 583–590.
- [143] RAJARAMAN S, YASHWANTH G K, RAJAN T, et al. Experimental Investigations of Performance and Emission Characteristics of Moringa Oil Methyl Ester and Its Diesel Blends in a Single Cylinder Direct Injection Diesel Engine [C]//*ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Nov. 13–19, 2009, Lake Buena Vista, Florida, USA. New York: ASME, c2009: 27–34.
- [144] MOFIJUR M, MASJUKI H H, KALAM M A, et al. Properties and Use of Moringa Oleifera Biodiesel and Diesel Fuel Blends in a Multi-Cylinder Diesel Engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 82: 169–176.
- [145] RAHMAN M M, HASSAN M H, KALAM M A, et al. Performance and Emission Analysis of Jatropha Curcas and Moringa Oleifera Methyl Ester Fuel Blends in a Multi-Cylinder Diesel Engine [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 65: 304–310.
- [146] MOFIJUR M, MASJUKI H H, KALAM M A, et al. Comparative Evaluation of Performance and Emission Characteristics of Moringa Oleifera and Palm Oil Based Biodiesel in a Diesel Engine [J]. *Industrial Crops and Products*, 2014, 53: 78–84.
- [147] GOPAL K N, KARUPPARAJ R T. Effect of Pongamia Biodiesel on Emission and Combustion Characteristics of DI Compression Ignition Engine [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2015, 6(1): 297–305.
- [148] LIN B F, HUANG J H, HUANG D Y. Experimental Study of the Effects of Vegetable Oil Methyl Ester on DI Diesel Engine Performance Characteristics and Pollutant Emissions [J]. *Fuel*, 2009, 88(9): 1779–1785.
- [149] AL DAWODY M F, BHATTI S K. Experimental and

- Computational Investigations for Combustion, Performance and Emission Parameters of a Diesel Engine Fueled with Soybean Biodiesel-Diesel Blends [J]. *Energy Procedia*, 2014, 52: 421-430.
- [150] GAUTAM A, AGARWAL A K. Experimental Investigations of Comparative Performance, Emission and Combustion Characteristics of a Cottonseed Biodiesel-Fueled Four-Stroke Locomotive Diesel Engine [J]. *International Journal of Engine Research*, 2013, 14(4): 354-372.
- [151] MURALIDHARAN K, VASUDEVAN D, SHEEBA K N. Performance, Emission and Combustion Characteristics of Biodiesel Fuelled Variable Compression Ratio Engine [J]. *Energy*, 2011, 36(8): 5385-5393.
- [152] CHENG C H, CHEUNG C S, CHAN T L, et al. Comparison of Emissions of a Direct Injection Diesel Engine Operating on Biodiesel with Emulsified and Fumigated Methanol [J]. *Fuel*, 2008, 87(10-11): 1870-1879.
- [153] XUE Jinlin. Combustion Characteristics, Engine Performances and Emissions of Waste Edible Oil Biodiesel in Diesel Engine [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 23: 350-365.
- [154] KOC A B, ABDULLAH M. Performance and NO<sub>x</sub> Emissions of a Diesel Engine Fueled with Biodiesel-Diesel-Water Nanoemulsions [J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 109: 70-77.
- [155] FATTAH I M R, MASJUKI H H, LIAQUAT A M, et al. Impact of Various Biodiesel Fuels Obtained from Edible and Non-Edible Oils on Engine Exhaust Gas and Noise Emissions [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 552-567.
- [156] KUMAR N, CHAUHAN S R. Performance and Emission Characteristics of Biodiesel from Different Origins: A Review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 21: 633-658.
- [157] 李文跃, 曹士亮, 于滔, 等. 作物转基因技术, 种植现状及安全性 [J]. *黑龙江农业科学*, 2020(10): 124-128.  
LI Wenyue, CAO Shiliang, YU Tao, et al. Crop Transgenic Technology, Planting Status and Safety [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2020(10): 124-128. (in Chinese)
- [158] DHANARASU M, RAMESH KUMAR K A, MAADESWARAN P. Recent Trends in Role of Nanoadditives with Diesel-Biodiesel Blend on Performance, Combustion and Emission in Diesel Engine: A Review [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2022, 43(11): 171-193.

#### 作者简介



高楠 (1985-), 男, 河北任丘人, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源汽车和汽车电子控制技术。

E-mail: gaonan@chd.edu.cn

#### 通信作者



张洁 (1988-), 女, 山西运城人, 博士, 副教授, 主要研究方向为清洁燃烧与危废高效处置技术。

E-mail: jiezhang@chd.edu.cn