

5种野生木本植物油性质及其 制备生物柴油的研究

刘光斌¹, 刘苑秋², 黄长干¹, 杜天真²,
胡冬南², 黄忠¹, 邱自兵¹, 李百健¹, 单替¹

(1. 江西农业大学 应用化学研究所, 江西 南昌 330045; 2. 江西农业大学 园林与艺术学院, 江西 南昌 330045)

摘要:选择东京野茉莉、乌桕、黄连木、白檀、光皮树等 5 种野生木本植物种籽, 分别提取其油脂, 测定其理化性质、脂肪酸组成及含量; 并将油脂用酯交换反应制备生物柴油, 测定其指标等。结果表明: 种籽出油率东京野茉莉 53.6%, 黄连木 33.0%, 白檀 20.0%, 乌桕 22.0%, 光皮树 28.6%; 油脂中脂肪酸主要组成为棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸, 其中以十六碳和十八碳的脂肪酸为主, 不饱和脂肪酸含量高达 90% 以上; 油脂理化性质、脂肪酸组成及含量符合生物柴油要求; 5 种木本植物油转化为生物柴油的转化率大于 95%; 5 种木本植物油转化为生物柴油指标与 0# 柴油指标接近。

关键词: 东京野茉莉; 乌桕; 黄连木; 白檀; 光皮树; 生物柴油

中图分类号: S792; TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 2286(2010)02 - 0339 - 06

Phychemical Properties and Preparation of Bio-diesel with Five Categories of Woody Plant Seeds Oil

LIU Guang-bin¹, LIU Yuan-qi², HUANG Chang-gan¹, DU Tian-zhen²,
HU Dong-nan², HUANG Zhong¹, QIU Zi-bing¹, LIBai-jian¹, SHAN Ti¹

(1. Institute of Applied Chemical, JAU, Nanchang 330045, China; 2. College of Landscape Architecture and Art, JAU, Nanchang 330045, China)

Abstract: Five categories of wild plants (*Styrax tonkinensis*, *Pistaciachinensis bunge*, *Symplocos paniculata*, *Sapium sebiferum*, *Canus wilsoniana*) were picked out to extract respectively their lipids and their phy-chemical constants, compositions and contents of fatty acid were determined. Then the lipids were treated with Ester-exchange reaction to prepare bio-diesel. The results showed that the oil yields of seeds were, *Styrax tonkinensis*: 53.6%, *Symplocos paniculata*: 33.0%, *Sapium sebiferum*: 20.0%, *Pistaciachinensis bunge*: 22.0%, *Canus wilsoniana*: 28.6%; the oils mainly included Palmitic acid, Stearic acid, Oleic acid, Linoleic acid and Linolenic acid, which mostly contained 16 carbon and 18 carbon fatty acid and the content of unsaturated fatty acids was up to 90%; the phy-chemical properties, compositions and contents of fatty acid of the oils were consistent with the bio-diesel standards. The five categories of wild plant oils were used to prepare bio-diesel, the conversional rate was 95%, the performance of the converted oil is close to that of diesel oil No. 0.

Key words: *Styrax tonkinensis*; *Pistaciachinensis bunge*; *Symplocos paniculata*; *Sapium sebiferum*; *Canus wilsoniana*; bio-diesel

收稿日期: 2009 - 11 - 30 修回日期: 2010 - 03 - 16

基金项目: 江西省教育厅科研基金项目 (GJJ10421) 和江西农业大学生物质能源专项基金项目 [2006(2045)]

作者简介: 刘光斌 (1963 -), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事生物质能源研究, E-mail: lgb267@126.com.

21 世纪将面临能源问题的严峻挑战,开发利用可再生能源是事关中国国民经济可持续发展、国家安全和进步的重大课题^[1]。生物柴油是由动植物油经过酯交换反应制造的可以替代石化柴油的新型清洁安全燃料,它的主要成分是脂肪酸甲酯^[2]。目前,如菜籽油、大豆油、棉籽油等多种油料作物已被欧美各国广泛用作生产生物柴油的原料。我国目前还属于植物油短缺的阶段,虽然油料作物的油脂年产量超过 1 000 万 t,但是仍然不能满足食用油的需求量,而且食用油脂的进口量还在逐年上升,同时我国耕地短缺也进一步限制了油料作物的发展。如果仿效欧美等发达国家大力种植油料作物油菜、大豆等的方式发展生物柴油工业并不符合我国国情。木本油料植物由于其产油高,不占用耕地而被广泛关注,已经被一些发展中国家大力开发作为生物柴油的原料来源^[3-4]。

我国拥有丰富的油料植物资源,其中木本油料树种有 400 多种,含油量为 15% ~ 60% 的有 200 多种,含油量为 50% ~ 60% 的有 50 多种^[5]。据统计,我国尚有不适宜农耕的宜林荒山荒地沙荒地 0.55 亿 hm^2 ,如果利用其中的 20% 来种植高产木本能源植物,每年可生产的生物质原料 2 亿 t,相当于 1 亿 t 标准煤,为大力发展生物柴油展示了广阔的前景^[6]。然而,如何从这些种类多样的能源植物资源中,选择出油率高、适合于本土种植的生物柴油原料树种,是值得研究的一个重大课题。为了筛选在江西分布广、适应性强、出油率高的木本油料植物,选择了江西各地野生木本植物(东京野茉莉、乌桕、黄连木、白檀、光皮树等)种籽,分别提取油脂,测定其理化性质、脂肪酸组成及含量;并将油脂用酯交换反应制备生物柴油,测定其生物柴油理化指标等,为实现以木本油料植物为原料生产生物柴油提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

东京野茉莉 (*Styrax tonkinensis*)、黄连木 (*Pistacia chinensis bunge*)、白檀 (*Symplocos paniculata*)、乌桕 (*Sapium sebiferum*)、光皮树 (*Canus wilsoniana*) 种籽(采自江西吉安、赣州、九江等地野生树种籽,未去果皮);石油醚、乙醚、乙醇、氢氧化钾、硫代硫酸钠、四氯化碳、甲醇,所用试剂均为分析纯,棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸均为色谱纯,水为蒸馏水。

1.2 仪器

DGF30/14—型电热鼓风干燥器:南京实验仪器厂;FW 100 高速万能粉碎机:天津市泰斯特仪器有限公司;DK—S24 电热恒温水浴锅:上海森信实验仪器有限公司;SPS2001 F 电子天平:美国奥豪斯公司;LG50 理化干燥箱:上海跃进医疗器械厂;PPV—4060 有机合成装置:TOKYO RIKAKIKAI CO. LTD. MADE IN JAPAN(日本东京理化器械株式会社);SHZ—循环水真空泵:上海亚荣生化仪器厂;GC2010 气相色谱仪:日本岛津公司。

1.3 方法

1.3.1 种籽预处理方法 黄连木、乌桕种籽先浸入混有碳酸氢钠的温水浸泡 2 至 3 d,然后揉搓或捣搓洗涤,除去果皮蜡质,捞出沉于水底的种子,用清水淘洗干净;东京野茉莉、白檀、光皮树等种籽直接洗净。将上述洗净的种子放入烘箱中在温度为 90 °C 烘 2 ~ 3 h,然后用高速万能粉碎机使种籽粉碎。

1.3.2 油脂提取方法 以预处理的种籽为原料,石油醚为溶剂,将粉碎种籽及石油醚按一定比例,在设定的温度下倒入圆底烧瓶,回流浸提一定的时间后,过滤得滤液。滤液先常压,再减压蒸馏脱除溶剂,可得油脂。

1.3.3 油脂的理化性质测定方法 酸值的测定按 GB/T 5530—1998 进行测定;皂化值的测定按 GB/T 5534—1995 进行测定;碘值的测定按 GB/T 5532—1995 进行测定;折光率的测定按 GB/T 5530—1985 进行测定。

1.3.4 油脂中脂肪酸及甲酯色谱分析条件 油脂中脂肪酸和脂肪酸甲酯(即生物柴油)的色谱分析条件相同^[7],因为脂肪酸分析先要甲酯化,即将植物油脂加正己烷溶剂和氢氧化钾—甲醇溶液甲酯化,然后取样用气相色谱对其进行成分分析。判断不同类型的脂肪酸,用标准脂肪酸(色谱纯)在同样条件下进样,在气相色谱图对比进行判断;GC2010 气相色谱仪分析条件^[8-9]:FD 检测器,FFAP 毛细管色(30.0 m

$\times 0.25 \mu\text{m} \times 0.25 \text{mm}$), 进样口温度 240°C , 检测器温度 240°C , 柱流量 1.23 mL/min , 分流比为 $1:30$; 柱温采取程序升温: 初始柱温 180°C , 以 2°C/min 的升温速率升到 210°C , 保持 3 min , 然后以 2°C/min 的升温速率升到 230°C , 保持 5 min ; 尾吹流量 30 mL/min , 载气: N_2 , 柱头压 60 kPa , 氢气流量 40 mL/min , 空气流量 400 mL/min , 进样量 $1 \mu\text{L}$ 。

1.3.5 油脂预处理方法 黄连木、白檀、光皮树、乌桕油脂酸值高, 如果直接用碱催化法制备, 不但要消耗过多的碱催化剂, 而且转化率非常低, 因此必须对原料油进行去掉游离脂肪酸预处理。在合成装置 PPV—4060 中加入需酸预处理的油脂、甲醇、浓 H_2SO_4 。以甲醇和油脂物质的量比 $6:1$, 催化剂用量 1% (以油脂的质量为基准), 温度 65°C , 以时间为变量进行油脂预酯化法脱酸反应, 反应一定时间后常压下蒸馏脱除过量甲醇, 将产物倒入分液漏斗中, 用温水洗涤至中性, 再用减压蒸馏除去残存的水及少量甲醇, 酸值降到 $w(\text{KOH}) = 1.5 \text{ mg/g}$ 以下。

1.3.6 生物柴油的制备方法 油脂用碱催化制备生物柴油的方法^[9]: 在合成装置 PPV—4060 中加入经酸预处理的油脂、甲醇、氢氧化钾。以油脂和甲醇物质的量比、催化剂用量、温度、反应时间为变量进行酯交换反应。反应一定时间后将反应混合物倒入分液漏斗中进行分离, 分出下层甘油。上层产物在常压下蒸馏脱除过量甲醇, 用温水洗涤至中性, 再用减压蒸馏除去残存的水、甲醇、甘油单酸酯、甘油二酸酯、甘油三酸酯等杂质, 得到浅黄色、澄清透明的脂肪酸甲酯, 即生物柴油。

1.3.7 生物柴油转化率计算方法 采用气相色谱用面积归一法测定反应体系中脂肪酸甲酯的含量。用脂肪酸甲酯的转化率来表示反应结果^[8-9]。

生物柴油转化率 = 实际产物中的甲酯质量 / 理论上应得的甲酯质量 $\times 100\%$ 。其中, 实际产物中的甲酯质量 = 色谱分析中甲酯含量 \times 甲酯化所得甲酯质量。

1.3.8 生物柴油指标的测定方法 生物柴油指标的测定方法按如下国标进行测定^[10]。闪点的测定按 GB/T267—1988 进行测定; 馏程的测定按 GB255—1977 进行测定; 运动黏度的测定按 GB/T265—1988 进行测定; 灰分的测定按 GB508—1965 进行测定; 密度的测定按 GB5526—1985 进行测定; 十六烷值的测定按 $w_{\text{CN}} = 46.3 + 5.458/w_{\text{SV}} - 0.225 \times v_{\text{N}}$ 公式计算^[11]。

2 结果与分析

2.1 种籽出油率

按 1.3.2 确定的最佳条件提取, 即种籽质量与石油醚体积比 $1:5$, 反应时间为 2 h , 反应温度为 90°C 。从表 1 可以看出, 5 种木本植物种籽出油率都较高, 为 $20\% \sim 60\%$, 出油率由高至低的顺序依次为: 东京野茉莉、黄连木、光皮树、乌桕、白檀。虽然白檀油、乌桕油含量接近, 但白檀油流动性比乌桕油好。

2.2 油脂理化性质分析

按 1.3.3 分析方法, 测出油脂主要理化性质。从表 2 可以看出, 东京野茉莉油酸值 $w(\text{KOH})$ 为 0.80 mg/g , 在 $w(\text{KOH}) = 1.5 \text{ mg/g}$ 以下, 它可以直接进行酯化反应制备生物柴油。黄连木、白檀、乌桕、光皮树油脂酸值大于 $w(\text{KOH}) = 1.5 \text{ mg/g}$, 需要用浓 H_2SO_4 在用碱酯化前进行预处理使其酸值降到 1.5 mg/g 以下。碘值除乌桕油较高 ($w_{\text{I}} = 124$) 外, 其他 4 种油脂碘值为 $0.58 \sim 1.15$, 与罗艳^[3] 植物油质量的评价体系相吻合。从皂化值可以计算出油脂平均相对分子质量, 计算式为: $M = 56.1 \times 3 \times 1000/w_{\text{SV}}$, 油脂平均相对分子量与皂化值成反比。因此, 黄连木、光皮树油脂的平均相对分子量比东京野茉莉、白檀、乌桕要小些, 流动性好些。

表 1 种籽出油率

Tab 1 Oil yield of seed

油脂名称 Oil name	出油率 / % Oil yield of seed
东京野茉莉油 Seed oil of <i>Styrax tonkinensis</i>	53.6
黄连木油 Seed oil of <i>Pistaciachinensis bunge</i>	33.0
白檀油 Seed oil of <i>Symplocos paniculata</i>	20.0
乌桕油 Seed oil of <i>Sapium sebifenm</i>	22.0
光皮树油 Seed oil of <i>Camus wilsoniana</i>	28.6

表 2 油脂的理化性质

Tab 2 Phy - chemical properties of oil

油脂名称 Oil name	酸值 $w(\text{KOH}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) AV	皂化值 $w(\text{KOH}) /$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) SV	碘值 $w(\text{I}) /$ ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) IV	折光率 n_D^{20}
东京野茉莉油 Seed oil of <i>Styrax tonkinensis</i>	0.80	165.53	0.7589	1.5010
黄连木油 Seed oil of <i>Pistaciachinensis bunge</i>	13.10	181.20	0.9863	1.4728
白檀油 Seed oil of <i>Symplocos paniculata</i>	18.59	152.22	0.7193	1.4718
乌桕油 Seed oil of <i>Sapium sebifennum</i>	2.20	144.52	1.2494	1.4606
光皮树油 Seed oil of <i>Camus wilsoniana</i>	6.50	179.31	0.5843	1.4849

表 3 油脂主要脂肪酸的组成及含量

Tab 3 The contents and compositions of fatty acid of oil

油脂名称 Oil name	脂肪酸组成及含量 /% The contents and compositions of fatty acid				
	棕榈酸 (16:0) Palmitic acid	硬脂酸 (18:0) Stearic acid	油酸 (18:1) Oleic acid	亚油酸 (18:2) Linoleic acid	亚麻酸 (18:3) Linolenic acid
东京野茉莉油 Seed oil of <i>Styrax tonkinensis</i>	7.89	1.84	27.31	56.72	6.23
黄连木油 Seed oil of <i>Pistaciachinensis bunge</i>	12.01	1.24	39.37	43.06	1.04
白檀油 Seed oil of <i>Symplocos paniculata</i>	19.34	1.24	53.87	22.02	0.67
乌桕油 Seed oil of <i>Sapium sebifennum</i>	9.98	2.28	17.81	35.65	31.13
光皮树油 Seed oil of <i>Camus wilsoniana</i>	6.61	2.47	25.68	64.09	0.39

2.3 油脂脂肪酸的组成及含量

用气相色谱仪按 1.3.4 色谱分析条件,分析油脂脂肪酸的组成及含量,结果如表 3。从表 3 可以看出,5 种木本植物油脂主要含棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸,其中以十六碳和十八碳的脂肪酸为主,含油酸、亚油酸较多,不饱和脂肪酸含量高达 90% 以上。

2.4 生物柴油的转化率

在有机合成装置 PPV—4060 中,按 1.3.6 进行 $L_9(3^4)$ 正交试验确定的最佳条件^[9]:即油脂和甲醇物质的量比 1:6、催化剂用量为油质量的 1.2%、反应时

表 4 生物柴油的转化率

Tab 4 Conversion of bio - diesel

生物柴油名称 Bio - diesel name	转化率 /% Conversion rate
东京野茉莉油生物柴油 Bio - diesel of <i>Styrax tonkinensis</i>	94.9
黄连木油生物柴油 Bio - diesel of <i>Pistaciachinensis bunge</i>	96.0
白檀油生物柴油 Bio - diesel of <i>Symplocos paniculata</i>	95.4
乌桕油生物柴油 Bio - diesel of <i>Sapium sebifennum</i>	95.8
光皮树油生物柴油 Bio - diesel of <i>Camus wilsoniana</i>	95.6

间 2 h, 反应温度 60 。根据酯交换反应进行重复实验制备生物柴油, 按 1.3.7 计算 5 种生物柴油的转化率。从表 4 可以看出, 5 种木本植物油生物柴油转化率都较高, 均大于 95%。5 种木本植物油中主要棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸等都转化为相应的棕榈酸甲酯、硬脂酸甲酯、油酸甲酯、亚油酸甲酯和亚麻酸甲酯。说明油脂用酯交换反应制备生物柴油大部分脂肪酸都转化为脂肪酸甲酯, 即生物柴油。

2.5 生物柴油性能比较

将自制的 5 种生物柴油的指标与 0# 柴油指标进行比较, 按 1.3.8 方法进行测定。从表 5 可看出, 自制生物柴油指标与我国 0# 柴油的主要指标相接近, 而且闪点高 (147 ~ 149)、安全性好; 十六烷值为 51 ~ 65, 燃烧性能好。

表 5 生物柴油与 0# 柴油指标比较

Tab 5 The properties comparison between bio-diesel and 0# diesel

生物柴油名称 Bio-diesel name	闪点 / Flash point	十六烷值 Cetane ratio	馏程 / Distillation range	密度 (20) / (g · cm ⁻³) Density	灰分 / % Ash	总杂质 / % Total impurities	粘度 40 (mm ² · s ⁻¹) Viscosity
东京野茉莉油生物柴油 Bio-diesel of <i>Styrax tonkinensis</i>	147	62.20	360	0.896	无	无	3.8
黄连木油生物柴油 Bio-diesel of <i>Pistacia chinensis bunge</i>	149	54.23	360	0.895	无	无	3.7
白檀油生物柴油 Bio-diesel of <i>Symplocos paniculata</i>	148	65.98	358	0.896	无	无	3.7
乌桕油生物柴油 Bio-diesel of <i>Sapium sebiferum</i>	148	55.96	359	0.895	无	无	3.6
光皮树油生物柴油 Bio-diesel of <i>Canus wilsoniana</i>	147	63.58	360	0.897	无	无	3.8
0# 柴油 0# Diesel	50	46.00	365	0.850	0.025	无	2.7

3 结论与讨论

(1) 5 种木本植物种籽出油率为 20% ~ 53.6%, 其中东京野茉莉 53.6%, 黄连木 33%, 白檀 20%, 乌桕 22%, 光皮树 28.6%。这 5 种木本植物种籽具有较高出油率, 而且适应性很广、耐干旱、耐贫瘠, 易繁殖、栽培和推广, 生长速度快, 预示着这 5 种木本植物是较好的油料植物, 是一种具有开发前景的生物柴油树种。同时, 通过试验发现, 同一种种籽产地区域不同, 种籽出油率也有差别, 而且, 同一种种籽不同部位 (种仁、籽皮) 油脂的出油率也有区别, 这方面研究有待进一步研究和确认。

(2) 5 种木本植物油理化性质虽然存在一些差异, 但经过处理都符合制备生物柴油的要求^[3]。从酸值来看, 东京野茉莉油可以直接进行酯化反应制备生物柴油, 黄连木、白檀、光皮树、乌桕油脂酸值高, 需要用浓 H₂SO₄ 在用碱酯化前进行预处理使其酸值降到 w(KOH) = 1.5 mg/g 以下。从碘值来看, 5 种木本植物油碘值为 0.58 ~ 1.15, 与罗艳^[3]植物油质量的评价体系相吻合。因为碘值是油脂不饱和度的度量, 碘值越高, 表明不饱和脂肪酸的含量越高。为了防止油脂固化, 生物柴油中必须含有一定量的不饱和脂肪酸。但是不饱和程度高的生物柴油在燃烧过程中会导致甘油三酯的聚合反应, 产生沉积物, 不利发动机的润滑, 一般把碘值 1.15 作为对油脂碘值的初筛标准的最大值。从皂化值来看, 油脂平均相对分子量与皂化值成反比, 黄连木、光皮树油脂的平均相对分子量比东京野茉莉、白檀、乌桕要小些, 流动性好些, 这与实验结果一致。

(3) 5 种木本植物油脂肪酸组成主要含有棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸, 其中以十六碳和

十八碳的脂肪酸为主,含量高达 90%以上,适合制备生物柴油原料。脂肪酸的碳链长短、不饱和键的多少直接影响生物柴油的性能,较多的不饱和脂肪酸容易被空气氧化,会给生物柴油稳定带来问题。乌桕油中含有较多的亚麻酸(31.13%),亚麻酸的存在会使它的生物柴油稳定性降低,而过多的饱和脂肪酸又会加大生物柴油的粘度。因此,从脂肪酸组成分析来看,乌桕油制备生物柴油性能要比东京野茉莉、黄连木、白檀、光皮树生物柴油差,这也与实验结果一致。

(4) 5种木本植物籽油制备生物柴油转化率大于 95%,自制生物柴油指标与 0#柴油的主要指标接近,而且闪点高(147~149)、安全性好;十六烷值高,燃烧性好。十六烷值是柴油燃烧性能的重要指标,对柴油机的运转影响较大,内燃机车用柴油必须有合适的十六烷值,否则将引起柴油机的加速磨损,较高的十六烷值能使生物柴油在发动机中运行更流畅,噪音更小。根据美国(ASTMPS121)制定的生物柴油标准,将十六烷值的最大值设为 65,即 $51 < w_{CN} < 65$ 。5种木本植物油制备生物柴油十六烷值在 $51 < w_{CN} < 65$,符合生物柴油标准。

(5) 从自制 5种生物柴油外观来看,低温流动性较差。根据国际上惯用作法,即在石油柴油中调入 20%左右的生物柴油或添加降凝剂等方法,来改善生物柴油的低温流动性,使用效果会更好^[12],这有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 汪涛. 中国主要生物质燃料油木本能源植物资源概况与展望 [J]. 科技导报, 2005, 23(5): 12 - 14.
- [2] 付玉杰, 祖元刚. 生物柴油 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 5 - 14.
- [3] 罗艳, 刘梅. 开发木本油料植物作为生物柴油原料的研究 [J]. 中国生物工程杂志, 2007, 27(7): 68 - 74.
- [4] 李昌珠, 蒋丽娟, 李培旺, 等. 野生木本植物油——光皮树油制取生物柴油的研究 [J]. 生物加工过程, 2005, 3(1): 42 - 44.
- [5] 禄文林. 木本油料树种资源利用现状与展望 [J]. 陕西林业科技, 2008(4): 146 - 149.
- [6] 蔡亚林. 我国正成为世界森林产业大国 [J]. 经济, 2008(1): 114 - 115.
- [7] 巫森鑫, 邬国英, 韩瑛, 等. 6种食用植物油及其生物柴油中脂肪酸成分的比较研究 [J]. 中国油脂, 2003, 28(12): 65 - 67.
- [8] 刘光斌, 黄长干, 刘苑秋, 等. 东京野茉莉油的提取及其制备生物柴油的研究 [J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(4): 685 - 689.
- [9] 刘光斌, 黄长干, 刘苑秋, 等. 黄连木油的提取及其制备生物柴油的研究 [J]. 中国粮油学报, 2009, 24(7): 84 - 88.
- [10] 中国石油化工股份有限公司科技开发部. 石油和石油产品试验方法标准汇编(上) [M]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1 - 4, 24 - 27, 33 - 37, 179 - 181, 236 - 241.
- [11] Krisnangkura K A simple method for estimation of cetane index of vegetable oil methyl ester [J]. J Am Oil Chem Soc, 1986, 63(4): 552 - 553.
- [12] 韩伟. 生物柴油低温流动性及改进方法研究进展 [J]. 化工进展, 2007, 26(10): 1395 - 1399.