

# 我国木本生物柴油原料研发现状及产业化前景

李昌珠 李培旺 肖志红 陈景震 张良波

(湖南省林业科学院 生物能源研究所,长沙 410004)

**摘要** 系统总结了木本生物柴油原料科研和产业化动态,对木本生物柴油原料资源现状、选择指标体系和主要木本生物柴油原料转化生物柴油工艺技术及产品理化性质进行了分析;结合科研工作进展,阐述了我国木本生物柴油原料研究中的存在的问题;对木本生物柴油原料产业化前景进行了预测,发现利用非耕地资源发展木本生物柴油原料潜力巨大。针对发展木本生物柴油原料提出4点建议:1)重点加强原料油植物育种、定向培育和资源高效转化的科技攻关;2)针对资源培育周期长的特点不断优化完善产业发展政策体系,重点推动木本生物柴油进入市场;3)加强科学研究,组织力量对关键技术进行科研攻关;4)加强宣传教育,建立由市场牵龙头企业建基地、基地连农户种植的运行模式,促进木本生物柴油原料产业快速、健康、有序、协调地发展。

**关键词** 生物柴油; 木本原料; 产业化前景

中图分类号 N 1 文章编号 1007-4333(2012)06-0165-06 文献标志码 A

## Current progress in research and development of woody biodiesel oil feedstock and its industrialization prospect in China

LI Chang-zhu, LI Pei-wang, XIAO Zhi-hong, CHEN Jing-zhen, ZHANG Liang-bo

(Institute of Bio-energy, Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, China)

**Abstract** In this paper, research on woody raw material for biodiesel and its industrialization was reviewed. The status of woody oil resources, their selection criteria, the technologies to develop woody plants into feedstock for biodiesel production and their physical and chemical properties were surveyed. In addition to point out the problems in woody biodiesel raw material, this paper also analyzes the prospects on woody biodiesel raw material industrialization. It is important to take full use of non-cultivated land resources for planting woody bio-diesel raw material. Recommendations for developing woody feedstock for biodiesel were proposed, including the following countermeasures: 1) Scientific and technological researches focusing on breeding, cultivation and efficient transformation should be strengthened. 2) The industrial development policy system for improving the long cycle characteristics of resources, especially on promoting woody bio-diesel to enter the market should be continuously optimized; 3) Scientific research on key technologies should be organized to strengthen scientific research. Finally, in order to promote the development of woody feedstock for biodiesel industry in a fast, healthy and orderly manner, the mode of operation in which leading enterprises build a base and the base with farmers planting, should be constructed.

**Key words** bio-diesel; woody feedstock; industrialization prospect

能源危机、石化能源废气排放带来不可逆转的环境污染压力催生生物柴油的规模生产、销售和应用,并已呈现出商业化发展的趋势<sup>[1]</sup>。与石化柴油相比,生物柴油成本高,然而生物柴油原料油成本却占生物柴油生产成本的75%<sup>[2-5]</sup>。生物柴油原料种

类主要有植物油、动物脂、微藻油脂,生物柴油原料的规模持续供应已成为了制约生物柴油产业发展的瓶颈。

我国山地、丘陵和高原占国土面积的近70%,木本油料植物资源丰富,大力培育富含油脂的木本

收稿日期: 2012-08-04

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD22B04)

第一作者: 李昌珠, 研究员, 主要从事能源植物和生物柴油研究, E-mail: lichangzhu2003@yahoo.com.cn

油料植物原料资源,以其果实或种子作为原料生产生物柴油具有多重优势,既不与粮争地,又可保持水土,涵养水源,改善环境<sup>[6-10]</sup>。开发利用木本油料植物生产生物柴油是一项系统工程,牵涉到油料植物育种、定向培育、原料油脂的采收贮运、高效清洁转化技术等,需要国家政策支持和长期的持续科学研究。本研究仅限于对我国木本油料植物资源、能源林建设及木本生物柴油转化等方面进行探讨,以期为我国木本生物柴油原料开发利用及生物柴油产业发展提供参考。

## 1 我国木本生物柴油原料研发现状

### 1.1 木本油料植物种质资源现状

我国木本油料能源树种资源丰富、种类繁多、分布广泛,大多数种类处于野生尚未开发状态,缺乏系统深入研究。自“八五”我国首次提出“生物燃料油”、“能源油料植物”和“能源植物油”以来,对木本能源油料植物资源量、种类及特性进行了大量系统的调查研究,基本掌握了我国木本能源油料植物资源状况。系统分析登记有151科,677属,1544种木本油料植物,初步确定了木本能源油料植物选择指标体系和指标权重<sup>[6,9-10]</sup>,筛选出产量高、含油率高、分布广、适应性强、可用作建立规模化木本油料原料基地的乔灌木树种有20多种,能利用荒山、沙地等宜林地进行造林,建立起规模化的良种供应基地的生物质燃料油植物约10种,如麻疯树、光皮树、乌柏、文冠果和黄连木等作为我国最重要木本能源油料树种已被列入“十一五”国家科技支撑计划“农林生物质工程”重大项目<sup>[7-11]</sup>。

麻疯树(*Jatropha curcas* L.)又名膏桐、小桐子、黑皂树、木花生、油芦子、老胖果等,属大戟科(*Euphorbiaceae*)麻疯树属(*Jatropha*)落叶灌木或小乔木,全世界约有200种麻疯树。我国共有4种,即麻疯树(*J. curcas* L.)、棉叶麻疯树(*J. gossypifolia* L.)、佛肚树(*J. podagrica* Hook)和珊瑚花(*J. multifida* L.)。其中,以麻疯树种植面积较大、分布范围较广、资源较丰富。目前,我国已经建立了能源植物麻疯树的数据库和基因库,收集国内麻疯树种源20个,优良家系50个,筛选出8-9个优良的麻疯树种<sup>[10,12-15]</sup>。

光皮树(*Swida wilsoniana*),山茶萸科来木属落叶灌木或乔木,果肉和果核均含油脂,干全果含油率33%~36%,是我国特有的一种果实高含油多用

途油料树种,分布于长江流域至西南各分布于长江流域至西南各地的石灰岩区,黄河及以南流域也有分布。从“八·五”以来我国就开始对光皮树资源进行调查与筛选,建立了光皮树种质资源圃,并在“十五”期间选育出的早实、高产光皮树优良无性系湘林1~8号等优良无性系<sup>[16-18]</sup>。

乌柏(*Sapium sebiferum*),大戟科乌柏属落叶乔木,含油量40%~53%,我国特有的木本油料树种,被我国列为四大木本油料之一,分布于长江流域以南地区,在20世纪60年代我国就开始了乌柏资源调查及良种选育工作,选育出分水葡萄柏-1号、选柏-1号、选柏-2号、铜锤柏-11号、枫选1号、桂选分水葡萄柏9号、广西蜈蚣柏2号、阳山1~3号等10多个优良无性系<sup>[19]</sup>。乌柏蒴果球形,褐色三裂,种子表面附有一层白色蜡质,叫做“皮油”或“柏蜡”。乌柏种籽榨的油叫梓油或青油,浅黄到暗褐色,乌柏油主要成分为油酸、亚油酸、亚麻酸的甘油酯,并含有少量2,4-癸二烯酸和棕榈酸。值得说明的是乌柏“皮油”或“柏蜡”不能作为生物柴油原料<sup>[19]</sup>。

黄连木(*Pistacia chinensis*),别名“楷木”、“孔木”,漆树科黄连木属落叶乔木,其种子富含油脂,含油率高达42.5%,果实含油率35%~42%。黄连木原产地中海地域、亚洲和北美南部。在我国分布广泛,在温带、亚热带和热带地区均能正常生长,分布北界县市由西到东为:云南潞西、泸水—西藏察隅—四川甘孜—青海循化—甘肃天水—陕西富县—山西阳城—河北完县—北京。目前,在黄连木资源调查、生殖生态学研究、引种栽培技术、病虫害防治、大田育苗等方面进行了大量研究,建立了黄连木优良类型综合评价指标体系,筛选出06-1号、07-8号、07-10号等优株<sup>[20-22]</sup>。

### 1.2 木本能源油料林建设及现状

从“十一五”以来,我国政府制定了一系列的法律法规和政策来促进木本能源油料林的建设,其中有《关于发展生物能源和生物化工财税扶持政策的实施意见》、《中华人民共和国可再生能源法》(2005)、《可再生能源产业发展指导目录》(2006)、《可再生能源中长期发展规划》(2007)、《关于合作发展林业生物质能源框架协议》(2007)等。与此同时我国也相应的启一系列项目,如2007年国家林业局与中国石油天然气股份有限公司正式启动林油一体化示范项目、中华人民共和国科技部与联合国开发计划署联合启动了“少数民族地区绿色能源减贫项

目”等。有关促进油料能源林发展的系列国家政策与政府行为为企业进入该新兴行业带来了良好的市场契机,大量的企业加入到能源林建设的行列中,其中包括中石油、中海油、湖南未名创林生物能源有限公司、武汉凯迪控股投资有限公司和江南航天公司、海南绿博实业公司等。国内中石油、中石化、中海油、中粮集团有限公司、香港能源等分别投资发展生物柴油原料基地。中石油和国家林业局签订协议,自 2007 年开始,在云南、四川建设首批林业约 4 hm<sup>2</sup> 的生物柴油原料林基地,预计能提供约 6 万 t 生物柴油原料。中石化计划在云南、贵州等地种植能源树。中粮集团与国家林业局合作建立林业生物质能源基地<sup>[7-8,11]</sup>。

目前,我国现有木本油料林面积超过 600 万 hm<sup>2</sup>,主要油料树种果实年产量均在 200 万 t 以上,其中,“十一五”期间,生物柴油原料林基地建设规模为 83.91 万 hm<sup>2</sup>,其中新造林 66.21 万 hm<sup>2</sup>,现有林改造 17.70 万 hm<sup>2</sup>,分别占总规模的 78.9% 和

21.1%。小桐子、油桐、黄连木、文冠果、乌桕、光皮树建设规模分别为 29.56、15.91、15.64、15.51、4.00、2.99 万 hm<sup>2</sup>,分别占总规模的 35.6%、19.0%、18.6%、18.5%、4.8%、3.6%。四川省攀枝花市、凉山州,云南省红河州、临沧市和贵州省黔东南州建立小桐子培育示范基地共计 40 hm<sup>2</sup> (600 万亩);在河北省邯郸市、安徽省滁州市、陕西省安康市和河南省安阳市建立黄连木培育示范基地共计 25 hm<sup>2</sup> (375 万亩);在湖南省和江西省建立光皮树培育示范基地共计 5 hm<sup>2</sup> (75 万亩);在内蒙古、辽宁、新疆等省/自治区建立文冠果培育示范基地共计 13 hm<sup>2</sup> (200 万亩)<sup>[7-8,10-11]</sup>。

1.3 木本生物柴油原料选择指标及技术体系

李昌珠<sup>[23]</sup>、陈鹏<sup>[24]</sup>、刘火安<sup>[25]</sup>等分别对光皮树果实油、麻疯树籽油、乌桕籽油、黄连木籽油等木本植物油原料生产生物柴油脂肪酸成份(表 1)及理化指标(表 2)进行了深入研究,并提出了理想的木本生物柴油原料应该有较小的酸值(1 g 原料油中游

表 1 主要木本生物柴油原料中脂肪酸的质量分数  
Table 1 The content of fatty acid in different woody bio-diesel feedstock %

种类	棕榈油	硬脂酸	棕榈烯酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	特殊脂肪酸
麻疯树籽油	18.20	1.80	—	47.30	32.70	—	—
光皮树果实油	16.54	1.77	0.97	30.50	48.50	1.60	—
乌桕籽油	7.72	2.46	—	15.93	29.05	39.54	十七烷酸 1.75
黄连木籽油	17.50	0.92	0.99	47.32	31.58	1.69	

表 2 木本植物油生产的生物柴油和石化柴油的主要理化特性<sup>[13,21,23-28]</sup>  
Table 2 Physico-chemical Properties of 4 feedstock's methyl ester and diesel fuel

理化指标	光皮树果油	麻疯树籽油	乌桕籽油	黄连木籽油	0#柴油
密度(20 ℃)/(g/cm <sup>3</sup> )	0.856	0.874	0.890	0.895	0.800~0.900
运动粘度(40 ℃)/(mm <sup>2</sup> /S <sup>2</sup> )	5.24	4.34	6.43	3.70	3.0~8.0
闪点(闭杯)/℃	162	130	120	149	55
十六烷值	54.00	52.70	43.00	70.40	>45.00
凝固点/℃	0	1	<0	0	<4
酸值/(mg/g)	0.15	0.20	0.23	0.16	<7.00
色度/号	1.8	1.6	1.5	2.0	<3.5
w(水)/%	痕迹	痕迹	0.2	痕迹	痕迹
w(硫)/%	0.000 015	0.000 010	0.000 010	0.000 020	<0.2
w(灰份)/%	0.005	0.002	无	无	<0.01

离酸所需氢氧化钾(KOH) $<1$  mg)、水分和杂质,原料油中脂肪酸组成尽可能的存在长链的,没有分支结构的脂肪酸,直链的且二十碳链以下的脂肪酸占油分中脂肪酸组成的多数,原料油中含较少的含有N、S元素、长链烷烃、长链烯烃甚至苯环的复杂的高分子量物质。

#### 1.4 木本植物油转化为生物柴油的工艺技术

生物柴油生产方法可分为物理法、化学法和生物法三大类,每一类均有其优缺点。物理方法包括直接混合法和微乳化法;化学法包括裂解法、酯化法和酯交换法;生物法主要包括生物酶法。我国早在20世纪30年代开始研究植物油制造液体燃料<sup>[3-4,6]</sup>。目前,国内一些单位,如中国林业科学院、北京化工大学、北京林业大学、四川大学、湖南林业科学院等,对木本植物油制备生物柴油的原料油的预处理、催化剂(含固体酸碱催化剂、固定化酶催化剂)筛选、制备工艺优化和产品质量检测进行了大量的研究,并开展了小型的工业试验和中试生产示范<sup>[24-31]</sup>。

杨颖<sup>[32]</sup>等对麻疯树预酯化反应中固体酸催化剂进行了研究,制备成本低、催能力强的ST-II固体酸;李迅等<sup>[33]</sup>对全细胞生物催化麻疯树油制备生物柴油的进行了研究,并采用米根霉(*Rhizopus oryzae*)菌株和聚氨酯泡沫制备固定化全细胞生物催化剂;李昌珠<sup>[34]</sup>等对碱性离子液体催化光皮树果实油制备生物柴油进行研究,并制备出新型离子液体[Brnim] OH。周慧等<sup>[35]</sup>以麻疯树油为原料,在油醇摩尔比为1:6, KOH为催化剂(用量为油质量的1.3%), 64℃条件下反应20 min,甲酯收率达98%以上。丁荣<sup>[30]</sup>以光皮树果实油为原料,采用氯化镁饱和溶液反应体系,在醇油摩尔比为3:1,固定化酶Lipozyme TLIM用量为光皮树油质量的20%,摇床转速150 r/min,反应8 h时,生物柴油转化率最高;龙川<sup>[27]</sup>研究了乌桕梓油酯交换反应的因素,确定的最佳反应条件是:醇油摩尔比7:1,催化剂与油的质量比为1.4%,反应温度55℃,反应时间60 min;张寿鑫<sup>[31]</sup>以黄连木油为原料,确定最佳条件是,油醇摩尔比1:6、催化剂用量为油质量的1.2%,反应时间2 h,反应温度60℃,转化率为96.0%。

#### 1.5 木本生物柴油原料研究存在的问题

目前对于木本生物柴油原料的研究存在如下几个主要问题:

1)木本油料植物作为新型的生物柴油原料学科地位尚未明确,木本油料植物育种、定向栽培、原料收获、原料油制取、原料油转化生物柴油工艺技术标准有待系统制定。对木本油料植物的分布、资源状况并不十分清楚。我国木本油料植物资源丰富,种类繁多,虽然在理论、宏观层面上有一个量的概念,也建立了数学模型与液体能源数据库<sup>[7-8,10,36]</sup>,但对不同区域木本油料植物资源的蕴藏量,尤其是在某一区域内如我国的多数省份内均未有确切甚至大约的资料及研究,特别是对一个区域的能够用于获取生物柴油高品位的木本生物柴油植物资源的分布区域,面积,最高、最低及平均产量,总体及各器官的含油率及储油数量情况调查分析较少<sup>[37-38]</sup>。

2)主要木本油料树种遗传规律、良种遗传改良、良种繁殖技术应用基础研究有待进一步加强,产量低、含油率低有待新的突破和创新。培育技术不能适应产业快速发展的要求,没有建立规模的良种繁育基地和采穗圃。

3)缺乏与木本生物柴油原料树种相配套的培育技术标准或产品标准。我国木本油料资源化利用项目刚刚兴起,原料资源以现有野生资源为主,自然分布密度低,资源收集和处理机械化程度也相对较低,生产成本高,可利用规模较小,在应用生态学原理,模拟自然生物群落的结构,提高集约地的单位效益,以使木本生物柴油植物生产的单位效益达到最高等方面的研究不足<sup>[36,38]</sup>。

4)在木本生物柴油原料产业发展的起步阶段,我国当前的生物质能发展政策存在诸多不足,对整个产业的支持力度不够;加上人们对发展木本粮油的认识不到位,重视程度不够,价值认知不足;以及比较效益相对较低,农民缺乏再生产的积极性,整个产业链各个环节都存在着许多阻碍。

## 2 我国木本生物柴油原料产业化前景及展望

近年来,我国政府明确提出发展生物柴油“不与口争粮,不与粮争地”的基本国策<sup>[5-7,9]</sup>。木本生物柴油原料产业发展符合国家产业政策和林业生态工程建设和项目实施区域社会经济可持续发展的要求。木本生物柴油原料产业以木本油料植物种树良种培育与木本生物柴油开发为切入点和立足点<sup>[7-9]</sup>,将科研与生产相结合,以提高经济产出为突破口,以生态治理、社会持续发展的经济增长方式促进循环经济的发展,木本生物柴油原料逐渐受到国家和地方政

府的重视。虽然,目前我国生物柴油原料目前仍将以废弃油脂为主,但随着生物柴油产业的深入发展,木本生物柴油将在我国未来生物柴油市场占据主导地位,木本生物柴油原料发展潜力巨大<sup>[10]</sup>。

从社会需求、产业发展方向、技术条件、经济实力、资源基础来看我国具备木本油料能源产业形成与发展的外部条件。建国以来,我国有关科研、教学单位的许多科技工作者在木本油料方面做了大量的科学研究工作,积累了丰富基础资料,并取得了丰硕的成果,形成了木本植物油生物柴油技术指标评价体系、木本植物油育种技术体系和定向培育技术体系、木本植物原料油加工和转化生物柴油技术体系。

木本油料树种大多具有抗干旱、耐瘠薄、适应性强、丰产性能好等优点。利用荒山荒坡大力发展富含油脂的木本林地,以其种子作为原料生产生物柴油具有多重优势。如不与粮争地,有利于绿化,可以增加农民的种植种类、拓宽农民脱贫致富的渠道。我国还有5 400万 $\text{hm}^2$ 宜林荒山荒沙地和1亿 $\text{hm}^2$ 的边缘性难于利用的土地,可以种植3 600万 $\text{hm}^2$ 油料能源树种,建设“绿色油田”和生产生物柴油,改善生态环境,提高土地利用效率,其战略意义与开发潜力巨大<sup>[38-39]</sup>。

### 3 木本生物柴油原料发展建议及措施

首先,完善我国木本生物柴油原料发展产业政策。应该遵循产业发展的特点,充分考虑新兴资源培育周期性、我国国情以及产业链上各环节的关联性这种纵横交织的思路。在产业发展初期,主要目的是构建可以推动木本油料能源产业发展的政策体系,为其之后步入产业化做好政策铺垫,这一阶段产业发展以政府支持导向为主;规模经营开始出现,产业体系开始形成,该阶段主要是对木本油料能源产业发展的政策体系不断优化完善,政策重心是推动木本生物柴油进入市场,增强其竞争能力以及加大研发环节的资金投入,实现关键性技术的突破,该阶段的政策仍以政府主导,市场自主调节为辅;随着木本油料能源产业化的实现,行业发展逐步走向规范化、市场化,拥有持续稳健的发展前景,木本生物柴油竞争实力的大幅增强,相关优惠政策与补贴逐渐取消,此阶段木本油料能源产业发展主要依赖市场自发调节,政府作用及政府行为只起辅助作用。

其次,加强科学研究,组织力量对木本生物柴油原料提高产量和含油率为重点的关键技术进行科研

攻关。组织力量对我国木本油料资源的数量、分布、生物学特性进行调查,摸清我国木本油料资源,建立中国木本油料资源信息系统,为我国木本油料资源的合理开发利用与保护提供科学依据;采用基因工程等技术改良木本油料植物品种,提高其含油率与产量,降低生产成本;突破木本油料植物生产生物柴油技术与工艺,综合利用木本生物柴油原料,获得巨大的经济效益、社会效益以及生态效益,避免资源浪费。

最后,加强宣传教育,使有关教育、生产、科研和宣传部门的领导对发展木本油料事业有一个正确的认识 and 了解。利用多种宣传工具进行广泛宣传,让更多的人认识木本油料的道理、条件和切身利益。各林业部门应尽快建立相关机构,研究制定本地区木本油料发展规划,多渠道筹措资金,组织人员进行产品和市场开发,逐步建立起由市场牵龙头企业建基地、基地连农户种植的运行模式,促进木本生物柴油原料产业快速、健康、有序、协调地发展。

### 参 考 文 献

- [1] 李晓辉. 开发生物柴油势在必行[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(4): 145-147
- [2] 滕虎, 牟英, 杨天奎, 等. 生物柴油研究进展[J]. 生物工程学报, 2010, 26(7): 892-902
- [3] 闵恩泽, 唐忠, 杜泽学, 等. 发展我国生物柴油产业的探讨[J]. 中国工程科学, 2005, 7(4): 1-4
- [4] 吴明作, 黄黎, 张百良, 等. 国内外木本生物柴油的应用研究现状及我国的研究展望[J]. 西部林业科学, 2007, 36(2): 129-134
- [5] 马超, 尤幸, 王广东. 中国主要木本油料植物开发利用现状及存在问题[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 330-333
- [6] 中国油料植物编写委员会. 中国油料植物[M]. 北京: 科学出版社, 1987
- [7] 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
- [8] 周鸿彬, 秦泉, 李军民, 等. 木本油料树种良种选育工作势在必行[J]. 湖北林业科技, 2010, 5(2): 51-53
- [9] 樊金拴. 我国木本油料生产发展的现状与前景[J]. 经济林研究, 2008, 26(2): 116-122
- [10] 刘轩. 中国木本油料能源树种资源开发潜力与产业发展研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011
- [11] 张华新, 庞小慧, 刘涛. 我国木本油料植物资源及其开发利用现状[J]. 生物质化学工程, 2006, S1: 291-302
- [12] 林娟, 周选围, 唐克轩, 等. 麻疯树植物资源研究概况[J]. 热带亚热带植物学报, 2004(12): 285-290
- [13] 张彪, 何文广. 麻疯树研究进展[J]. 可再生能源, 2011(1): 53-55

- [14] 余帅勇,丁贵杰.能源植物麻疯树研究进展[J].贵州林业科技,2009,37(1):49-54
- [15] 李远发,梁葵华.麻疯树资源分布及其应用研究[J].广西农业科学,2009(3):311-314
- [16] 谢风,潘斌林,等.光皮树研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(7):2961-2962
- [17] 向祖恒,张日清,李昌珠.武陵山区北部野生光皮树资源调查初报[J].湖南林业科技,2010,37(3):1-5
- [18] 楼浙辉,郭赋英,邓习金,等.江西省栎木属种质资源及开发利用[J].江西林业科技,2010(1):12-13
- [19] 李冬林,黄栋,王瑾,等.乌桕研究综述[J].江苏林业科技,2009,369(4):43-46.
- [20] 裴会明,陈明琦.黄连木的开发利用[J].中国野生植物资源,2005,24(1):43-44
- [21] 祝学范.安徽省生物柴油原料林黄连木的造林技术研究[J].安徽农业科学,2007,359(28):8890-8891
- [22] 王忠武.我国木本油料产业发展现状与对策[J].林业资源管理,2012,2(1):11-16
- [23] 李昌珠,蒋丽娟,陈树棋.四种木本植物油制取生物柴油[C]//中国太阳能学会生物质能专业委员会.2004年中国生物质能技术与可持续发展研讨会论文集.北京:中国科技出版社,2004:45-48
- [24] 陈鹏.四种植物油及其生物柴油脂肪酸组成性质的比较研究[D].成都:四川大学,2007
- [25] 刘火安,姚波.乌桕油脂成分作为生物柴油原料的研究进展[J].基因组学与应用生物学,2010,29(2):402-408
- [26] 王鑫.柴油机燃用黄连木籽生物柴油的燃烧及排放特性[D].洛阳:河南科技大学车辆与动力工程学院,2010.
- [27] 龙川.生物柴油原料树种综合评价及乌桕基 FAME 的开发利用[D].福建福州:福建农林大学,2008
- [28] 胡志远,孙晓清.共轨柴油机燃用麻疯树制生物柴油的性能及排放特性[J].农业工程学报,2011,27(1):308-312
- [29] 冯兵.光皮树籽生物柴油的酶促合成技术研究[D].长沙:湖南农业大学,2010
- [30] 丁荣.固定化脂肪酶催化光皮树油脂合生物柴油[D].长沙:中南大学,2010
- [31] 张寿鑫.黄连木制备生物柴油的研究[D].河北邯郸:河北工程大学,2011
- [32] 杨颖.麻疯树油制备生物柴油固体酸催化剂的研究[D].成都:四川大学,2007
- [33] 李迅,李治林.全细胞生物催化麻疯树油制备生物柴油的研究[J].现代化工,2008,28(9):57-61
- [34] 李昌珠,张爱华,肖志红,等.用碱性离子液体催化光皮树果实油制备生物柴油[J].中南林业科技大学学报,2009,12(3):22-26
- [35] 周慧,鲁厚芳,唐盛伟,等.麻疯树油制备生物柴油的酯交换工艺研究[J].应用化工,2006,11(4):284-287
- [36] 王曦,龙春林.云南小桐子资源调查与评价[J].云南植物研究,2009,31(5):455-460
- [37] 马葵,朱玮.木本油料生产生物柴油研究[J].西北林学院学报,2007,22(6):125-130
- [38] 王星懿,董利民.中国木本油料与生物质能源发展问题研究[J].江汉论,2010,11(8):24-26
- [39] 赵晨,付玉杰.研究开发燃料油植物生产生物柴油的几个策略[J].植物学通报,2006,23(3):312-319

责任编辑:刘迎春