

中国生物液体燃料规模化发展研究

(专题报告二)

中国非粮生物液体燃料试点示范 技术选择与评价

国家发展和改革委员会能源研究所

可再生能源发展中心

2008年8月

目 录

一、技术选择的基本原则.....	1
二、技术发展和评价.....	1
(一) 粮食(含甘蔗、糖蜜等原料)乙醇	1
(二) 木薯乙醇	3
(三) 甘薯乙醇	4
(四) 甜高粱乙醇	4
(五) 纤维素乙醇	6
(六) 生物柴油	7
(七) 生物质裂解油	9
(八) 生物合成燃料	10
二、生物燃料技术经济性分析	11
(一) 生产成本估计	11
(二) 影响成本的因素及分析	13
三、能量环境效益及分析	15
(一) 国外研究分析的结论	15
(二) 国内研究的初步结论	16
四、原料供应潜力分析	18
(一) 木薯	18
(二) 甘薯	19
(三) 甜高粱	20
(四) 油料植物	20
五、总体评价和结论.....	21
附表 1 部分生物液体燃料技术经济指标的比较	22
附表 2 部分生物燃料乙醇原料资源技术特点	24
附表 3 部分生物柴油原料资源技术特点	25

一、技术选择的基本原则

从理论上说，任何生物质能都可以通过一定的手段转化为液态燃料。由于生物质能多种多样，转化工艺技术多种多样，因而转化产品也多种多样。从现行技术看，目前研究较多，技术进步较快，产业发展前景比较明朗的生物燃料主要是以下几种：粮食（含甘蔗）燃料乙醇、木薯燃料乙醇、甘薯燃料乙醇、甜高粱乙醇、纤维素乙醇、生物柴油、热裂解油和生物合成燃料等。

技术（工艺）的选择是工程示范的第一步，也是工程示范的前提和基础。技术选择正确与否，直接关系到示范工程的成败，甚至对整个示范工程的预期目标和生物燃料产业的发展也有重要影响。因此，试点示范技术的选择必须综合考虑并遵循以下原则和要求：

1. 技术原理清晰、可行，工艺系统合理，转化效率高，研究试验基础好，技术基本成熟，具备扩大应用试验和产业化条件。
2. 生产成本相对较低，经济效益相对较好；或现阶段生产成本高，但远期生产成本低，潜在效益好，具有较大的市场前景。
3. 能量转换效率高，能耗低，减排效益好。
4. 原料来源丰富，开发潜力大。
5. 在地区上要有典型性和代表性，地区辐射作用强。
6. 适合中国国情，有助于“三农”问题的解决。

二、技术发展和评价

（一）粮食（含甘蔗、糖蜜等原料）乙醇

粮食乙醇是指以玉米、小麦或甘蔗等食用作物为原料生产的燃料乙醇。目前，国内外乙醇的生产基本上都是通过微生物对葡萄糖的发酵而实现的。其生产过程大体上可分为三个阶段：大分子物质（包括淀粉及纤维素和半纤维素）水解为葡萄糖、木糖等单糖分子；单糖分子经糖解形成 2 分子丙酮酸；丙酮酸在无氧条件下还原为 2 分子乙醇，并释放 CO₂。生产乙醇的粮食原料多种多样，除了玉米、小麦等淀粉质原料，还有甘蔗、糖蜜等糖质原料。典型的玉米、小麦等淀粉质原料生产乙醇工艺流程如图 1 所示。

早期的乙醇生产工艺存在能耗高、反应速度慢、原料利用率低等缺陷。经过多年的研究和开发工艺技术已得到多方面改进。如低温技术的应用，使蒸煮温度由原来的 100℃ 及以上，降低为 50℃，显著降低了能耗；同步糖化发酵新工艺的开发实现了糖化和发酵同步进行，取消了单独的糖化过程，既节省糖化设备，降低染菌几率，又减少了高糖度对酵母的抑制作用；节能蒸馏技术、新型脱水设备以及其它新技术新工艺的应用致使燃料乙醇生产技术日臻完善和成熟，成为生物

质能液态燃料转换技术中最成熟、最有效的一种。因而燃料乙醇的生产规模迅速扩大。到 2006 年全球燃料乙醇产量已超过 4050 万吨，其中巴西、美国的生产量都在 1300 万吨以上。

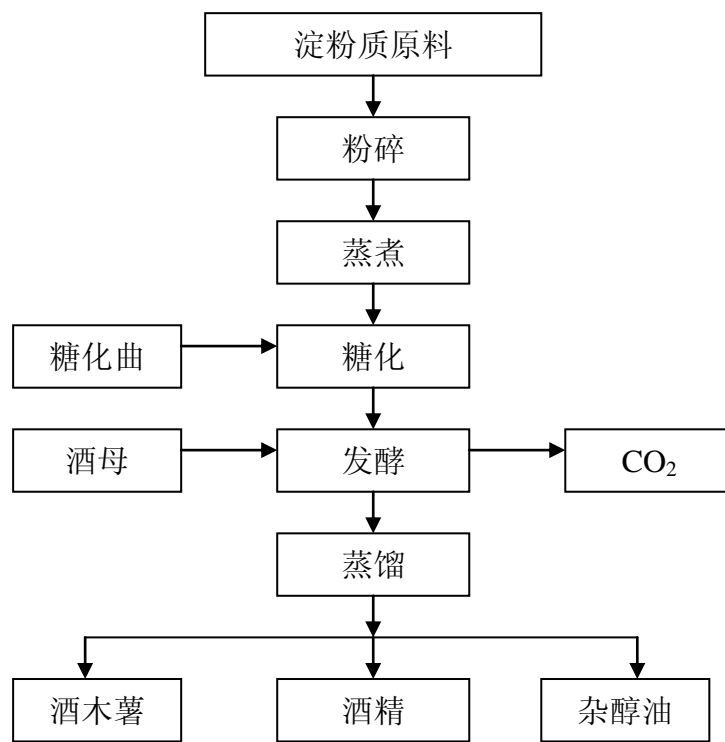


图 1 玉米、小麦质原料生产乙醇工艺流程

巴西是世界上最早利用甘蔗燃料乙醇的国家。巴西幅员辽阔，光热条件好，雨量充沛，土地资源丰富，适宜甘蔗生长。为了减少石油进口，上世纪 70 年代，巴西政府实施了“燃料乙醇计划(ProAlC001)”，要求车用汽油中添加一定比例的燃料乙醇，并安排资金支持甘蔗品种改良和种植，改进酒精生产工艺，开发车用燃料乙醇技术，对生产商和汽车生产商减征产品税。经过 30 多年的努力，巴西燃料乙醇生产应用已取得巨大成功。到目前为止，巴西全国约有 520 多家以甘蔗为原料的燃料乙醇生产厂，已形成年产 160 亿升燃料乙醇的生产能力。2006 年，巴西燃料乙醇产量近 1350 万吨，约占全球乙醇产量 4050 万吨的 33%。同时，巴西全国建立了较完善的乙醇供销系统，所有加油站都设置了添加燃料乙醇汽油的装置。出售的燃料乙醇汽油主要有三个品种：纯乙醇(无水酒精)、乙醇汽油(22%乙醇+78%汽油)和混合燃料(60%乙醇+33%甲醇+7%汽油)。目前，燃料乙醇的

使用量已占到巴西车用燃料使用总量的 1/3。实施燃料乙醇计划给巴西带来显著效益，一是形成了独立的能源经济运行系统，增强了石油供应的安全性；二是污染物排放明显减少。

以甘蔗为原料，工艺相对简单，无需淀粉原料的蒸煮、糖化等过程，既省能，又节约投资，生产成本可控制在 16 美分/kg 以下。同时，巴西自然条件优越，甘蔗产量高，并可轮作，能做到全年供应，也是巴西燃料乙醇生产成本所以较低的原因之一。

美国从上世纪 90 年代开始加大对燃料乙醇发展的支持力度，利用其农业资源条件好的优势，大规模种植玉米，生产燃料乙醇。通过减税和补贴(每加仑燃料乙醇补贴 51 美分)政策，鼓励燃料乙醇的生产和使用，使燃料乙醇年产量从 1994 年的 500 万吨，增加到 2006 年的 1680 多万吨，已成为世界燃料乙醇生产和消费量最多的国家。在美国，燃料乙醇一方面用作汽油添加剂，以替代已被禁用的 MTBE，目前美国 70% 的车用汽油都使用乙醇添加剂；另一方面就是掺入汽油作为车用燃料。迄今全美已有 500 万辆以燃料乙醇汽油为燃料的灵活燃料汽车 (FFV)。去年福特通两大汽车公司还计划生产 48 万辆灵活燃料汽车。

我国从 2002 年开始用陈化粮生产燃料乙醇，目前已完成在东北三省以及山东、江苏、河南、安徽等 9 省区推广应用的试点示范工作，推广规模达到 102 万吨。在汽油中掺入 10% 左右，汽车运行正常。实践证明，粮食燃料乙醇生产技术成熟，工艺完善，已成为目前最现实的石油替代燃料。

当前存在的主要问题是原材料消耗多、生产成本高，需要国家大量补贴。

到目前为止，我国还没有利用甘蔗和糖蜜来生产燃料乙醇的企业，但利用这些原料生产食用乙醇却为数不少。从原料消耗量来说，约占发酵法原料消耗量的 17%。燃料乙醇和食用乙醇的生产技术基本相同，只是后续过程中需增加脱水、调配等环节，技术不成问题。但甘蔗系民生必需食品，糖蜜系甘蔗加工的副产品，产量有限，大约只有甘蔗加工量的 3%，所以，是否应将甘蔗和糖蜜燃料乙醇作为今后大规模开发利用的重点需要谨慎对待。

(二) 木薯乙醇

木薯与马铃薯、甘薯并列为世界三大薯类作物。我国是盛产木薯的国家之一，拥有较大的开发利用潜力。

木薯属淀粉原料，淀粉含量 22-33% (鲜薯)，一般 7.8 吨鲜薯，可制 1.0 吨乙醇。其生产工艺与玉米乙醇过程相似，即通过粉碎、蒸煮、液化、糖化、发酵、蒸馏、脱水等工艺得到乙醇，技术上是成熟的；另一方面，木薯种植可利用荒地和劣质地，不与粮食争地；第三，我国拥有用木薯酿酒的基础，2005 年全国木薯酒精产量已达 30 万吨，主要用于勾兑食用酒；第四木薯乙醇的生产成本比玉米

乙醇生产成本大致相当，一般可控制在 4300 元/吨以内，详情见后文。

但是，木薯在生长过程中还存在着种植粗放、产量不高、贮存技术落后、淀粉损失大，能耗高、污染大等问题，这些问题需要通过试点示范予以改进，以加快其产业化过程。

（三）甘薯乙醇

甘薯属淀粉质原料，鲜甘薯淀粉含量 20% 左右。理论上 1.8 吨淀粉可生产 1 吨燃料乙醇，实际生产按理论值的 90% 计算，2 吨淀粉才能生产 1 吨燃料乙醇，即 10 吨鲜甘薯生产 1 吨燃料乙醇。

我国是世界甘薯生产大国，2003 年产量达到 1.076 亿吨，约占世界甘薯总产量的 90%。我国甘薯产量虽大，但加工量小。据估计，用于加工淀粉的甘薯只有总产量的 10%；除此之外，大部分作为饲料（约占 50%）、少部分留作种子（约占 10%），其余部分（约 30% 的）甘薯在贮存过程中烂掉。

甘薯适生范围广，产量高（优良品种可达 2.0 吨/亩以上），还可利用田间地头、秋、冬、春闲地和各种作物预留空行套种，不会与粮食发生冲突。生产潜力大。

我国素有用甘薯的酿造食用酒精的传统，技术上不存在不可逾越的瓶颈。近年来，一些地区（如四川省）用纯甘薯生产燃料乙醇开展了一系列研究工作，尤其针对甘薯燃料乙醇生产特点和要求，在甘薯优良品种选育和栽培方面，低能耗鲜薯储藏方面，低能耗水耗高效率生产工艺和资源综合利用方面均进行了研究攻关，并取得可喜成果，为甘薯燃料乙醇的发展奠定了良好的基础。

（四）甜高粱乙醇

甜高粱又称糖高粱，其籽粒既可食用又可作饲料，也是酿酒和制取乙醇的优质原料。种植甜高粱每公顷可生产粮食 2~7 吨，同时还产含糖的鲜茎秆 30~50 吨/公顷，可以粮、糖兼收，故有“高能植物”之称。

甜高粱属于糖类原料，它的茎秆富含糖分，主要是蔗糖、葡萄糖和果糖。不同品种的甜高粱所含糖型比例不同。

糖类原料所含的糖粉主要是蔗糖，是一种由葡萄糖和果糖通过糖苷键结合的双糖，在酸性条件下可水解为葡萄糖和果糖。酵母菌或水解蔗糖为葡萄糖和果糖，并在无氧条件下发酵葡萄糖和果糖生产乙醇。

如前所述，用淀粉类原料生产乙醇，必须经过粉碎、拌浆、蒸煮、糖化等过程的处理，才能被酵母菌发酵利用，生产出乙醇。而利用糖类原料生产乙醇时，就不需要以上工序。

用甜高粱茎秆制取的乙醇工艺流程工序，如图 2 所示。

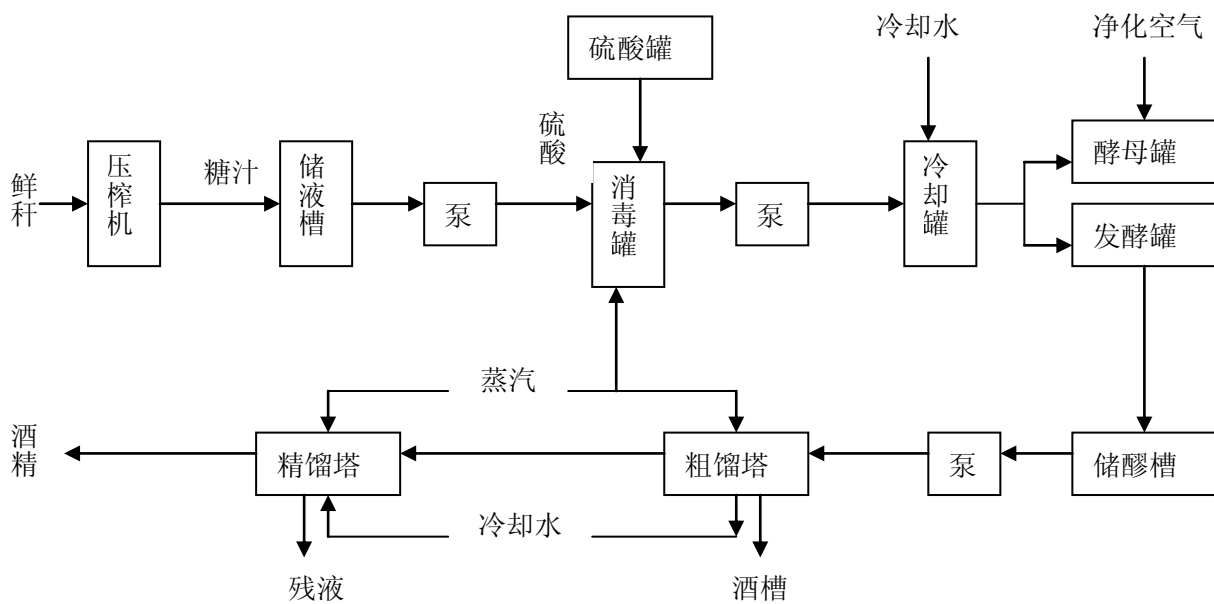


图 2 甜高粱秆生产乙醇工艺流程图

早在 20 世纪 70 年代，巴西、阿根廷、美国、南非以及我国，先后开始了用甜高粱茎秆汁液制糖的研究，并取得成功。80 年代初，我国的河南、辽宁、内蒙等地开始利用甜高粱茎秆生产白酒。80 年代中期，沈阳农业大学研究用甜高粱茎秆汁制取乙醇，并进行了乙醇作内燃机燃料试验，取得了宝贵的经验。

1996 年，国家科技部支持在内蒙呼和浩特市建立了“高能作物甜高粱开发与综合利用产业化示范工程”，主要目标是：建立甜高粱种子繁育基地与生产基地；建立甜高粱茎秆制取乙醇生产线；利用乙醇废渣制取饲料并供应饲养场；茎秆废渣供造纸厂造纸。该示范工程已于 1999 年 12 月通过验收，为推广甜高粱综合利用技术创造了有利条件。

到目前为止，甜高粱制取乙醇技术取得实质性进展，已开发出高品质杂交甜高粱种子；自主开发的固体、液体发酵工艺和技术达到实用水平，并在黑龙江省

建成年产 5000 吨乙醇的示范装置，生产成本可控制在 3600 元/吨以下（详情见后文）。初步具备了规模化开发燃料乙醇的技术经济基础。

以甜高粱为原料生产乙醇可获得多方面效益：其茎秆汁液制取乙醇，乙醇产后废渣制取柴油，甜高粱籽粒和枝叶仍可作粮食和饲料用途。这种思路既可增加清洁能源，又能促进农业产业发展，增加农民收入，还不与人争粮，也不与粮争地。

（五）纤维素乙醇

纤维素生产乙醇的研究已有几十年的历史。其基本技术原理是通过水解将原料中的纤维素转变为单糖，然后再把单糖发酵转化成为乙醇，一般工艺流程如图 3 所示。

同其它燃料乙醇技术相比，纤维素乙醇具有以下突出优点：资源丰富、来源广泛,不存在资源不确定性问题；可利用废弃物生产乙醇，变废为宝，有利于改善生态和环境，符合发展循环经济的要求，还能增加农民收入。因此，近年来纤维素水解生产乙醇被认为是最具有开发利用前景的技术之一，已成为一些国家竞相研究开发的重要课题。美国能源部支持了投资巨大的纤维素乙醇中试及产业化投资项目，旨在利用木材、稻草、玉米秸等含纤维素的农林废弃物生产燃料乙醇。布什总统在 2006 年国情咨文演讲宣布要充分利用美国的才智和技术进步，加大资金投入，在 6 年内（2012 年）使纤维素乙醇的生产成为现实并具有经济竞争性。瑞典提出 2030 年之后，利用纤维素生产的燃料乙醇全部替代石油燃料。

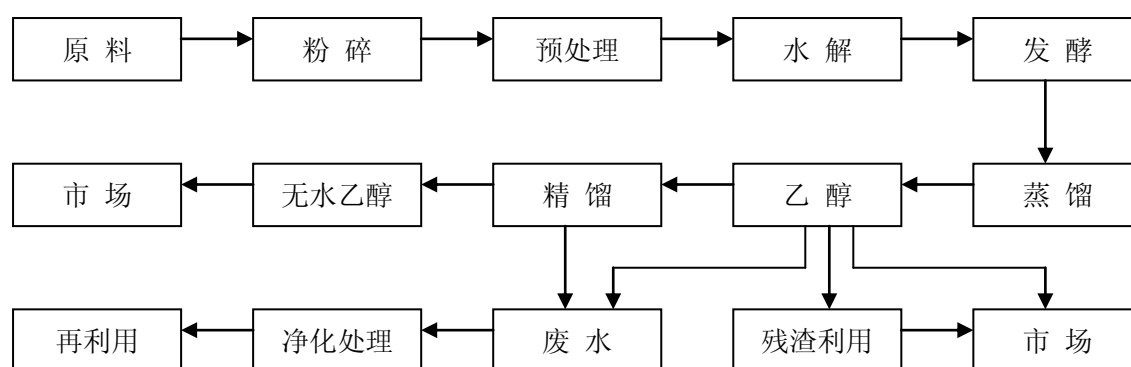


图 3 纤维素原料燃料乙醇生产的一般工艺流程

在政府的支持下，近年来国外纤维素燃料乙醇的研发发展很快，已取得实质性进展。2004 年加拿大 Iogen 公司在渥太华建成了世界首座较大型纤维素试验生产厂，规模达到 3000 吨/年，日处理麦秸 40 吨，每吨麦秸产乙醇 300 升，乙醇生产成本达到 0.4 美元/升的水平。在美国，由国家可再生能源实验室设计建造的

SSCF 工艺系统，成功地实现了单菌产纤维素酶、酶降解纤维素与乙醇发酵同步进行，使乙醇生产中酶的成本比 5 年前下降 30 倍，展现了良好的前景。

我国从 20 世纪 50 年代开始研究纤维素乙醇的制备，通过引进技术和自主开发，曾在黑龙江南岔木材厂、苏州油脂化学厂和北京光华木材厂开展了以木屑、棉籽壳为原料制取乙醇的研究，获得一些成果。进入 90 年代以来，随着国家高技术“863”计划的实施和国家乙醇汽油替代燃料工程的启动，极大地刺激了植物纤维素燃料乙醇的研究和开发，已呈现出勃勃生机。

到目前为止，华东理工大学承担的国家 863 重点课题“纤维素废弃物制取乙醇技术”通过生化法和热转化法的有机结合，制取燃料乙醇的试验规模已达到 600 吨/年。中石油在吉林燃料乙醇公司进行以玉米秸秆为原料的年产 3000 吨燃料乙醇工业化示范项目研究论证。河南天冠集团与山东大学、河南农业大学合作，在纤维素原料预处理和乙醇转化技术开发方面取得进展，即将进行纤维素酶的工业化转化。安徽丰原集团与国内有关大专院校共同研究，在原料预处理、纤维素酶的培育等方面取得初步成果，建成了年产 300 吨秸秆乙醇的中试装置。除此之外，还有不少的机构和单位(如南京工业大学、清华大学等等)目前都积极地开展了这方面研究，也取得一定的结果。但是，从总体来说，该项技术尚不成熟，还有不少关键性的技术问题尚待研究解决；不过同国外相比，差距并不大，前景很好。

(六) 生物柴油

生物柴油是利用动、植物油脂生产的一种脂肪酸甲（乙）酯。制造生物柴油的原料多种多样。既可以用各种废弃的动植物油，如地沟油、工业废油等，也可以用含油量高的油料植物，如油茶籽、大豆、小桐子树、黄连木等。

目前，国内外生物柴油生产技术主要以化学法为主，即采用植物油（或动物油）与甲醇或乙醇在酸、碱性或生物酶等催化剂作用下进行酯交换反应，生成相应的脂肪酸甲酯或乙酯燃料油。生物柴油生产的一般工艺流程如下图：

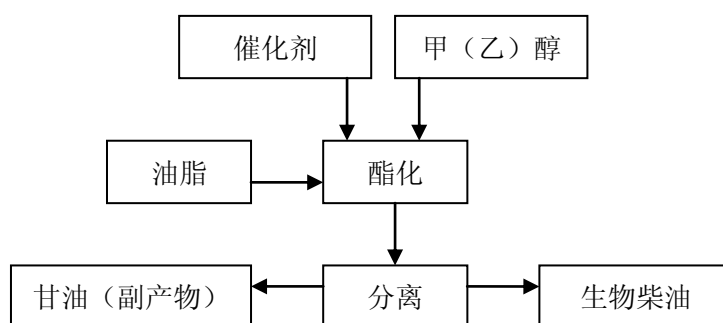


图 4 生物柴油生产的一般工艺图

化学法生产生物柴油有以下缺点：工艺复杂、一般为 6: 1 的醇油比，醇回收量大，能耗高；反应物停留时间长，色泽深；由于一般采用常规 NaOH 或 KOH 为催化剂，有副产物脂肪酸皂生成，要用水洗和酸洗等步骤，后处理过程复杂，且生产过程有含油废酸碱液排放，环境成本高。为此，近几年来国内外较多研究采用脂肪酶催化酯交换生产生物柴油，即用动物油脂和低碳醇通过脂肪酶进行转酯化反应，制备相应的脂肪酸酯。酶法具有反应温度低，节省能源的特点，而且不破坏油脂有效成份，可以回收甘油等成份。对生物柴油加工过程综合利用，降低成本有重要作用。

酶法对油脂的选择性小，既可以处理普通的植物油脂，还可以直接处理废油如地沟油、甘水油等，对酸值很高的废油转化率仍可以达到 95% 以上。采用固定化酶反应器的连续酯交换工艺流程如下图所示。

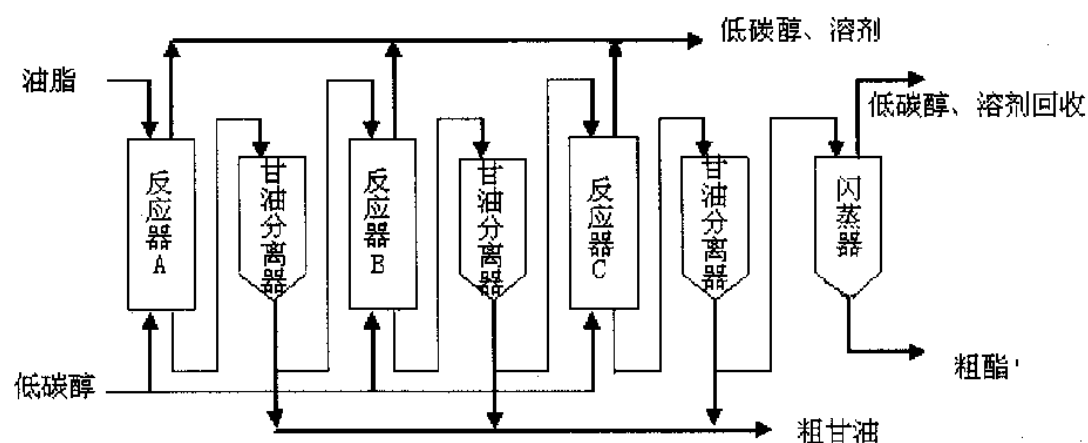


图 5 固定化脂肪酶连续酯交换工艺流程图

以上反应经分离耦合几级后，可大大提高反应转化率，同时回收了反应产物甘油，降低了水及甘油对固定化酶的毒性，可延长固定化酶的使用寿命，从而降低生产成本。根据各段反应后的油脂含量及脂肪酸酯含量确定下一段的反应条件如乙醇加入量等，根据最终要求脂肪酸转化率高于 95% 决定多段反应段数。

实验研究证明，生物柴油不仅具有良好的燃烧和减排性能，还有良好的理化特性和动力特性。

- 生物柴油的主要性能指标符合车用柴油机国家标准，其中硫的含量仅为 7.2mg/L，远低于车用柴油的硫含量。
- 在柴油机供油系统没有进行任何调整的情况下，燃用纯生物柴油，柴油机的动力性没有明显变化，柴油车（机）启动性能满足国家标准。但以质量计算的油耗比化石柴油略有增加；当使用含有 20% 生物柴油的混合

柴油时，柴油机的动力性、比油耗基本保持不变。因此，在实际应用中，应考虑使用混合燃料。

- 生物柴油具有明显的降低柴油稠度和微粒排放的效果。其中 CO 减少 16%，HC 减少 18%，微粒减少 38%，但 NO_x 排放略有上升，达到 4%。

国外通常采用大豆（美国）和油菜籽（德国、意大利、法国等）生产生物柴油，其成本高达 34-59 美分/kg。为了降低成本，一些国家开始利用废弃食用油和专门的木本油料植物生产柴油，其生产成本分别下降到 20 美分/kg 和 41 美分/kg 左右。

目前生物柴油在欧盟已大量使用，进入商业化发展阶段。2005 年欧盟的生物柴油产量超过 300 万吨，其中，一半以上是德国生产的。目前德国有 23 个生物油生产厂、1800 个加油站，并颁布了工业标准（EDIN51606）。欧盟计划 2010 年生物柴油产量要达到 800-1000 万吨/年。

中国人口多，食用油需求量大，其原料来源只能靠发展非食用油料资源，例如小桐子、黄连木等野生和人工栽培的不占用耕地的油料植物以及废弃油料等资源。

因此，目前我国生物柴油的生产主要使用餐饮废油、工业废油和小桐子油以及油菜籽、棉籽油等下脚料为原料。餐饮废油来源广泛，有一定的数量。用废弃油制取生物柴油，既解决环境污染问题，又变废为宝，有利于资源回收利用；小桐子等野生油料植物品种多，生长地域辽阔，潜力大，开发利用既有利于增加清洁能源供应，又有利于脱贫致富，发展农村经济，增加农民收入。

我国生物柴油的生产起步较晚，但发展较快。目前已有 30 多家柴油生产厂。生产规模都不大，一般都在 2.0 万吨/年以下，大部分以工业废油和废食用油为原料，生产成本估计 3500 元/吨油左右。少数以小桐子为原料，估计生产在 4200 元/吨以上，参见表 2 和附表 1。

当前废食用油生物柴油的问题是：缺乏统一指导和帮助，基本上系企业自发行为，小打小闹，未形成规模；二是原料资源底数不清，收集成本高；三是缺乏规划和布局，重低水平重复建设，影响效益发挥。小桐子、黄连木等柴油生产存在的最大问题，一个原料供应存在不确定性，适于原料生长的土地资源不清；二是生产成本偏高，需要加强示范，逐步降低。

（七）生物质裂解油

裂解油是生物质在中温（500-600℃）、高加热速率（104-105℃/S）和极短气体滞留时间（约 2S）的条件下，发生直接热解，产物经快速冷却，中间液态产物分子在进一步断裂生成气体之前冷凝，得到高产量的生物质液体油，液体产率可高达 70-80wt%。气体产率随着温度和加热速率的升高及停留时间的延长而增加，较低的温度和加热速率会导致物料的碳化使固体生物质炭产率增加。

热裂解液化的一般工艺流程包括物料的干燥、粉碎、热裂解、产物炭和灰的分离、气态生物油的冷却和生物油的收集等部分，见下图。

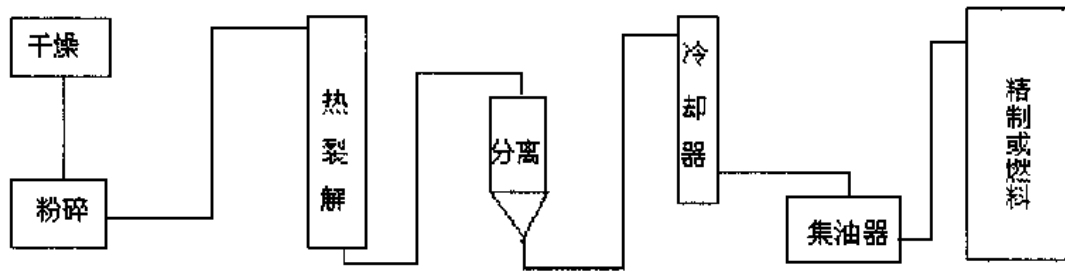


图 6 生物质直接液化工艺流程示意图

生物质热裂解工艺系统较简单，成本较低，原料来源广泛，已成为世界生物质能转换的前沿技术，受到一些国家的重视。美国建立了不同裂解方法的实验装置，每小时生产容量从几十公斤至几百公斤，产油率最高达 70%。意大利也已建立每小时 500 公斤的装置。加拿大开发了多种工艺，并有较大的实验装置（每日加工能力 200 吨）问世。

生物质热裂解油不仅可作锅炉和其他加热设备的燃料，通过进一步分离和提炼，还可作为内燃机燃料。从寻求石油的替代燃料角度考虑，近十几年，世界许多国家都加强了生物质快速裂解的研究。

我国在这方面的研究起步较晚。近年来，沈阳农业大学(以木屑为原料)、浙江大学(以木屑和秸秆为原料)、中国科技大学（以木屑、稻壳等为原料）、中科院过程工程所(以玉米秸秆和锯末为原料)等单位也开展了类似的研究试验，也取得一定成果。其中，由东北林业大学负责的生物裂解油课题(以林业废弃物为原料)，研究试验规模已达 400 吨/年的水平。

一般说，生物质裂解油的化学组分相当复杂，不易分离提纯，难以达到燃料油的标准，所以目前生物质热裂解液化技术尚处于实验室研究阶段，少数进入了中试。

（八）生物合成燃料

生物质合成燃料的生产过程是通过热化学和化学有机合成相结合的方式完成的。首先，通过先进的生物质气化工工艺，生产出高质量的生物质合成气（CO 和 H₂），合成气经调整 CO/H₂ 比，然后经费托合成过程进行 CO、H₂ 合成，精制为液体燃料。通过控制反应条件，如温度、压力、CO/H₂ 比等，在选择性催化剂的作用下，可生产出不同产物，作为燃料，主要包括甲醇、二甲醚和烷烃。

合成燃料产品纯度较高，几乎不含 S、N 等杂质；系统能源转换效率较高，可达 40-50%；原料丰富，草和树木的各个部分，如秸秆、树叶、果实等均可以被利用；燃料性质与传统汽油和柴油性质相近，低比例使用发动机可不作大的改

动；辛烷值高，发动机效率高于汽柴油。

生物质气化成液体燃料的工艺过程虽较为复杂，但工艺原理清晰，技术成熟。虽然说有许多生物质都可以作为合成燃料的生产原料，但目前研究与应用多半是以木质原料为主。生物质合成燃料的一般工艺流程如下图示。

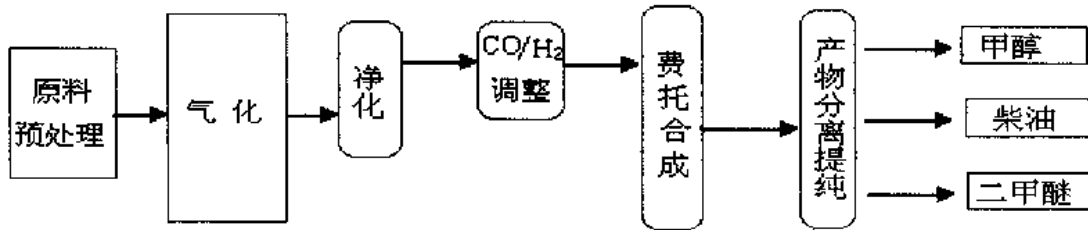


图 7 生物质合成燃料的一般工艺流程

合成气的制备是生物质合成燃料最关键的一步，因为合成气的质量直接影响到合成产物质量、反应速率和转化率等技术经济指标。因此费托合成气的杂质水平要求也较高。

一般来说，生物质气化所得到的合成气并不能直接用于生产合成燃料。必须从技术上，精心优选制备工艺；在操作上严加控制和管理，以改善合成气的质量。

欧洲是生物合成燃料发展较快的地区。早在上世纪的 80 年代，就开始了生物甲醇的研制工作，并建成了 4 个示范工厂，平均年处理生物质总量 1.4 万吨左右。德国已广泛使用含 1-3% 甲醇汽油，内燃机结构无需作多大改动，其输出功率近似燃用纯汽油。总体来说，生物质气化成甲醇技术，目前已达到投产水平，具有良好的发展前景。

合成甲醇经脱水后可进一步制成二甲醚，成为柴油的替代品。

二甲醚清洁、高效，对人体危害小，替代柴油可实现柴油机汽车高效率、低噪声和超低排放的运行，是一种理想的洁净替代燃料。

国内在生物质合成燃料方面的研究很少，几乎空白，但是以煤、天然气为原料的转化甲醇的技术却已有近 20 年的历史，技术基本成熟，低比例甲醇汽油已经商业化，M3、M5 燃料在四川成都市和重庆市已使用数年，取得较好的应用效果。山东、山西在煤基甲醇作为汽车燃料方面也做了较多工作，为甲醇燃料的进一步开发与应用积累了经验。

二、生物燃料技术经济性分析

（一）生产成本估计

表 1 和表 2 列示了部分生物液体生产成本及费用构成。它是根据我国现有物耗、能耗和资金消耗水平和平均价格水平估算的。显而易见，在现行技术经济条

件下，大多数液体燃料生产成本均较高。这一现象既反映了当前生物液态燃料技术发展的实际水平，也提出了需要继续努力的方向。表 3 为生物液体燃料销售价格与传统石油产品的比较。

表 1 部分生物燃料乙醇生产成本估算

	玉米	木薯	甘薯	甜高粱
原料费	淀粉含量 64%，1 吨乙醇需 3.2 吨玉米（1100 元/吨），3520 元/吨乙醇	淀粉含量 71%，1 吨乙醇需 2.9 吨木薯（1200 元/吨），3480 元/吨乙醇	淀粉含量 20%，1 吨乙醇需 10 吨甘薯（280 元/吨），2800 元/吨乙醇	含糖 18%，需 16 吨茎秆制 1 吨乙醇，甜高粱茎秆价格为 144 元/吨，2160 元/吨乙醇
燃料费	1 吨乙醇需耗 1.1 吨煤（5000Kcal/kg，200 元/吨）→220 元/吨乙醇	1 吨乙醇需耗 1.0 吨煤（5000Kcal/kg，350 元/吨）→350 元/吨乙醇	需耗 1.0 吨煤（5000Kcal/kg，350 元/吨）→350 元/吨乙醇	需 1.0 吨，（500Kcal/kg，350 元/吨）→350 元/吨乙醇
水费	20 元/吨乙醇	20 元/吨乙醇	20 元/吨乙醇	20 元/吨乙醇
电费	220kwh/吨乙醇，0.50 元/kwh，→110 元/吨乙醇	180kwh/吨乙醇，0.50 元/kwh→90 元/吨	180kwh/吨，0.50 元/kwh→90 元/吨乙醇	90 元/吨乙醇
辅助材料费	54 元/吨乙醇	54 元/吨乙醇	54 元/吨乙醇	390 元/吨乙醇
贷款利息	203 元/吨乙醇	203 元/吨乙醇	203 元/吨乙醇	203 元/吨乙醇
设备折旧	100 元/吨乙醇	100 元/吨乙醇	100 元/吨乙醇	263 元/吨乙醇
95% 乙醇脱水为无水乙醇	200 元/吨乙醇	200 元/吨乙醇	200 元/吨乙醇	200 元/吨乙醇
人工费	200 元/吨乙醇	200 元/吨乙醇	200 元/吨乙醇	460 元/吨乙醇
运输成本	90 元/吨乙醇	80 元/吨乙醇	240 元/吨乙醇	240 元/吨乙醇
生产总成本	4717 元/吨乙醇	4757/ 吨乙醇	4257/ 吨乙醇	4376/ 吨乙醇
副产品收益小计	720 元/吨乙醇	470/ 吨乙醇	470/ 吨乙醇	800/ 吨乙醇
CO2 回收	360 元/吨乙醇	240 元/吨乙醇	240 元/吨乙醇	—
DDGS	300 元/吨乙醇	120 元/吨乙醇	120 元/吨乙醇	—
沼气发电	—	110 元/吨乙醇	110 元/吨乙醇	—
玉米油	60 元/吨乙醇			—
饲料				
生产净成本	3997 元/吨乙醇	4287 元/吨乙醇	3787 元/吨乙醇	3576 元/吨乙醇

说明：①表中甜高粱乙醇数据系根据王孟杰教授提供的资料整理。

②表中数据除甜高粱外，系课题组调查访问以及综合有关资料而做出的估计。

表 2 部分油料植物制取生物柴油生产成本估算

	小桐子	黄连木	光皮树
原料费用 (元/吨柴油)	4960	5600	8800
含油率 (%)	40 ^①	35 ^①	30 ^①
原料消耗 (吨/吨柴油)	3.1 ^②	3.5 ^②	5.5
原材料价格 (元/)	1.6	1.6	1.6
加工转换费用 (元/吨柴油)	1000 ^③	1000 ^③	1000 ^③
含固定资产折旧			
银行利息			
煤水电消耗			
以及人工和辅助材料等费用			
生产总成本 (元/吨柴油)	5960	6600	9800
副产品回收 (元/吨柴油)	1720 ^④	1720 ^④	1720 ^④
净生产成本 (元/吨柴油)	4240	4880	8080

说明:①为种子含油率。

②小桐子出油率和油脂交换利用率分别按 86%和 94%计。

黄连木出油率和油脂交换利用率分别按 86%和 93%计。

光皮树出油率和油脂交换利用率分别按 65%和 93%计

③根据调查访问数据估计。

④这里主要考虑甘油以及糕粕等回收。甘油按 8000 元/吨计算。

表 3 部分生物液体燃料销售价格估计

	生产净成本 (元/t)	售价估算 (元/t)	
传统汽油	-	5200 (90#汽油)	以 2006 年 5 月 22 日 为例
传统柴油	-	4570 (0#柴油)	
玉米乙醇	3997	6149	
木薯乙醇	4287	6595	
甘薯乙醇	3787	5826	
甜高粱乙醇	3576	5501	
生物柴油 (油菜籽)	-	-	
生物柴油 (地沟油)	-	-	
生物柴油 (小桐子)	4240	6523	

由表 3 可以看出,在考虑销售税金和企业利润等因素后,大多数生物液体燃料的销售价格比传统汽油的出厂价要高出很多。其中玉米乙醇每吨售价达 6149 元,比化石汽油高 18%;木薯乙醇每吨达 6595 元,高 27%;甘薯乙醇每吨价格为 5826 元,比传统汽油高 12%;而甜高粱价格与汽油基本相当,每吨约 5501 元;小桐子柴油每吨达 6523 元,远高于化石柴油。这说明,在现行石油价格水平条件下,大多数生物液体燃料如果不进一步削减费用,降低成本,将难以进入充满竞争的市场,真正成为石油的替代品。

(二) 影响成本的因素及分析

尽管影响生产成本的因素很多,但是减少原料生产供应成本和价格则是最主要的方面。生物液体燃料成本构成表明,原材料费用在生产成本中占的比重很大,

一般 60-80%之间。这种状况是下面两方面因素造成的：一是原材料中有效成份如淀粉或糖粉含油率等有效成份含量不够高，加工转换效率较低，致使单位产品生产单耗高。如每生产 1 吨玉米乙醇则需要 3.2-3.5 吨玉米，而国外可控制在 3.0 吨以下。说情见表 4。

表 4 部分生物燃料单耗

	淀粉、糖粉或含油率(%)	原料消耗(原料吨 / 成品吨)
玉米燃料乙醇	62-70	3.2-3.5
木薯燃料乙醇	22-38(鲜)68-73(干)	7(鲜)2.9t(干)
甘薯燃料乙醇	20-27(鲜)66-70(干)	2.9t(干)
甜高粱燃料乙醇	16-20(鲜)	16(鲜)
小桐子柴油	30-50(干)	3.0(干果)

二是原材料生产成本贵、价格高。举例来说，为了使小桐子树尽快成林结果，并实现高产优质，小桐子树林的栽培和抚育必须遵循一定的操作程序和规范，否则难以达到目的。实践表明，其生产过程与用材林等林木的种植相比较，其技术要求只有过之并无不及，因而成本较高。表 5 具体地展示了小桐子树种植阶段的生产费用。在不考虑土地租金的条件下，其生产成本仅 440.6 元 / 亩。而每亩可产小桐子果约 0.65 吨。所以每产 1.0 吨小桐子果的成本为 678 元。再加上运输、贮存和收购的人工费用，最终价格亦不过 778 元。然而实际上由于近年一些公司大量收购小桐子种子进行种苗培育，致使目前野生小桐子种子收购价格普遍上涨，在 1000-2000 元 / 吨之间浮动。如果每榨 1 吨原料油加工费用按 100 元计算，则每吨生物柴油的实际原料成本最低也在 3400 元以上。

表 5 小桐子种植成本估计

	单价(元 / 株)	金额(元 / 亩)
1、土地租金	略	略
2、种苗费	0.5	55(按每亩种 110 株计)
3、挖坑费	1.5	165(按每亩种 110 株计)
4、种植费	1.0	110(按每亩种 110 株计)
5、栽后管理	0.2	22(按每亩种 110 株计)
6、第二年管理	0.2	22(按每亩种 110 株计)
7、第三年管理	0.2	22(按每亩种 110 株计)
8、第四年管理	0.2	22(按每亩种 110 株计)
9、种子采摘费(第 3—5 年)	0.2	22(按每亩种 110 株计)
10、合计		440.6

相比较而言，甜高粱、甘薯等的种植成本要低一些，但木薯的种植费用仍然较高。见表 6

生物液体燃料属于长期有效的能源，随着栽培技术的改进和规范化种植，生产经营规模的扩大，加工转换效率的提高，以及副产品回收利用技术的发展，特别是，随着石油资源的减少和油价的不断上涨，生物燃油产业的经济性必将改善，

成为一种颇具竞争力的石油替代燃料。

表 6 甜高粱、木薯、甘薯种植成本

成本/品种	甜高粱 (元/亩)	木薯 (元/亩)	甘薯 (元/亩)
种子费用	30	100	50-100
备耕播种	15		100 (含机械费)
间苗除草	60	20	20
底肥追肥	105	100-120	100
机械费用	15	100-150 含整地、播种等	
人工费用	20	20-40	60-80
灭虫费用	6	15	15
人工收获	50	40	40
平均单位成本: 元/亩	301	395-485	385-455
元/吨	150-75	303-373	193-228

说明：1、甜高粱的种植费用为示范点实际统计的数据；

三、能量环境效益及分析

(一) 国外研究分析的结论

任何物质产品的生产都离不开能源的消耗。同样，生物液体燃料的制取也需要消耗一定的能。人们追求的目标是用尽可能少的能量(投入)而获得尽可能多的能源(产出)，其衡量能源投入产出的高低标准是：能量投入/能量产出 \leq 1，该比值愈小，说明为生产单位能量所需的投入的能源愈少。对于生物液体燃料生产来说，需要予以关注考察的是，每投入一个单位能量(只考虑投入的化石能源)是否生产出含有更多能量的生物液体燃料。

生物液体燃料的生产过程较复杂，环节较多，大体上可划分为 3 个环节：(1)原料生产供应阶段：该阶段需要直接间接投入的传统能源包括化肥、水和收集、输送车辆所消耗的能源；(2)加工转换阶段：包括原料粗加工、甲醇(或乙醇)、硫酸等辅助材料和加热、蒸煮、脱水、提纯等工艺所需之能源，以及原材料和设备制造、安装所消耗的煤、电、气、水等能量；(3)运输和添加阶段：该阶段的能源消耗主要包括调配和添加过程所耗用的汽油和电力以及运输设备和添加设施建设过程所耗能源等。

近十年来，国际一些研究机构对生物液体燃料生产全周期内的能量平衡进行了研究，主要研究对象是以玉米、小麦、甘蔗、纤维素为原料的燃料乙醇，以及以油菜籽和大豆为原料的生物柴油。对于以玉米为原料的燃料乙醇，其能量产出效益存在一些争议。有的研究认为玉米种植、收获、运输和加工转换过程中消耗的化石能源完全抵消了产出的燃料乙醇所蕴含的能量；但更多的研究表明，以玉米为原料生产燃料乙醇的能量投入产出比处于 0.6 和 0.8 之间，还是具有可观的

能量产出效益。(见表 7)。对生物柴油的相关研究则显示,以菜籽油为原料的则具有较高的能量产出效益,其能量投入产出比处于 0.3 到 0.6 之间。(见表 8)

表 7 利用玉米和小麦生产乙醇的能量产出和减排效益

研究机构	原料	燃料生产全过程能量效率(投入/产出)	从油井到车轮的 GHG 减排率(相对于石化柴油)
GM / ANL, 2001	玉米	0.5-0.55	n/a
Pimentel, 2001 / 9	玉米	1.65	-30%
Levelton, 2000	玉米	0.67	38%
Wang, 2001a	玉米	0, 54-0.57	32-25%
Levy, 1993	玉米	0.85~0.95	33~30%
Marland, 1991	玉米	0.78	21%
Levington, 2000	小麦	0.9	29%
ETSU, 1996	小麦	0.98	47%
EC, 1994	小麦	1.03	19%
Levy, 1993	小麦	0.81	32%

来源:IEA, Biofuels for Transportation: An International Perspective, 2004.

表 8 利用油菜籽和大豆生产生物柴油的能量产出和减排效益

研究机构	原料	燃料生产全过程能量效率(投入/产出)	从油井到车轮的 GHG 减排率(相对于石化柴油)
GMetal.2002	油菜籽	0.33	49%
Levington, 2000	油菜籽	0.4	58%
Levelton, 1999	油菜籽	N / A	51%
Altener, 1996	油菜籽	0.55~0.41	56-66%
ETSU, 1996	油菜籽	0.82	56%
Levy, 1993	油菜籽	0.57-0.52	44-48%
Levelton, 1999	大豆	N / A	63%

来源:同上。

(二) 国内研究的初步结论

如前所述,对生物液体燃料的全生命周期进行能量平衡评价需获得各环节的完整准确数据,不是短时间内可以做到的。目前国内这方面的研究工作十分有限,现将有限的一些研究结果综述如后:

1、木薯燃料乙醇,其投入产出比近为 1: 1.6。即生产 1 吨燃料乙醇需要投入的全部矿物能源为 0.60 吨燃料乙醇的能量。这一结果是上海交通大学在欧盟支持下、经过两年的调查研究而得出的。表中数据是在广西建设年产 10 万吨燃料乙醇而设计的。其中各阶段(环节)的能耗量系通过实地调查和计算得到,总计能耗量为 $1.59 \times 10^{15} \text{J}$, 平均每升耗能 $1.324 \times 10^7 \text{J}$ (乙醇密度按 0.83 计)。乙醇的热值为 $2.118 \times 10^7 \text{J} / \text{升}$, 故利用木薯生产燃料乙醇的能量转换效率为 0.625, 其投入产出比约相当于 1: 1.6。详见表 9。

表 9 木薯燃料乙醇各环节的能源消耗

过程或环节	能量消耗(J)	比例(%)
种植阶段	1.34×10 ¹⁴	8.844
原料初加工	6.784×10 ¹¹	0.04
酒精转换	1.399×10 ¹⁵	87.96
变性、调配	8.245×10 ¹²	0.50
添加	9.425×10 ¹¹	0.066
运输	4.715×10 ¹³	3.1
总计	1.590×10 ¹⁵	100.0

资料来源：ASIATIC 项目最终报告，2005。

2、甘薯燃料乙醇：由于甘薯、木薯同属于淀粉原料，加工转换工艺基本相同，估计能源投入产出比也基本一致。

3、甜高粱燃料乙醇：根据北京泰天地公司的统计，以甜高粱为原料、每生产一吨燃料乙醇(浓度 95%)总计能耗为 656.7kgce，如果每吨乙醇的发热量按 7×10⁶kcal 计，则整个系统的转换效率为 65.6%。参见表 10。

表 10 甜高粱燃料乙醇各生产过程的能源消耗(以生产每吨 95%乙醇计)

生产过程(或环节)	能耗量(kgce)	比例(%)
茎秆原料储运、粉碎、发酵工段	112.96	17.2
蒸馏工段	390.51	59.5
精馏及储运工段	153.27	23.3
总计	656.74	100.0

4、小桐子生物柴油：缺乏相应资料无法作确切判断。但是从小桐子生长繁育和柴油加工转换过程特点估计，其能量消耗只会少而不会多(与醇醚燃料生产相比)，其能源投入产出比估计可达 1: 3~4。

国内外的研究分析表明，从能源转换效率来说，生物液体燃料的生产和应用将可带来良好的节能效果；从环境来说也将产生有利的影响。其主要表现是：

- 原料的合理安排和生产(种植阶段)一般不对生态环境构成不利影响，尤其小桐子、甜高粱等生物资源，都选择荒山野岭、盐碱化土地种植，反而会起到防止水土流失、改良土壤的作用；但对于某些能源植物，如木薯、甘薯等作物，如果处置不当，有可能诱发水土流失、破坏土壤的副作用。这一点应引起注意。
- 转换阶段应注意清洁生产，防止对环境的污染。尤其醇类燃料的生产更应注意残渣及废水的处理。
- 生物液体燃料的广泛应用，有助于减少排放，改善城市大气环境。为了进一步说明该问题，表 11 和表 12 列举了一组数据以资佐证。不难看出，汽车使用燃料乙醇汽油(E10)，除 VOC 排放有所增加外，其他污染物的排放均较传统汽油为优。表 12 是从整个生命周期的角度，对燃料乙醇汽油排放特性所

做试验及其结果，结论亦是肯定的。

表 11 汽车运行中排放比较(g/km)

项目	VOC	CO	NOx	PM10	SOx	GHGs
传统汽油	0.207	5.517	0.275	0.033	0.085	400
E10	0.232	3.531	0.275	0.033	0.046	351
增量(±)	+12%	-36%	%	%	-46%	-12%

数据来源：ASIATIC 项目，FinalRep0rt, Ethan01, China. 2005.

表 12 燃料乙醇汽油和纯汽油排放比较 (g/km)

项目	VOC	CO	NOx	PM10	SOx	GHGs
纯汽油	0.167	3.483	0.262	0.025	0.079	238.599
E10 混合汽油乙醇占 10%	0.146	2.629	0.265	0.023	0.094	233.827
增量(±)	-13%	-25	+1%	-10%	+18	-2%

四、原料供应潜力分析

(一) 木薯

木薯是适合于热带、亚热带地区生长、耐贫瘠的作物，易栽、耐旱、高产，享有“拓荒牛”植物之美称，是比较理想的生产燃料乙醇的原料。我国系盛产木薯的国家之一。2005 年全国共种植木薯上千万亩，产量 1100 万吨左右。其中，广西 2005 年种植 600 万亩，产木薯近 800 万 t；其次是广东，种植 186 万亩，产量 209 万 t；再次是海南，种植 35 万亩，产量 50 万。平均亩产 1.3 吨，种植成本约 300 元/吨。一般情况下 7 吨鲜薯或 2.9 吨干薯可生产 1 吨燃料乙醇，参见附表 2。

目前木薯种植方式粗放，通过使用如华南 124 等良种和改善种植方式，单产可以提高 1 倍，全国可增产木薯 1059 万吨，可生产燃料乙醇 151 万吨，其中广西可多产乙醇 114 万吨。

广西拥有大量未利用土地 515.83 万公顷，其中荒草地(指树木郁闭度小于 10%，表层为土质，生长杂草的土地)为 230.22 万公顷(折合 3453.3 万亩)。这些荒草地适合种植号称“拓荒牛”的木薯，至少可以利用其中的 1500 万亩(占 43%)。按低质地亩产 1 吨木薯计算，共产木薯 1500 万吨，可生产乙醇 214 万吨。

通过采用先进种植技术和利用荒地，仅广西省每年即拥有生产 330 万吨木薯燃料乙醇的潜力，由此可见，木薯乙醇示范项目资源来源是丰富的。

广西也是我国用木薯酿酒的主要基地，经验丰富，基础较好，农民积极性高。同时，种植木薯能有效增加农民收入，以每亩产鲜木薯 2 吨、每吨收购价按 350 元（2005 年，广西价格）计，农民每亩可收入 700 元，扣除每亩生产成本费用 400 元，农民净增收收入 300 元。假定每个农户平均种植 4 亩木薯，则全年一户出售木薯的净收即可达 1200 元以上。

(二) 甘薯

甘薯易栽易活，我国许多地区都可种植，如表 13 所示。2003 年全国甘薯播种面积达 7769 万亩，约占全部薯类作物种植面积(31463 万亩)的 1/4。

表 13 中国部分省份甘薯种植面积及产量

地区	面积 (万公顷)	单产 (吨/公顷)	产量 (万吨)
河北	25	22	550
江苏	16	30	480
安徽	40	25	1000
山东	45	28	1260
河南	55	23	1265
浙江	11	28	308
福建	22	25	550
江西	15	22	330
湖北	18	21	378
湖南	25	21	525
广东	30	24	720
广西	25	18	450
重庆	50	20	1000
四川	90	20	1800

四川是我国甘薯生产的第一大省，常年播种面积 1300 万亩左右，产量 1700~1800 万吨，无论产量和面积均居全国第一；同时，四川也是甘薯资源损失最大的地区，每年因消化不及时而烂掉的甘薯多达 500 万吨以上。如果按 10 吨甘薯制取 1 吨燃料乙醇计，仅被浪费的资源即可生产 50 万吨燃料乙醇。

四川甘薯的生产主要集中在盆地丘陵地区和盆地周围山地，如资阳、南充、达州、凉山、宜宾、泸州等地市。而这些地区多数经济发展滞后，农民收入低下，迫切需要开发新的经济增长点，改变目前社会经济贫穷落后的状况。发展甘薯乙醇为此带来了新的途径。

四川素有酒乡之称，拥有发展燃料乙醇的传统经验和技術基础。近年来，四川针对甘薯乙醇生产技术的要求，在原料基地建设、品种选育和贮存保管方面做了大量研究工作。已选育的优良品种(如川薯系列、南薯系列和绵薯系列)亩产均可超过 2000 公斤，淀粉含量 20-25%，亩产淀粉 400 公斤左右；通过筛选高淀粉品种，结合高产栽培技术措施，亩产鲜薯可达 3000-3500 公斤，淀粉含量 20%以上，亩产淀粉可达到 600 公斤以上；为了保证燃料乙醇的常年稳定均衡生产，对“错季种植”、“建设安全地窖”、“高温大屋窖”、“打浆保存”和“晾晒”等技术措施都进行了试点和示范；同时还在甘薯的栽培、收集模式方面进行了探索，建立“订单农业”和“公司+农产”的繁殖体系，并取得较好效果。

（三）甜高粱

甜高粱具有抗旱、耐涝、耐盐碱等多种特性，可在荒草地、盐碱地等低质地广泛栽培，而且种植成本不高，参见表 6。我国从海南岛至黑龙江均可种植甜高粱，但最适宜栽培的地区是东北、华北、西北和黄河、淮河流域部分地区，共 18 个省区。甜高粱茎秆中含有大量汁液，出汁率在 65% 左右，汁液糖锤度 15-22%，亩产茎秆 4-8 吨、籽粒 300-400 公斤，15 吨甜高粱秆可生产 1 吨燃料乙醇。由于利用甜高粱生产乙醇技术还没有实现商业化，目前甜高粱主要作为青贮饲料，而青贮饲料大量源自玉米，所以目前国内甜高粱的种植面积不过 10 万亩。

据调查，上述 18 个省份的荒草地面积为 4 亿亩，盐碱地为 1.4 亿亩。不考虑用耕地，仅利用荒草地、盐碱地面积的 20%，则有 1 亿亩土地可种植甜高粱。按亩产 2 吨（相当于耕地甜高粱产量的 1/2 计），可生产甜高粱秆 2 亿吨，具备生产 1300 万吨乙醇的潜力。

甜高粱既产糖又产粮，籽粒产量与普通高粱相当。因此可充分利用现有高粱地种植甜高粱。我国高粱种植主要分布在华北和东北地区，种植面积以山西、内蒙、辽宁、吉林和黑龙江为主。2004 年全国高粱种植面积为 56.7 万公顷，总产量 23 万吨，其中，60% 的种植面积和 70% 的高粱产量都集中在上述 5 省。

另外，在上述地区，尤其是黑龙江和山东已开始种植甜高粱，用来生产乙醇，并建立了相当规模的示范装置，积累了相当丰富的经验。利用荒草地、盐碱地等劣质土地种植甜高粱，产粮增能，既不与入争粮，又不与粮争地，还能有效地增加农民收入，具有促进解决我国“三农”问题的作用。

（四）油料植物

我国土地面积辽阔，地域跨度大，植物资源丰富。现有可作为油料能源林的树种主要来源于经济林中木本油料林。我国经济林资源非常丰富，现有面积 2139 万 hm^2 ，占全国森林面积的 12.3%，是我国森林面积的重要组成部分。其中，油料林面积 342.90 万 hm^2 ，占经济林面积的 16.03%。面积在 100 万 hm^2 以上的有 11 个省（区），依次是广西、湖南、辽宁、云南、广东、陕西、江西、山东、浙江、福建和河北，占全国经济林面积的 70.70%。我国已查明的油料植物有 151 科 697 属 1554 种，其中种子含油量在 40% 以上的植物就有 154 个种，分布广，适应性强。目前，可作为能源发展，开发利用较为成熟的树种有漆树科的黄连木，无患子科的文冠果，大戟科的小桐子（麻疯树）、油桐、乌桕，山茱萸科的光皮树等。据统计，六个树种的现有成片分布面积达到 135 万 hm^2 ，根据各地统计上报，其中约有 40 万 hm^2 可经过改造培育作为油料能源林。如果能够加工利用，按每公顷油料林出油 1.5 吨计，可获得 60 万吨生物柴油。

以小桐子为例，现在我国四川、贵州、云南等地均有野生或人工栽培，其果

仁含油率达 61.5%，经加工可制成生物柴油，其种子油渣、残油渣及树叶可作农药，去毒后也可作为动物饲料。富含氮的种子油渣是极好的植物肥料。由于该树种植可用秆插法繁殖，而且成活率高，生长速度快，产量逐年增加，果实采摘可达 50 年，见附表 3。近年来，由于退耕还林的推动，各地大量种植。目前仅四川计划种植的小桐子即在 200 万亩以上，可产种籽 40 万吨，可提炼小桐子油 13 万吨。未来全国小桐子种植面积至少可达 3000 万亩以上，预计可产柴油 290 多万吨（按每亩每年产干果 300 公斤，每公斤果可榨取 0.29 公斤柴油计），显示了良好的资源开发利用前景。

小桐子的种植可利用荒山野地，不占用良田，对促进地区经济发展，增加农民收入，具有积极的作用。

五、总体评价和结论

上述分析表明，目前国内外生物液体燃料技术的发展状况大体上可分为以下四类：

- ①技术成熟、已实现商业化生产的技术，如巴西的甘蔗燃料乙醇；
- ②技术成熟、已实现产业化的技术，如美国的玉米燃料乙醇和欧洲的生物柴油；
- ③技术基本成熟，未实现产业化的技术，如木薯燃料乙醇、甘薯乙醇、甜高粱燃料乙醇、小桐子等生物柴油等。
- ④技术原理可行，技术趋于成熟，需要继续研究开发的技术，如纤维素燃料乙醇、生物质合成燃料等。

显然，第①②燃料技术已不需要再进行试点示范，第④类基本上属于科学研究的范畴，尚不具备生产性试点示范条件。具备条件并需要进行生产试点示范的燃料技术主要是③类燃料技术。

根据示范技术选择原则，结合各项技术的具体发展状况，确定以下燃料技术为‘十一五’进行重点试点示范的项目：

- 以木薯为原料的燃料乙醇，即木薯乙醇；
- 以甘薯为原料的燃料乙醇，即甘薯乙醇；
- 以甜高粱为原料的燃料乙醇，即甜高粱乙醇
- 以小桐子、黄连木油为原料的生物柴油等。

附表 1 部分生物液体燃料技术经济指标的比较

项目或指数	粮食乙醇	甘蔗乙醇	木薯乙醇	甜高粱乙醇	纤维素乙醇	废食用油柴油	小桐子柴油	热裂解油	合成燃料
一、技术成熟性									
①工艺特征	粉碎+蒸煮+糊化+糖化+发酵+蒸馏+精馏	压榨+糖蜜+蒸馏+精馏+纯化	同粮食乙醇	压榨+糖蜜+发酵+蒸馏+精馏	高度粉碎+水解+发酵+蒸馏+精馏	酯化反应+洗涤干燥	同左	热裂解油	气化+合成
②产业发展	已形成规模生产, 美国已达 1680 万吨/年	巴西 1350 万吨/年	尚待发展	中试规模 5000 吨/年	3000 吨/年	小批量生产	试验性生产	加拿大已建成 200 吨/日	尚待发展
③产品应用状况	美国 FFVs550 万辆, 中国已完成 9 省市示范	巴西 1550 万辆车, 燃料消耗量为汽油 1/2	尚待发展	尚待发展	尚待发展	不详	尚待发展	尚待发展	尚待发展
④关键技术开发及进展	不存在技术瓶颈	不存在技术瓶颈	不存在技术瓶颈	固体和液体发酵技术已达实用水平	预处理技术和纤维素酶的生产难度大	不存在技术瓶颈	综合利用技术待证实	反应器设计控制技术待发展	CO 和 H ₂ 气化技术及催化剂技术待发展
⑤设备自主设计与制造能力	较强	较强	较强	较强	较强	较强	较强	待发展	待发展
⑥燃料产率(吨原料/吨燃料)	国外: 3.0 国内: 3.2-3.5	14.0(鲜重)	国内: 2.9(干)	14-16(鲜重)	4-6	1.02	1.02	近 2.0	约 4.0
⑦综合利用	饲料、沼气、CO ₂	饲料、沼气、CO ₂	同左	饲料或造纸、沼气、CO ₂	木质素、燃料、CO ₂	甘油	饲料、农药、甘油	焦炭	-
⑧存在问题	与国外相比燃料产率较低	不好储存、季节性生产	不好储存、季节性生产	不好储存、季节性生产	原料预处理、酶的生产均较复杂, 难度较大	工艺复杂、醇油比 6: 1 醇回收量大, 后处理过程复杂	同左		
二、经济可行性									
①生产规模(万吨/年)	10.0	10.0	10.0	2.0	10.0 ^①		10 ^②		
②总成本(元/kg)	4.7	4.14 ^①	4.78	4.38	4.25 ^①	3.56 左右	5.96 ^②	不详	不详
③付产品成本(元/kg)	-0.7	-0.99 ^①	-0.5	-0.8	-0.03 ^①	-	-1.72 ^②	不详	不详
④净成本(元)	4.0	3.15 ^①	4.28	3.58	4.22 ^①	3.56	4.24 ^②	不详	不详

/kg)									
三、能量转换效率									
①加工转换过程能耗 (tce/吨)	0.731	0.515	0.483	0.657	不详	不详	不详	不详	不详
②全能量分析	不详	不详	62.5% ^③	不详	不详	不详	不详	不详	不详
四、社会环境可接受性									
①加工转换过程污染物	水污染	水污染	水污染			含油废酸液排放环境成本高	同左	无污染	无污染
②应用过程污染物排放	同右	同右	CO 减少 36%, Sox 减少 46%, GHGs 减少 12%	同左	同左	同左	同左	同左	同左
③提供就业机会 (人)	900-1000 人	增加就业机会	900-1000 人	不详	不详	不详	不详	不详	不详
④存在问题	-	-	可能会带来水体污染	农民增收	农民增收	-	农民增收	农民增收	农民增收
五、原料供应潜力									
①宜种土地面积	-	-	近 2900 万亩	>1.0 亿亩	按工农业有机废弃物 1/3 计, 3.0 亿吨	按 2004 年植物油耗量 1780 万吨 30%计, 超过 500 万吨	>3000 万亩	来源广泛	来源广泛
②单位面积产量	-	-	>1 吨/亩	>4 吨/亩			650kg/亩	丰富	丰富
③存在问题	资源供应存在不确定性	资源供应受糖业影响	可存在对生态环境影响	能否确保供应?	资源分配不清	原料收集难度大	资源种植、收集均存不确定性	不存在资源问题	同左
六、总体评价	技术成熟, 已产业化	技术成熟, 已商业化	技术成熟, 未产业化	技术基本成熟, 未产业化	尚待研究开发和研究	技术基本成熟, 未产业化	技术基本成熟, 未产业化	尚待研究和开发	同左

资料来源:①ASIATIC Project, Finat Report, Ethanel, China,2005;

②根据陈放教授提供资料由课题组做出的估计;

③同①

附表 2 部分生物燃料乙醇原料资源技术特点

	甜高粱	木薯	甘薯
①适生地区	东北、华北、西北、黄淮海地区	广东、广西、海南、云南、福建等地区	中国淮河以南的地区
②适生条件	抗旱耐涝，耐盐碱	耐贫瘠、干旱	耐贫瘠
③含油率(%)或淀粉(%)	15-22(含糖)	27-33(鲜) 63-74(干) (含淀粉)	20(含淀粉)
④生物量			
产果(kg/亩)	4000-5000 茎秆	1300	2000
产油量(kg/亩)	266(乙醇)	186	200
⑤原料消耗 (t 原料/t 油或乙醇)	15	7	10
⑥生长特性	已培育出高产茎秆品种	已培育出优良品种	同左

附表 3 部分生物柴油原料资源技术特点

树种	分布地区	含油率	种子产量 (公斤/亩)	现有面积 (万公顷)	利用初始 期(年)	利用年限 (年)
小桐子 (麻疯树)	四川、云南、贵州、重庆、广西、海南、福建	30%~60%	200~500	2.10	3~5	30~50
黄连木	北自河北、山东，南至广东、广西，东到台湾，西南至四川、云南，都有野生和栽培，其中以河北、河南、山西、陕西等省最多。	35~40%	100~600	8.70	4~8	50~80
文冠果	宁夏、甘肃、内蒙古、陕西、东北各省及华北北部	30%~40%	200~600	0.50	4~6	30~80
光皮树	集中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	30%~36%	300~700	0.45	3~6	40~50
乌桕	主产长江流域及珠江流域，浙江、湖北、四川	35~50%	150~500	4.80	3~8	20~50
油桐	甘肃、陕西、云南、贵州、四川、河南、湖北、湖南、广东、广西、安徽、江苏、浙江、福建、江西等 15 个省区	40~50%	200~800	118.80	3~5	20~50
合计		/	/	135.35	/	/

(注：现有面积为各地统计上报数据)