

# 基于产业生态学的菜籽油生物柴油对能源及环境的影响分析

程小琴

(华中科技大学 管理学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 运用生命周期评价方法对菜籽油生物柴油的能量效率及环境效益进行了系统评价。研究结果表明, 生物柴油比石化柴油具有更高的能量净值, 能量输出远大于能量输入; 使用生物柴油降低了温室气体和CO<sub>2</sub>、HC、NO<sub>x</sub>等空气污染物的排放, 并减少了对水体和土壤的污染, 这说明生物柴油的可再生性及环保性具有良好的生态效益。

关键词: 产业生态学; 菜籽油生物柴油; 生命周期评价

中图分类号: F416.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-7348(2008)01-0070-05

由经济增长方式、能源增长效率等直接带来的日益严重的环境污染问题, 威胁着社会经济的可持续发展。在此背景下, 产业生态化正成为产业发展的主要趋势之一。能源产业也不例外, 我们在规划发展替代能源时不可避免地要考虑生态效益问题。菜籽油生物柴油作为一种有潜力的替代能源, 其产业化发展是新兴的研究课题, 菜籽油生物柴油对石化资源的消耗和污染物的排放等环境影响, 是制定规划时首先要考虑的问题之一。本文试图运用产业生态学的理论和方法, 对菜籽油生物柴油对能源与环境的影响进行系统分析。

## 1 产业生态学理论基础

对产业生态这一概念, 耶鲁大学的Thomas Graedel等在《产业生态学》中, 揭示了生态学中的生物组织与产业中的企业组织的相似性, 重点从企业与环境的协调发展中描述产业生态学的学科性质及研究内容, 将产业生态学的基本概念简要描述为: 产业生态学是人类在经济、文化和技术不断发展的前提下, 有目的、合理地去探索和维护可持续发展的方法。产业生态学不是孤立, 而是协调地看待产业系统与其周围环境的关系。这是一种试图对整个物质循环过程——从天然材料、加工材料、零部件、产品、废旧产品到产品最终处置——加以优化的系统方法。需要优化的要素包括物质、能量和资本。因此, 产业生态学是从产业生态系统的角度评估和降低产业活动的环境影响的科学。

产业生态学重点研究单个产品及其在生命周期不同

其投资效益, 促进农业增产和农民增收。

### 参考文献:

- [1] 马述忠, 黄祖辉. 论我国农业科技进步的 mode 选择[J]. 农业科技管理, 2000, (5): 13-16.
- [2] Johannes Roseboom. Agricultural Research and Extension Funding Levels Required to Meet the Anti-hunger Programme Objectives [Z]. Paper Written on request by the SDRR and SDRE services of FAO, Rome.
- [3] Julian M. Alston, Philip G. Pardey, and Vincent H. Smith. Financing Agricultural R&D in Rich Countries: What's Happening and Why[Z]. EPTD Discussion Paper.
- [4] 黄季焜, 胡瑞法. 中国农业科研投资经济[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

- [5] 刘进宝, 刘洪. 农业技术进步与农民农业收入增长弱相关性分析[J]. 中国农村经济, 2004, (9): 26-37.
- [6] 徐秀丽, 李小云, 左停, 叶敬忠. 农业科技政策应以支持农民生计改善为导向[J]. 中国农村经济, 2003, (12): 4-10.
- [7] 朱希刚, 山下宪博. 中国的稻米生产和一体化经营[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [8] 刘庆和. 中国农业——宏观经济联系研究[M]. 成都: 西南财经大学出版社, 2006.
- [9] Science & Innovation Strategy [EB/OL]. Published by Agriculture and Agri-Food Canada, May 2006, <http://www.agr.gc.ca/science-strategy>.
- [10] C. Peter Timmer. Agriculture and Pro-Poor Growth: An Asian Perspective[Z]. Working Paper Number 63, 2005.

(责任编辑: 高建平)

收稿日期: 2007-10-03

作者简介: 程小琴(1963-), 男, 湖北武穴人, 湖北省人民政府发展研究中心处长, 华中科技大学管理学院博士研究生, 研究方向为经济与管理。

阶段的环境影响,同时也注重研究生产产品的设施。在这样一个设施中,原材料、加工材料、其它厂家生产的零部件以及能源构成各种输入流;各种输出流包括产品本身,向土壤、水体和大气排放的污染物以及以热和噪声的形式释放的废能。产业生态学分析设施的方法是研究各种输入流和输出流的收支和循环,力图设计能够减少污染物排放,保留和回收更多的物质,使其就地或被其它设施加以再循环的工艺方法。其核心思想包括节约材料和能源,并不断改进技术——即承认随着技术不断发展,社会越来越离不开其过去的技术基础,一个社会如不充分依靠技术进步就不能够延续和发展。

产业生态学的核心内容之一就是生命周期评价(Life Cycle Assessment, 简称LCA)。LCA的本质是检查、识别和评价一种材料、过程、产品或系统在其整个生命周期中的环境影响。国际环境毒理学和化学学会(Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 简称SETAC)对生命周期评价定义为:生命周期评价是一种客观评价产品、过程或者活动的环境负荷的方法,该方法通过识别与量化所有物质和能量的使用以及环境排放,来评价由此造成的环境影响,评价和实施相应的改善环境表现的机会。生命周期评价包括产品、过程或活动从原材料获取和加工、生产、运输、销售、使用/再使用/维修、再循环到最终处置的整个生命周期。

开展LCA很可能是一项巨大而又复杂的工作,而且LCA有多种形式。不过,人们对LCA的标准结构有着广泛的共识,LCA包括3个阶段:目的和范围的确定、清单分析和影响评价,以及每个阶段都要开展的结果解释。首先,LCA需要确定其目的和范围,接下来开展清单分析和影响评价。每个阶段的结果解释可以指导开发潜在的改进措施。这些改进措施反过来又可以影响LCA的各个阶段,因而LCA是一个反复交互的过程。

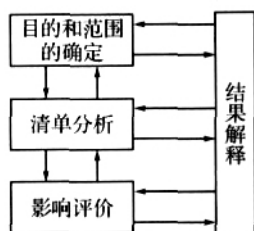


图1 技术活动的生命周期评价阶段

资料来源: Society of Environment Toxicology and Chemistry (SETAC), Guidelines for Life- Cycle Assessment: A Code of Practice, Pensacola, FL, 1993.

如果没有时间、经费和数据可获得性的限制,而且具备相应的分析方法,那么生命周期评价就可以为改进产品和过程的环境表现提供理想的建议。但是,这些制约因素实际上总是存在的。因此,尽管已经开展过一些非常详细的LCA,但是迄今为止还没有完成过一个全面、定量的LCA,也许今后也不会有。评价过程中总是无法避免一些必要的折衷做法。例如,一些LCA将研究范围限制在那些被认为最严重或者可以被量化的环境影响上;常常使用平

均值,而不是当地能源成本等准确数据;忽略对催化剂、添加剂和其它一些用量小但可能产生重要环境影响的物质进行分析;不考虑硬件设备的影响;以及忽略与供应商生产活动相关的材料流和环境影响等。因此,我们不可以认为详细LCA就能提供严谨的定量结果,实际上,LCA只是提供了一个可以更加有效、有用的评价框架而已。

由于目前国内菜籽油生物柴油产业的发展尚处于探索阶段,所能获得的数据有限,因此本文所述生命周期评价为简化生命周期评价(streamlined life-cycle assessment, SLCA),涉及全部生命周期,部分参考国外有关菜籽油生物柴油的数据,提供一个研究的框架,为后续研究作理论上的铺垫。

## 2 研究对象与系统边界

### 2.1 研究对象

生命周期分析评价环境影响和影响产品生命周期能源平衡的潜在因素,包括原材料、生产、消费、废物排放。以油菜籽生物柴油(B100)作生命循环分析,主要分析以下几个方面:

(1) 生命周期能源消耗。直接的(化石能源和电)和间接的(原料和生产装置)能耗都将在燃料的生命周期中予以评价。

(2) 生命周期排放。主要包括CO<sub>2</sub>排放和空气污染物排放,空气污染物包括一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、颗粒(PM)、碳氢化合物(HC)等。

### 2.2 系统边界

系统边界为生物柴油和石化柴油生产的生命周期过程。生物柴油的生命周期是从油菜籽种植开始到油菜籽生物柴油燃烧/车辆使用结束的系统过程,由原料生产、燃料生产和燃烧/车辆使用3个子过程组成,包括化学品生产和运输;油菜籽种植和收获;原料运输;原油生产、运输;生物柴油生产;燃料输配及燃烧/车辆使用等阶段。石化柴油的生命周期是从原油开采开始到石化柴油燃烧/车辆使用结束的系统过程,包括原油开采及运输、柴油精炼和运输及燃烧/车辆使用等阶段(见图2)。

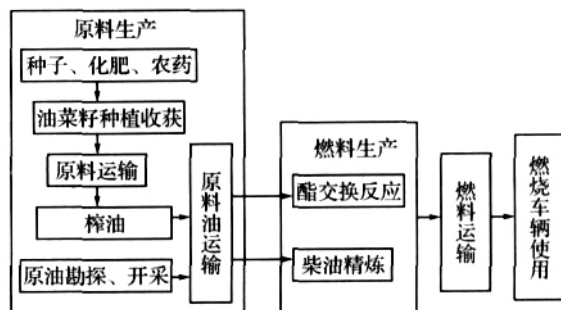


图2 生物柴油和石化柴油生命周期框架

## 3 数据来源与计算方法

### 3.1 数据收集及处理

油菜籽种植等相关数据通过实地调研、咨询相关专家及查阅湖北省统计资料等方式得到。生物柴油生产工艺及生产过程中相关能源消耗根据华中农业大学实验室所得相关数据和国内公开出版的文献资料整理得到。车辆使用阶段污染物排放所用数据来自洛杉矶城市高速运输管理局排放实验研究室(LA-MTAETF)的相关数据以及根据国内公布的统计数据计算得到。

### 3.2 计算方法

根据ISO14040-ISO14049, 评价指标包括生命周期能源消耗和生命周期排放两类。生命周期能源消耗包括农业生产直接的(石油产品和电)和间接的(化肥、化学品、拖拉机和农业机械)能源消耗。油菜籽种植和榨油( $E_{ag}$ )根据下式计算:

$$E_{ag} = E_f + E_m + \frac{E_l + E_{am}}{W_c}$$

式中 $E_f$ 为燃料能源(MJ/ha),  $E_m$ 为化肥、种子和植物保护材料的能源消耗(MJ/ha),  $E_l$ 为拖拉机和收割机的能源消耗(MJ/ha),  $E_{am}$ 为其它农业机械的能源消耗(MJ/ha),  $W_c$ 为总的生产量(t/h)。

对于1t生物柴油, 菜籽油提取和酯交换反应的能源消耗( $E_p$ )由下式计算得到:

$$E_p = E_{ie} + \frac{E_e}{W_c} + E_{ch}$$

式中,  $E_{ie}$ 为燃料和电的能量(MJ/t),  $E_e$ 为装置消耗的能量(MJ/h),  $E_{ch}$ 为化学品消耗的能量(MJ/t),  $W_c$ 为装置的生产量(t/h)。

1t生物柴油消耗的能量( $E$ )由下式计算得到:

$$E = \frac{E_{ag}}{P \cdot O} + E_p$$

式中,  $P$ 是油菜籽单位产量(t/ha),  $O$ 是生物柴油的单位产量(t/tseed)。

## 4 评价结果

### 4.1 生命周期能耗

油菜籽生物柴油生命循环中的总能源消耗可划分为3个阶段: 农业生产中消耗的能量、菜籽油提取过程中消耗的能量和酯交换反应中消耗的能量。

(1) 农业生产中的能耗。1ha油菜籽生长所消耗的能量见表1。从表1可知, 最大的能量需求来自化肥, 化肥能量占总能耗的58%以上。

农业生产中的总能耗可以通过采用生物肥料来降低, 比如污泥肥料、屠宰场废料, 而且生物肥料产生的沼气足以提供生物肥料的烘干以及所需的电, 也就是说生物肥料的生产不需要耗费额外的电或化石能源, 从而可以使生物柴油生命周期中耗费的化肥能量(种植1ha的油菜籽)从10930.5MJ/ha降低到1993.5MJ/ha。

(2) 制备生物柴油过程中的能耗。生物柴油的制备包

表1 农业生产中的能量消耗

项 目	采用矿物化肥的种子烘干		采用生物肥料和种子保存技术	
	能耗量 (MJ/ha)	占总能耗量比重 (%)	能耗量 (MJ/ha)	占总能耗量比重 (%)
农业机械能耗	2 034.6	10.9	2 034.6	22.7
农业机械所耗费的化石燃料和润滑剂	2 556.8	13.8	2 556.8	28.5
油菜籽装置能耗	235.4	1.3	201.2	2.2
油菜籽清洁、烘干或保存所耗费的石化燃料和电	1 777.0	9.6	1 134.3	12.6
油菜籽所包含的能耗	37.1	0.2	37.1	0.4
化肥	10 930.5	58.7	1 993.5	22.2
植物保护的化学用品	1 020.0	5.5	1 020.0	11.4
合计	18 591.4	100	8 977.5	100

括菜籽油提取和酯交换反应技术。菜籽油提取目前主要的方法包括挤压法和有机溶剂萃取法。相比冷压(温度不超过60 )、热压(温度在110~120 )产油量更大, 但是, 即使缓慢的挤压仍有6%~7%菜籽油残留在饼粕中。冷压需要较少的能量, 菜籽油里所含磷脂较少, 12%~14%菜籽油残留在饼粕中。利用萃取法, 仅有0.1%~0.8%菜籽油残留在饼粕中, 然而菜籽油里磷脂的数量却是挤压法的2倍。

为了降低能耗和环境污染, 得到高质量的菜籽油和饼粕, 应采用发酵水解的生物技术。在水解过程中, 经过发酵后, 菜籽的细胞壁被破坏从而释放出菜籽油, 被破坏的胚乳成为液态, 然后用经典方法将油分离出来。

采用冷压法每生产1t菜籽油甲酯(RME)所需的能耗为2 328.0MJ, 而采用生物技术榨油生产1tRME的能耗为2 089.1MJ。

总能耗也可通过利用不同的催化剂来降低。1t菜籽油可以得到更高产量的菜籽油乙酯(REE)。如果采用年产量

表2 1tRME和REE产品的能耗 (单位: MJ/t)

项目	RME 能耗	REE 能耗
农业		
农业机械装备	2 775.1	2 639.6
燃料和油	5 209.5	4 955.1
电	84.3	80.2
种子和化肥	14 654.8	13 957.0
合计	22 723.7	21 613.9
榨油		
电	792.0	751.4
装置	1 536.0	1 536.0
合计	2 328.0	2 287.4
酯交换反应		
电	540.0	540.0
装置	1 205.2	1 205.2
化学品	4 610.0	4 780.0
合计	6 355.2	6 525.2
总计	31 406.9	30 426.5



为 1 000t/年的装置和冷压法榨油技术, 生产 1tRME需要 1.1t菜籽油, 而生产 1tREE只需要 1t菜籽油。

在装置和油菜籽种植技术相同的情况下(油菜籽产量为 3t/ha, 采用冷压法 1t油菜籽榨 0.33t油), 1tREE的总能耗低于 RME的。农业种植阶段所需的能耗是总能耗的主要部分。因此, 可以考虑运用更有效的种植技术来提高油菜籽产量、改进油菜籽保存技术以替代烘干以及用生物肥料代替化肥, 从而减少能耗。

(3) 生物柴油生命周期中所提供的能量。在 RME或 REE的生命周期中, 生产的所有产品(生物柴油和副产品)所能提供的能量相对固定。农业生产阶段不仅生产了油菜籽, 还有 6t/ha的秸秆。虽然秸秆的燃烧热值只是生物柴油的 1/3, 但是也可用作生物燃料。榨油和酯交换反应过程中, 平均每获得 1t酯产品就会产生 1.5t饼粕和 0.1t甘油。1t酯产品的生产过程中获得的所有产品能提供的能量见表 3。从表 3可知, REE比 RME所能提供的能量多。秸秆的能量占最大的一部分, 几乎是酯产品能量的 2倍, 而饼粕相对较少。

表 3 1t酯产品所能提供的能量构成 (单位: MJ/t)

产品	RME	REE
酯	37 699.8	41 514.0
甘油	1 659.8	1 581.0
秸秆	88 220.0	83 700.0
饼粕	36 428.5	34 562.5
总计	164 008.1	161 357.5

(4) 不同原料生产的生物柴油与石化柴油能量平衡的比较。能量平衡是指对一种特定的能源来说, 生产此种能源所消耗的化石能源的能量与它所能提供的能量的比较(即输入/输出)。根据上述数据可得 RME和 REE生物柴油能量平衡(见表 4)。

表 4 RME和 REE生物柴油能量平衡 单位: MJ/t

项目	能量总输入	能量输出		能量输入/输出	
		燃油产品	所有产品	只考虑燃油产品	包括所有产品
RME	31 406.9	37 699.8	164 008.1	1:1.20	1:5.22
REE	30 426.5	41 514.0	161 357.5	1:1.36	1:5.30

从表 4可知, 若考虑所有产品(包括副产品), 油菜籽生物柴油具有多得多的能量净值, 输出远大于输入。与此相类似, Martin Mittelbach and Claudia Remschmidt 分别对不同国家不同原料的生物柴油和石化柴油生命周期的能量

表 5 不同原料生产的生物柴油与石化柴油能量平衡比较

柴油类型	研究地区或国家	能量输入/输出
菜籽油生物柴油	瑞士	1:1.88
菜籽油生物柴油	德国	1:2.28-2.96
菜籽油生物柴油	英国	1:2.29
石化柴油	德国	1:0.90
石化柴油	美国	1:0.83

资料来源: Martin Mittelbach, Claudia Remschmidt, Biodiesel: The Comprehensive Handbook, Vienna Boersdruck GesmbH, 2004年

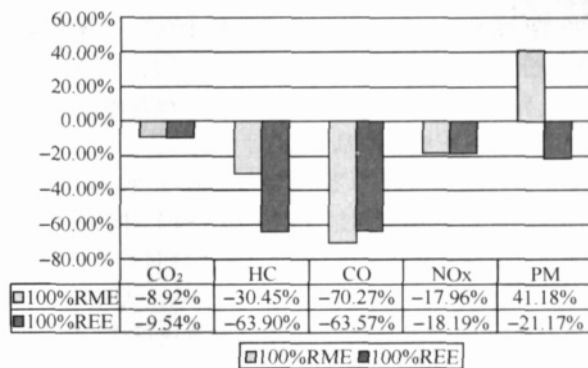


图 3 柴油和生物柴油的排放对比平衡进行的比较分析, 其研究结果(见表 5)表明, 从生命周期的角度来看, 不同原料的生物柴油其能量输出均大于输入, 而石化柴油具有负的能量平衡。这是由于有 20%的能量被石油开采、精炼、运输等过程所消耗。

#### 4.2 生命周期排放

生命周期排放从 CO<sub>2</sub>排放和空气污染物排放两方面进行评价。

洛杉矶城市高速运输管理局排放实验研究室(LA-MTAETF)对 100%菜籽油甲酯(RME)和菜籽油乙酯(REE)以及石化柴油进行了排放试验(Peterson and Reece, 1994)。其排放试验结果见表 6。

表 6 每 kg RME、REE 和柴油的排放对比

排放物	CO <sub>2</sub>	HC	CO	NO <sub>x</sub>	PM
100%RME	3.389756	0.003302	0.010027	0.030419	0.002441
100%REE	3.366879	0.001714	0.012286	0.030336	0.001363
柴油	3.721776	0.004748	0.033727	0.037080	0.001729

图 3 为生物柴油循环相对于石化柴油循环的各种空气污染物排放的对比, 图中显示的是生物柴油循环中各种空气污染物排放相对于石化柴油循环的百分比变化。

(1) 生物柴油降低 CO<sub>2</sub> 排放。从实验结果来看, 与石化柴油相比, 使用菜籽油甲酯(RME)和菜籽油乙酯(REE)生物柴油排放的 CO<sub>2</sub> 分别降低了 8.92% 和 9.54%, 但是从生命周期的角度来看, 生物柴油燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 与其植物生长过程中通过光合作用吸收的 CO<sub>2</sub> 基本平衡, 而石化燃料燃烧所释放的 CO<sub>2</sub> 需要几百万年才能再转变为石化能。因此使用生物柴油降低了 CO<sub>2</sub> 排放, 可以有效地降低温室效应。根据美国能源部的资料显示, B20 和 B100 对生命循环 CO<sub>2</sub> 排放的影响, 其中 B100 大约降低了 78.4%, B20 降低了 15.6%。

(2) 生物柴油对空气污染物排放的影响。生物柴油的热值和普通柴油相差不大, 物理性质和普通柴油相近。其主要优点是能直接降低发动机排气管的空气污染物排放, 生物柴油由于本身含氧 10% 左右, 十六烷值较高, 且不含芳香烃和硫, 所以它能够降低 CO、HC、微粒、SO<sub>x</sub> 和芳香烃等污染物的排放。图 3 显示了使用菜籽油甲酯(RME)和菜籽油乙酯(REE)生物柴油与柴油时排放污染物的对比。由图 3 可知, 使用生物柴油的柴油机排气管排出的 CO、HC、NO<sub>x</sub> 都比使用柴油时明显降低, 最明显的是 CO 分别降低了

70.27%和63.57%，HC分别降低了30.45%和63.90%，其次是NOx分别降低了17.96%和18.19%。因此使用生物燃料代替石化燃料是控制空气污染物排放一种很好的选择，生物柴油对改善城市空气质量有益。

但从图3中也可以看出PM有所例外。使用菜籽油甲酯(RME)生物柴油的PM排放比柴油升高了41.18%。PM由碳烟和可溶性有机物组成，碳烟是在燃烧过程中热力分解产生的碳粒，颗粒排放，尤其是PM是导致人类呼吸系统疾病的根源，由于NOx排放一般和PM排放成反比，所以使用生物柴油时，必须采用其它技术措施控制NOx排放。在燃料技术和柴油机技术领域应开发相应的技术措施力争不牺牲生物柴油的优点，减少PM排放。

由于生物柴油不含硫，所以通过发动机排气管排放的SOx为零。国内外法规对汽车燃油中的含硫量限制越来越严，这使得柴油的制造成本增加，进一步显示出生物柴油的优势。

(3) 生物柴油能减少对水体和土壤的污染。生物柴油与石化燃料相比，更易生物降解。有资料表明，生物柴油和石化柴油3星期后的生物分解率分别为98%和70%。所以，如果发生泄露事故，生物柴油对水体、土壤的污染比石化燃料小得多。故生物柴油运用于农业、林业、船舶机械上的柴油机，对环境更为有利。

在石化柴油和生物柴油的生命循环中，关于废水排放资料仅限于总的废水流出。国内外原油生产中产生的废水占石化柴油整个循环的78%，只有12%产生于精炼过程中。在生物柴油的循环中，2/3的废水产生于植物油转化过程。

生命循环中石化柴油和生物柴油总的废水流量见图4，石化柴油产生的废水几乎是生物柴油的5倍。

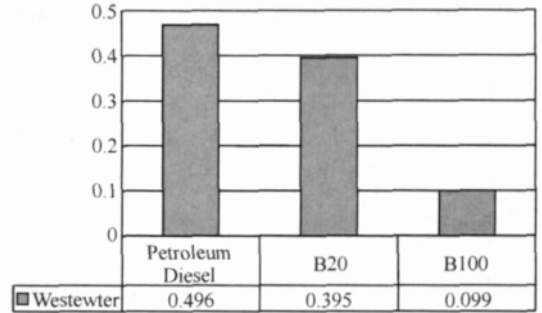


图4 循环中柴油和生物柴油总的废水流量

参考文献:

- [1] Peterson, C. L. and Reece, D. L., Emissions Test with an On-road Vehicle Fueled with Methyl and Ethyl Esters of Rapeseed Oil[M]. 1994.
- [2] John Sheehan, Vince Camobreco et al. An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles [R].National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- [3] [美] 格雷德尔, 艾伦比.产业生态学[M].施涵译.北京:清华大学出版社, 2004.
- [4] 胡志远, 浦耿强, 王成焘.汽车代用能源生命周期评估[J].上海汽车, 2002, (11): 32- 35.
- [5] 胡志远. 不同原料制备生物柴油生命周期能耗和排放评价[J].农业工程学报, 2006, (11): 141- 146.

(责任编辑: 赵贤瑶)

## Influence of Rapeseed Biodiesel to Energy and Environment Based on Industrial Ecology

Abstract: On the base of the theory of the industrial ecology, the life cycle assessment of rapeseed biodiesel is performed for its energetic efficiency and environmental benefit. The results indicate that compared to diesel fuel, energy accumulated in biodiesel fuel life cycle is much bigger than the energy consumption. The assessment of life cycle emission indicates using biodiesel help reduce the emissions of CO<sub>2</sub> and such air pollution as CO, HC, and NOx. Furthermore, it makes less polluting to the water and soil. So the biodiesel show good renewability and ecological benefit.

Key Words: industrial ecology; rapeseed biodiesel; life cycle assessment