

基于生命周期的 燃料乙醇评价及 政策研究

JIYU SHENGMING ZHOUQI DE
RANLIAO YICHUN PINGJIA JI ZHENGCE YANJIU

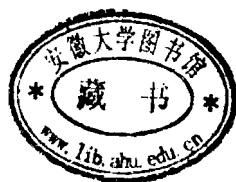
夏训峰 张 军 席北斗 主编



中国环境科学出版社

基于生命周期的燃料乙醇评价及 政策研究

夏训峰 张 军 席北斗 主编



中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

基于生命周期的燃料乙醇评价及政策研究/夏训峰, 张军, 席北斗主编. —北京: 中国环境科学出版社, 2012.6

ISBN 978-7-5111-0877-7

I. ①基… II. ①夏… ②张… ③席… III. ①乙醇—液体燃料—评价—研究 IV. ①TQ517.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 014067 号

责任编辑 黄晓燕
文字编辑 宋慧敏
责任校对 唐丽虹
封面设计 玄石至上

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (环评与监察图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)
印装质量热线: 010-67113404

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2012 年 6 月第 1 版
印 次 2012 年 6 月第 1 次印刷
开 本 880×1230 1/32
印 张 6
字 数 160 千字
定 价 25.00 元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】

前 言

伴随着中国经济的高速发展，中国的能源需求急剧增加。由于石油、天然气、煤炭等能源的过量开采，我国已面临严重的能源危机，寻找新型可替代能源，成为中国未来能源战略的关键。2004年，中国政府通过了《可再生能源法》，燃料乙醇作为再生能源成为了政府重点推广的新型能源。在燃料乙醇行业蓬勃发展的同时，一些问题也随之显现，如“与人争粮”、“与人争地”问题、燃料乙醇生产存在负的能量效益问题等。要彻底弄清这些问题，必须通过建立模型的方式对燃料乙醇生产进行全面的评价。通过查阅国内外研究资料来看，目前燃料乙醇生命周期评价方法研究取得了大量成果，但也暴露出一些问题，主要有：（1）生命周期边界划定、考虑的影响因素等条件不同，其研究结果存在很大差异，不具备可比性；（2）主要考虑能量效益，忽略了经济效益分析，使燃料乙醇在建设上是否可行不得而知；（3）环境效益评价集中在燃料乙醇使用过程的尾气排放分析，忽略了生产过程的环境问题；（4）片面强调温室气体排放效果，忽略了固体废物和液体废物排放；（5）缺乏对燃料乙醇生态工业系统的评价。针对上述问题，本书试图从以下角度进行完善：以当前我国主要燃料乙醇生产原料和工艺为研究对象，包括“原料种植—乙醇生产—乙醇使用，运输”等整个生产过程。采用统一的系统边界、清单收集要素，对其进行环境、经济、能源三方面的分析比较，并建立环境能源效益综合指标进行综合分析。此外，本书

运用碳平衡、生态足迹和能值等多种方法对燃料乙醇生命周期进行评价,希望寻找和完善能够全面评价燃料乙醇生产的方法。

全书共分十三章,其中第一章介绍生物燃料在国内外的发展现状;第二章介绍燃料乙醇常用原料,并分析我国燃料乙醇原料生产状况以及发展潜力;第三章介绍生命周期评价的基本方法,以及在国内外的发展情况;第四章确定燃料乙醇生产系统边界、清单收集内容和相关参数;第五章到第七章从能量、经济、环境三方面入手对燃料乙醇生命周期进行评价;第八章将燃料乙醇生产过程的温室气体转换成碳含量进行综合评价,并计算其对人体的损害;第九章采用能值分析方法对燃料乙醇生命周期过程的能量流、物质流、货币流进行综合评价;第十章针对目前生态农业、生态工业园的建立,对发展燃料乙醇循环经济系统进行评价;第十一章和第十二章分析燃料乙醇发展和国家安全问题,并参考国外关于发展燃料乙醇的政策,对我国燃料乙醇发展提出建议;第十三章结论。

本书是在中央级公益性项目(2007KYYW43)、水专项(2009ZX07106-03和2009ZX07632-02)的支持下完成的。编写过程中也参考了许多学者的研究成果,书后附有参考文献目录,有些引述的内容未能注明出处,在此向这些作者表示歉意,并致以深深的谢意。

限于时间和水平,书中的观点和内容尚不完善,不足和疏漏之处在所难免,敬请专家、同行和广大读者批评、指正。

目 录

第一章 生物燃料发展概述	1
1.1 国外燃料乙醇应用现状.....	2
1.2 国内燃料乙醇应用现状.....	5
第二章 燃料乙醇的原料资源	8
2.1 燃料乙醇生产的原料供应.....	8
2.2 我国农业产业结构现状.....	14
2.3 我国发展能源作物的潜力.....	15
第三章 生命周期评价方法	17
3.1 生命周期评价理论的发展.....	17
3.2 生命周期概念.....	18
3.3 生命周期评价的技术框架.....	19
3.4 生命周期评价的特征.....	22
3.5 生命周期评价的应用领域.....	23
3.6 LCA 国内外的研究现状.....	24
3.7 基于生命周期的 3E 评价.....	26
第四章 燃料乙醇生命周期清单分析	28
4.1 定义目标与确定范围.....	28
4.2 数据收集方法.....	35

第五章	燃料乙醇生命周期能量效益评价	41
5.1	能量平衡的理论依据	41
5.2	能量分析中的基本概念	42
5.3	燃料乙醇生命周期评价模型	44
5.4	燃料乙醇生命周期计算参数确定	47
5.5	不同原料生产燃料乙醇的能量效益分析	54
第六章	燃料乙醇生命周期经济性评价	69
6.1	成本分析	69
6.2	经济性模型建立	69
6.3	不同原料生产成本	73
第七章	燃料乙醇生命周期环境影响评价	75
7.1	燃料乙醇生命周期环境影响评价模型	75
7.2	环境排放清单分析结果	84
7.3	环境和经济指标分析	89
第八章	燃料乙醇碳平衡分析	94
8.1	碳平衡分析的相关概念	95
8.2	燃料乙醇碳平衡系统	97
8.3	碳平衡分析模型	98
8.4	数据来源	100
8.5	计算结果与讨论	101
第九章	燃料乙醇能值分析	104
9.1	能值理论	104
9.2	能值与能量的比较	106
9.3	能值指标	108
9.4	能值分析的基本步骤	112
9.5	能值分析在生物质燃料乙醇中的应用	114

第十章 燃料乙醇循环经济系统分析	120
10.1 循环经济系统的内涵与组成.....	120
10.2 循环经济系统的产业共生原理.....	129
10.3 燃料乙醇循环经济系统结构.....	132
10.4 基于生态足迹的燃料乙醇循环经济系统分析.....	138
10.5 基于能值理论的燃料乙醇循环经济系统分析.....	146
第十一章 生物燃料国家安全问题	153
11.1 生物燃料与能源安全.....	153
11.2 生物燃料与粮食安全.....	157
第十二章 燃料乙醇政策建议	159
12.1 国外生物燃料法规政策.....	159
12.2 我国推广生物燃料的法规条例.....	164
12.3 我国燃料乙醇发展出现的问题.....	166
12.4 政策建议.....	168
第十三章 结论	171
参考文献	174

第一章 生物燃料发展概述

20 世纪 70 年代石油危机以来，一些国家开始尝试利用生物资源生产液体燃料，发展生物燃料已成为发达国家提高能源安全、减排温室气体、应对气候变化、调控石油价格的重要措施。有数据显示，按照目前世界汽车保有量预计，到 2020 年全球汽车保有量将达到 12 亿辆，主要增幅来自发展中国家。国际能源机构（IEA）的统计数据表明，2001 年全球 57% 的石油消费在交通领域（其中美国达到 67%）。预计到 2020 年交通用油占全球石油总消耗的 62% 以上。美国能源部预测，2020 年以后，全球石油需求与常规石油供给之间将出现净缺口，2050 年的供需缺口几乎相当于 2000 年世界石油总产量的两倍。与此同时，交通能源消耗也是造成局部环境污染和全球温室气体排放的主要来源之一。为此，全球已达成共识：交通能源转型势在必行。截至 2005 年，全球生物质燃料的消耗量占到全部车用燃料的 1%，预计到 2050 年，该数值将提高到 11% 左右。而在目前使用的生物质燃料中，燃料乙醇的消费量又占到 85% 以上，是当今世界最重要的化石替代燃料。

燃料乙醇是以淀粉质类（玉米、木薯等）、糖质类（甘蔗、甜菜、甜高粱等）和木质纤维素类（木材、农作物秸秆等）为原料，经发酵、蒸馏、脱水后而制得 99.5% 以上的无水乙醇，按一定比例加入到汽油中，不仅是优良的油品增氧剂，还是汽油的高辛烷值调和组分，同时又降低了油品的芳烃含量，使油品的燃烧性能、动力性能和环保性能均得到改善。

1.1 国外燃料乙醇应用现状

目前,世界燃料乙醇工业正处于快速发展阶段,但各国燃料乙醇工业发展极不均衡。巴西、美国率先于 20 世纪 70 年代中期开始发展燃料乙醇产业,随后欧洲、亚洲等国纷纷效仿,均形成了规模化生产和商品化生产。

1.1.1 美国

美国是全球最大的乙醇生产国,早在 20 世纪 30 年代就开展了燃料乙醇的研究工作。美国发展燃料乙醇的初衷是为了国家的能源安全,后来更多是出于对环境保护的考虑。20 世纪 70 年代的石油危机促使美国政府为减少对进口原油的依赖,而决定大力推广燃料乙醇的生产和车用乙醇汽油的使用。1979 年,美国提出了联邦政府的“乙醇发展计划”,开始大力推广使用含 10%乙醇的混合汽油(E10 乙醇汽油)。除 E10 乙醇汽油以外,在美国市场上还存在 E85 燃料乙醇。美国的燃料乙醇产业得到迅速的发展,燃料乙醇产量从 1979 年的 3 万多 t 迅速增加到 1990 年的 260 多万 t。同时,美国约有 250 万辆灵活燃料汽车使用 E85 燃料乙醇,约有 500 个加油站可以提供燃料乙醇。

美国共有 50 个州,其中,20 个州生产燃料乙醇,主要集中在中北部和西部地区。1990—2000 年,美国燃料乙醇产量基本保持每年 20%的增速。2000 年以后,保持每年 10%的增速。截至 2002 年,这 20 个州已建有 73 家工厂,总计生产能力达到 632 万 t/a,另外还有 34 套装置在扩建。同时联邦政府采取增加财政补贴等办法,鼓励乙醇生产商大量生产燃料乙醇,并支持他们同普通燃料生产企业进行竞争。

美国近年来加大了对纤维素乙醇发展的支持力度。为了促进纤维素乙醇的发展,于 2005 年颁布的《美国能源政策法案(EPACT)》制定了一系列的优惠政策。

1.1.2 巴西

巴西是世界上最早开发燃料乙醇的国家，也是当今该行业发展最为成熟的国家之一。1925年，乙醇汽车首次完成400km长距离测试，1931年出台推动燃料乙醇发展的法规，规定政府公务车汽油中需添加10%乙醇，公众车汽油中需添加不得低于5%的乙醇。20世纪70年代的全球性石油危机给正在快速发展的巴西经济造成了沉重的打击。为了减少对石油的依赖，确保能源安全，巴西政府实施了以燃料乙醇为主的替代能源发展战略，提高了燃料乙醇汽油中的乙醇比例，加大了对燃料乙醇的研发投入，并扶持相关企业。1975年，巴西政府颁布了“国家乙醇燃料计划”，计划初期以20%的体积比例将无水乙醇加入汽油中；1993年将加入汽油中的比例提高到22%；2002年再次将该比例提高到25%。目前，巴西乙醇汽油中的无水乙醇比例是世界上最高的，同时也是世界上唯一一个不使用纯汽油作为汽车燃料的国家。

巴西生产燃料乙醇的主要原料是甘蔗。2007年甘蔗产量超过5.5亿t，其中80%以上用于生产乙醇燃料和蔗糖。目前，巴西共有320多家企业生产燃料乙醇，其中联产燃料乙醇和糖的企业有205家，仅生产燃料乙醇的企业有115家。乙醇生产能力为5088万t/a。燃料乙醇储存能力占生产能力的60%（相当于763万t）。2006年，巴西燃料乙醇生产量为175亿L，其中出口30亿L，其余97%的燃料乙醇作为燃料使用。巴西能源研究公司表示，为了满足国内市场快速增长的需求，计划在未来10年内将投资兴建246座新的乙醇燃料生产厂，其中114家已经处于建设之中。

巴西也是全球最大的乙醇出口国之一。据2005年环球能源网统计，随着乙醇产量的大幅提升，巴西已通过管道、铁路和水运等各种方式将其生产的乙醇出口到了日本、欧洲、亚洲等地，2005年出口量为24.3亿L。预计到2013年，巴西计划将乙醇燃料的年产量扩大到350亿L，是目前年产量的2倍以上。其中约100亿L将用于出口。

巴西国内主要的汽车燃料有 4 种：纯乙醇（含水乙醇，即 93%乙醇+7%水）、乙醇汽油（22%乙醇+78%汽油）、MEG 燃料（60%乙醇+33%甲醇+7%汽油）和柴油。在发展燃料乙醇的同时，巴西还特别注重在车辆调整方面采取措施。目前，巴西已生产 500 多万辆专用乙醇汽车，大量的汽油车也改为乙醇汽车，并且还规定在巴西出售的新款汽车均需装配“混合燃料汽车”发动机，可使用任意比例的汽油和乙醇。巴西不但在全国范围内供应车用乙醇汽油，近期又成功地将乙醇燃料应用于航空领域。

1.1.3 欧盟

1994 年欧盟通过决议，决定开始发展生物能源，并给予生物燃料产品免税的优惠政策，以鼓励生产和使用燃料乙醇。在税收优惠政策的支持下，欧洲国家使用燃料乙醇的比例呈上升趋势。1997 年乙醇总产量的 5.6%用作燃料，2001 年燃料乙醇使用量上升到总产量的 13%。据欧洲生物乙醇燃料协会（EBD）最新发布的信息，2006 年，欧洲燃料乙醇产量达到 15.65 亿 L，比 2005 年的 9.13 亿 L 增加了 71%。其中，德国燃料乙醇产量最大，为 4.31 亿 L，占整个欧洲燃料乙醇总量的 27.5%；西班牙位居第二位，产量达到 4.02 亿 L，占 25.7%；法国位居第三位，燃料乙醇产量为 2.2 亿 L，占 16%。2006 年，欧盟燃料乙醇消费量达到 17 亿 L。2007 年 3 月欧盟通过决议，为欧洲各成员国设立目标，要求在 2020 年之前，实现生物燃料在交通能源消耗中的比例达到 10%。瑞典是目前欧洲国家中使用车用燃料乙醇含量最高的国家，在瑞典车用燃油中主要使用 E85（85%的乙醇+15%的汽油）和 E95（95%的含水乙醇+5%柴油组成）的燃油，但是这些燃料只适用于一些特殊的汽车。

1.1.4 其他国家

印度是世界上仅次于巴西的第二大产糖国。2002 年印度开始开发生物燃料，2003 年印度政府要求部分炼油厂在燃料中掺混 5%的乙醇。根据印度生物燃料 Task Force 公司报告显示，到 2011 年底，

印度将实现将燃料乙醇使用量提高到 10% 的目标。

日本 1986 年开始实施燃料乙醇发展计划, 目前乙醇年生产能力约为 28 万 t, 其中发酵乙醇年生产能力 16.5 万 t, 合成乙醇年生产能力 11.4 万 t。由于资源的匮乏, 目前日本还是不得不从海外大量进口乙醇。根据日本环境省要求, 到 2010 年大部分汽车采用乙醇混合料达 10% 的乙醇汽油, 到 2030 年日本国内车用汽油全部采用与生物燃料混合的燃料。同时为提高国内乙醇的供应能力, 日本还积极将原料扩大到木屑、稻草等纤维上, 加快开发纤维素制乙醇技术。

世界观察研究所在 2007 年年底出台的一份报告中估计, 要生产全球交通运输所需燃料的 10% 的生物质燃料, 需占用全球 9% 的耕地, 并将导致粮食价格飙升。2007 年 9 月经济合作与发展组织 (OECD) 在报告中也认为, 生物质燃料产业的增长可能对环境 and 生物的多样性产生负面影响。为了追求经济利益而种植专门的生物质能源作物, 可能破坏对自然生态系统的保护。如果考虑到酸化、化肥应用、生物转化损失以及农业杀虫剂的毒性, 燃料乙醇和生物柴油对整个环境造成的影响很容易超过汽油和柴油。应慎重考虑燃料乙醇的发展走向, 尽量使用纤维素作为原料生产, 避免“与人争食, 与粮争地”。

1.2 国内燃料乙醇应用现状

2005 年, 中国原油消费量 3.23 亿 t, 居世界第二, 国内生产原油 1.81 亿 t, 净进口原油 1.19 亿 t, 净进口轻柴油、航煤、燃料油等石油产品 1.7 万 t, 石油对外依存度达 45%。估计 2020 年国内自产石油 2 亿 t, 缺口 2.5 亿 t, 对外依存度 55%, 我国将面临严重的石油短缺局面。大力发展燃料乙醇产业, 可以减轻石油供应压力, 降低石油对外依存度, 保证能源安全。

2000 年我国在黑龙江和河南两省六市开始乙醇汽油试点工作, 并逐步向全国推广燃料乙醇汽油。2000 年 9 月我国有关科研单位开始对乙醇作为车用燃料的可行性进行系统研究, 包括燃料乙醇作为

车用燃料的可行性试验研究、乙醇汽油的行车试验、燃料乙醇作为车用燃料的经济性分析、变性燃料乙醇及车用乙醇汽油国家标准的制定、燃料乙醇金属腐蚀抑制剂研究、车用乙醇汽油应用技术研究等。2001年4月和2004年4月,国家质量技术监督局分别发布《变性燃料乙醇国家标准》(GB 18350—2001)和《新车用乙醇汽油强制性国家标准》(GB 18351—2004),为我国燃料乙醇汽油的发展提供了依据。目前中国已成为世界第三大生物燃料乙醇生产国。

到“十五”期间,我国已在黑龙江、吉林、河南、安徽4省建成4个生物燃料乙醇生产试点项目,年产量达到102万t左右,使用的主要是储备粮中时间较长的陈化粮(其中80多万t为玉米、20万t为其他粮食和薯类植物生产的),可以混配1020万t生物燃料乙醇汽油,乙醇汽油的消费量占到全国汽油消费量的20%。

表 1-1 4家生物燃料乙醇企业概况

公司	吉林生物燃料乙醇有限责任公司	黑龙江华润酒精有限公司	河南天冠燃料乙醇有限公司	安徽丰原燃料有限公司
厂址	吉林	肇东	南阳	蚌埠
股东	中石油、吉林粮食集团、中国华润总公司	香港华润集团	河南天冠集团、中石化、河南省建设投资总公司	安徽丰原生物化学股份有限公司、中石化安徽石油总公司
年产量	30万t	10万t	30万t	12万t
加工工艺	玉米湿法	玉米干法	小麦湿法	玉米湿法
在建产量	30万t/a	—	—	32万t/a
供应区域	吉林10万t,辽宁20万t	黑龙江	河南13万t,湖北、河北13个地、市17万t	安徽10万t,山东、江苏、河北14个地、市27万t

我国燃料乙醇发展目标是:到2010年达到300万t,到2020年达到1000万t。这应该是一个较为保守的数据。中粮集团总裁助理

兼生化能源事业部总经理表示，中粮集团预计年产将达到 310 万 t 燃料乙醇，形成约 600 万 t/a 的玉米加工能力。

中国发展生物质燃料的适宜原料植物主要包括三类：木质素、半纤维素、富含纤维素的能源植物，如速生林、农作物秸秆等；富含类石油成分的能源植物，如绿玉树、古巴香胶树、小桐子树等；富含高淀粉、高糖且适合在边际性土地生长的能源植物，如甜高粱、木薯等。目前我国自行培育的具高抗逆性和可以在全国种植的甜高粱，每公顷能产生生物燃料乙醇 6t，比甘蔗高 30%，高出玉米产量的 3 倍。同时我国积极应用转基因技术选育和开发能源作物原料，已开发出利用甜高粱茎秆汁液等生物质制取乙醇的技术工艺，已建设年产 5000t 乙醇的甜高粱茎秆制取生物燃料乙醇工业示范工程；纤维素废弃物制取乙醇燃料技术已进入年产 600t 规模的中试阶段。

第二章 燃料乙醇的原料资源

燃料乙醇是由糖、淀粉或纤维素水解所得的糖发酵产生的。因此，制取燃料乙醇的生物原料主要包括三种类型：糖类资源、淀粉类资源和纤维素类资源。糖类资源主要有甜菜、甘蔗、甜高粱等；淀粉类资源主要有粮食（小麦、玉米等）、薯类（甘薯、木薯等）等，纤维素类资源主要有秸秆、杂草、薪柴以及农林加工废弃物等，并以草本能源作物为主。淀粉和糖类原料是我国乙醇生产常用的原料，在“十五”期间生产燃料乙醇的主要淀粉类原料为陈化粮；纤维素类原料则是我国农村的传统能源。

2.1 燃料乙醇生产的原料供应

乙醇生产一般要经过原料的预处理（粉碎、蒸煮）、糖化、发酵和蒸馏等几个步骤。从乙醇生产工艺的角度来看，乙醇生产所用原料可以定义为：凡是含有可发酵性糖或可变为发酵性糖的物质都可以作为乙醇生产的原料。

由于乙醇生产工艺和发酵微生物的应用范围不断扩大，技术不断改进，可发酵性糖和可转化为发酵性糖的物质也随之扩大，即乙醇发酵的原料范围在不断地扩大。如：半纤维素水解液中主要的糖分——木糖，原本被认为是一种不可发酵的糖，但现在成为可以发酵的糖，半纤维素也就变成了一种乙醇生产的原料。

从燃料乙醇 30 多年来规模化发展历史看，各国都是从本国的优势资源出发来发展燃料乙醇产业，不同的国家在不同的地区原料又有所侧重。巴西以甘蔗为原料，美国以玉米为原料，印度使用甘

蔗糖蜜，泰国使用木薯和甘蔗，法国使用甜菜糖蜜等，我国使用玉米、小麦和木薯。

用淀粉质原料发酵生产乙醇是我国当前生产乙醇的主要方法。它利用谷物、薯类及野生植物等富含淀粉的原料，在微生物的作用下将淀粉水解成葡萄糖，进一步发酵产生乙醇。鉴于目前国内的燃料乙醇生产厂多以淀粉质为原料进行生产，所以下面重点介绍燃料乙醇生产所用的淀粉质类物质。

2.1.1 薯类原料

2.1.1.1 甘薯

甘薯俗称地瓜、红薯、山芋或番薯。新鲜甘薯可以直接作乙醇生产的原料，但是，为了便于储存，供工厂全年生产，一般都应将甘薯切成片、条或丝，晒成薯干。约 3kg 鲜薯晒制 1kg 薯干。甘薯的主要成分是淀粉，此外，还含有 3% 的糊精、葡萄糖、蔗糖、果糖或微量的戊糖。蛋白质含量不多，其中 2/3 为纯蛋白，1/3 为酰胺类化合物。此外还有少量的脂肪、纤维素、灰分和树胶等。甘薯的化学成分，见表 2-1。

表 2-1 甘薯的化学成分

单位：%

种类	水分	粗蛋白	粗脂肪	碳水化合物	粗纤维	无机盐
甘薯干	12~14	5~6	0.5	65~68	1.1~1.5	2.4
华东甘薯	75.3	1.1	0.2	21.5	—	0.6
华南甘薯	74.9	0.6	0.5	20.2	0.2	0.6
华北甘薯	81.6	1.3	0.1	16.2	0.3	0.5

从表 2-1 可见，原料的品种不同，可发酵物质的含量有较大的差别。为此，改良农作物品种对乙醇产业来说有很大的经济价值，然而随着高产小麦、玉米新品种的不断推出，薯类作物在粮食类作物中的收益比重日益降低，再加上薯干晾晒过程受天气影响较大，