

专业学位
硕士学位论文
论文

餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期
评价

肖锋

廣西大學

二〇一八年六月

分类号 TK6

密级 公开

UDC 621.4

专业学位硕士学位论文
餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期
评价

肖 锋

专业学位名称 动力工程

指导教师 黄福川教授

论文答辩日期 2018年5月16日 学位授予日期 _____

答辩委员会主席 林榕端

餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期评价

摘要

近年来,我国城市化进程不断加快,汽车保有量持续增加,随之我国资源、环境形势日益严峻,寻找清洁的可再生能源替代传统车用燃料已成为社会各界关注的热点。基于此,本课题以餐厨垃圾厌氧发酵生产的生物质车用燃气为研究对象,结合南宁市餐厨垃圾资源化处理项目的实例,应用生命周期评价(LCA)方法,对生物质车用燃气的全生命周期进行了环境影响评价,并将这一结果与传统柴油进行比较分析。主要的工作和研究情况如下:

第一,分析了我国的能源形势,随着我国汽车保有量持续增加,城市环境空气质量日益恶化,寻找清洁可再生能源替代传统车用燃料已迫在眉睫。

第二,介绍了生命周期评价的理论及方法,并对该评价方法的优点以及局限性进行了分析。

第三,依据南宁市餐厨垃圾资源化处理项目的实例,构建了生物质车用燃气的生命周期分析模型,对生物质车用燃气的生命周期一次能源消耗和排放进行了分析。结果显示:生物质车用燃气全生命周期的一次能源消耗和污染物排放均低于传统柴油。

第四,基于EU、GWP、AP、HTP、POCP、AQP共六种环境影响类型,对生物质车用燃气的生命周期进行环境影响评价。评价结果

可知：生物质车用燃气全生命周期各类型的环境影响均低于传统柴油；其综合环境影响比柴油低 32.88%。

最后，通过敏感性分析。结果表明：生物质车用燃气的全生命周期环境影响随煤电比例的下降而减少；当煤电比例降至 55% 时，生物质车用燃气全生命周期一次能源消耗下降 17.1%，综合环境影响下降 11.56%。在此基础上，本文针对生物质车用燃气的发展提出了改进建议。

关键词：餐厨垃圾 生物质燃气 生命周期评价 节能减排

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF VEHICLE GAS PRODUCED BY KITCHEN WASTE

ABSTRACT

In recent years, urbanization process continues to accelerate in china, hence the amount of car ownership continues to grow. With the increasingly severe resource and environmental situation, searching for clean renewable energy substitute for traditional fuel has become a hot topic among all walks of life. This research object focuses on biomass vehicle fuel gas produced by anaerobic fermentation of kitchen waste, and takes the Nanning restaurant kitchen waste resource treatment project as an example. By using the life cycle assessment (LCA) method to evaluate the whole biomass vehicle gas about its impact on environment and this result was compared with traditional diesel. The main work and research are as follows:

Firstly, the analysis of China's energy situation, as China's car ownership continues to increase, the city's environmental air quality is deteriorating, the search for clean and renewable energy to replace traditional fuels is imminent.

Secondly, it introduces the theory and methods of life cycle assessment, analyzes the merits and limitations of this evaluation method.

Thirdly, based on the example of the Nanning restaurant kitchen waste resource treatment project, a life cycle analysis model of biomass vehicle gas was constructed to analyze the primary energy consumption and emission of the life cycle of the biomass vehicle gas. The results show that: the primary energy consumption and pollutant emissions of biomass gas are lower than traditional diesel.

Fourthly, based on the six types of environmental impacts of EU, GWP, AP, HTP, POCP and AQP, the environmental impact assessment of biomass gas life cycle is conducted. The evaluation results show that the environmental impacts of various types of biomass gas in the whole life cycle are lower than that of traditional diesel, its overall environmental impact is 32.88% lower than that of diesel.

Finally, through sensitivity analysis, the results show that: the whole life cycle environmental impact of biomass fuel gas decreases with the decrease of coal-power ratio. When the coal-to-electricity ratio fell to 55%, the primary energy consumption of biomass gas for the entire life cycle decreased by 17.1%, the overall environmental impact decreased by 11.56%. On this basis, this paper proposes some suggestions for improving the development of biomass gas.

KEY WORDS: Kitchen Waste; Biomass Gas; Life Cycle Assessment; Energy Saving; Emission Reduction

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
符号说明.....	VII
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究意义与目的.....	2
1.3 沼气动力汽车的发展概况.....	2
1.3.1 国外沼气动力汽车的发展概况.....	2
1.3.2 国内沼气动力汽车的发展概况.....	4
1.4 车用燃料的生命周期研究概况.....	5
1.4.1 国外车用燃料的生命周期研究概况.....	6
1.4.2 国内车用燃料的生命周期研究概况.....	7
1.5 课题研究内容.....	9
1.6 创新点.....	11
第二章 生命周期评价简介.....	12
2.1 生命周期评价的概念.....	12
2.2 生命周期评价框架.....	12
2.2.1 目标与范围的确定.....	13
2.2.2 清单分析.....	15
2.2.3 生命周期影响评价.....	16
2.2.4 结果解释.....	16
2.3 生命周期评价特点.....	17
2.4 本章小结.....	18
第三章 餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期分析模型.....	19
3.1 评价对象的选取.....	19
3.2 案例分析.....	20
3.3 系统边界.....	21

3.4 生命周期分析模型的构建.....	22
3.4.1 上游阶段.....	22
3.4.2 下游阶段.....	24
3.5 本章小结.....	24
第四章 餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期清单分析.....	25
4.1 基础数据清单.....	25
4.2 案例清单.....	27
4.3 结果与讨论.....	28
4.4 本章小结.....	32
第五章 餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期环境影响评价.....	33
5.1 分类与特征化.....	33
5.2 归一化与量化.....	36
5.2.1 归一化.....	36
5.2.2 加权.....	37
5.3 评价结果.....	38
5.4 对比分析.....	39
5.5 敏感性分析.....	42
5.6 改进建议.....	44
5.7 本章小结.....	45
第六章 总结与展望.....	47
6.1 全文总结.....	47
6.2 研究展望.....	47
参考文献.....	49
致谢.....	55
攻读硕士期间论文发表情况.....	56

符号说明

符号	意义	单位或量纲
<i>e</i>	能耗	MJ
<i>E</i>	总能耗	MJ
<i>ep</i>	污染物排放量	g
<i>EP</i>	污染物排放总量	g
<i>EU</i>	能量使用	MJ·km ⁻¹
<i>HTP</i>	人体毒性潜势	kg (人体重)
<i>GWP</i>	全球变暖潜势	kg CO ₂ -eq
<i>AP</i>	酸化潜势	kg SO ₂ -eq
<i>AQP</i>	气溶胶潜势	kg PM ₁₀ -eq
<i>POCP</i>	光化学烟雾潜势	kg C ₂ H ₄ -eq

第一章 绪论

1.1 研究背景

能源是国民经济和社会发展的根本支柱，也是人们赖以生存的基本条件^[1]。目前人类的生存和社会经济发展已然受到能源和环境的制约，人们开始思考如何改变以往能源投入高、环境污染大的经济发展模式，转向人与自然和谐的可持续发展模式^[2]。

2010年我国成为仅次于美国的全球第二大汽车拥有国以来，中国汽车保有量仍持续增长。截止2017年末，全国民用汽车保有量达2.17亿辆，比2016年末增长11.8%^[3]。一直以来，我国交通运输业对石油资源的依赖度很高，2015年我国交通运输业的石油制品消耗占全国终端石油制品消耗量的56.6%^[4]。而随着我国汽车保有量的持续增加，我国对原油的进口依赖度也随之节节攀升。与此同时，我国能源安全必将面临更大的挑战。

近年来，经政府及有关机构的大力推动，可持续发展思想开始蔓延至我国的工业产业发展，人们对产品环境影响的关注，从生产、使用等环节不断扩展到产品的整个生命周期。试图通过改善产品的生产技术和工艺，并加大产品生产过程中的环境污染治理，从而实现充分、合理利用自然资源和能源，尽可能削弱产品所带来的环境影响^[5]。为此，国家相关部委相继发布实施了《能源技术革命创新行动计划（2016~2030年）》、《绿色制造2016专项行动实施方案》、《工业绿色发展规划（2016~2020年）》等一系列政策措施，从能源、制造、使用、监管四个环节，将绿色发展贯穿至汽车的整个生命周期^[6]。

生命周期评价(LCA, Life cycle assessment,)作为一种环境管理工具，能够定量的分析产品从原料开采、加工处理、零部件生产、产品生产、产品运输、产品使用、废旧产品的回收处理等整个生命周期的环境影响、能源消耗、材料利用和污染物排放，使政府和企业对产品的环境影响有更加全面的了解和认识，进而实现产品的可持续发展。生命周期评价已经普遍应用于整个工业社会，涉及到产品及其生产工艺的设计和改进，环境政策制订以及废弃物管理等各个方面，成为众多发达国家制定工业发展战略的首选工具^[7]。

1.2 研究意义与目的

随着我国社会经济迅速崛起,对能源的需求日益增加,2015年我国对石油资源的进口依存度已经超过60%^[8]。据有关研究评估,到2020年全球交通用油占全球石油总消耗量的比例将达到62%以上^[9]。同时大量证据表明,汽车的能源消耗与污染物排放已成为局部环境污染和全球温室效应的主要原因之一。目前日益严峻的资源、环境形势已严重制约了现代汽车工业的发展,向更为清洁的可再生能源转型已成为全球关注的热点。

此外,随着我国城市化进程不断加快,汽车保有量的迅速增长,日渐恶化的城市环境空气质量,不断提醒人们,节能减排将成为人类社会经济发展面临的主要问题之一。为应对这类历史性挑战,推行城市公交车用燃料的多元化是一条有效途径^[10, 11]。

沼气主要成分为甲烷(CH_4),其作为一种清洁的可再生生物能源,在其生产过程中,不仅可以充分利用废弃的餐厨垃圾,改变城市餐厨垃圾的处置方式,而且在生产和使用过程中能有效降低环境污染。目前将沼气制成车用燃气以替代传统车用燃料的应用越来越受到推广^[12, 13]。

然而,将沼气净化后作为车用燃料以替代传统燃料的发展是一个复杂的系统工程。若草率地照搬国外经验和资料来制订我国相关行业的发展战略,可能导致仅仅只关注孤立或局部的问题;可想而知,最终将很难得出充分合理的结论。因此,本文将由广西自治区餐厨垃圾处理的实际出发,从全生命周期的角度来分析和研究餐厨垃圾厌氧发酵生产车用燃气的一次能源消耗、环境影响,全面衡量生物质车用燃气这一技术路线的特点。

1.3 沼气动力汽车的发展概况

1.3.1 国外沼气动力汽车的发展概况

欧洲的沼气技术引领全球。近些年来,欧洲的沼气产业已趋于成熟,基础设施及配套政策也比较完善,起初其沼气主要用来供暖和发电,而后经净化后作为车用燃料和民用燃气,并实现了规模化、产业化和商品化。欧盟沼气产量最大的

两个国家为英国和德国，其沼气基本用于发电及供热。截止 2012 年底，德国沼气发电量达到 26650 GW·h^[14]，占欧洲沼气发电总量的 50%左右^[15]。

瑞典、瑞士是将沼气净化作为汽车替代燃料发展最好的国家，其超过 60% 的沼气是以生活污水为原料产自于市政污水处理厂的污泥消化池；其次以城市生活垃圾以及工业污水为原料生产的沼气分别占 30%、10%左右。瑞典已经成功地利用净化后的沼气替代汽车、火车的传统燃料，并已完成了一批沼气工程以及支持沼气动力的汽车发展的基础设施。2012 年，这种生物质车用燃气已经应用到瑞典约 4.4 万辆汽车中，完成建设加气站共 195 个^[16]。

林雪平(Linköping)沼气厂位于瑞典东南部，每年处理各种有机垃圾产生的沼气的量约为 20~30 GW·h。自 2001 年起，经净化后的沼气已满足当地约 400 辆城市公共车的燃料需求，这种生物质燃气主要通过地下管道直接输送给 2km 外的供热站以及汽车加气站。林雪平市的纯沼气动力的列车为世界首例，其城内所有的公交车都使用沼气动力的驱动，还有 9 个可以供轿车加生物燃气的加气站。截止 2013 年底，该市公共交通实现了 100%沼气供电^[17]。拥有 900 万人口的瑞典，目前已经有 40 多家沼气净化提纯工厂投入运营，该国沼气消费量已经超过了天然气^[18]。据瑞典沼气协会预估，按目前该国能源消费量以及沼气工程发展趋势来看，2020 年瑞典将有望成为世界上首个不依赖石油的国家^[19]。

法国第四大城市里尔市区内的所有公交车的燃料均来自于沼气。该国每年约有 400 万 m³ 的绿色清洁沼气(燃料)产自一家环保型循环工厂。这一举措有效地缓解了该市区的城市环境质量，成为该国沼气示范工程^[20]。



图 1-1 法国甲尔市区行驶的沼气公交车和奥迪 A4 沼气动力的车

Fig. 1-1 The driving biogas buses in French and Audi A4 biogas power car

德国奥迪推出一款沼气燃料驱动的 A4 车型，其通过改进发动机技术，汽车动力得到了较大提升。在正常工况下，其最大输出功率达到 588 kw，最高车速

超过布加迪的最高速度 20km/h^[21]。

荷兰首先在 10 辆 MAN 铰链公交车上试用了以沼气制备的燃料。该国格罗宁根市将净化后的沼气替代传统燃料应用于部分公交车上,实现了公交系统向更清洁、环保方向的转型。该市计划将在格罗宁根市发展超过 250 辆纯沼气动力的公交车或以压缩天然气(CNG)和沼气为混合动力的公交车^[22]。

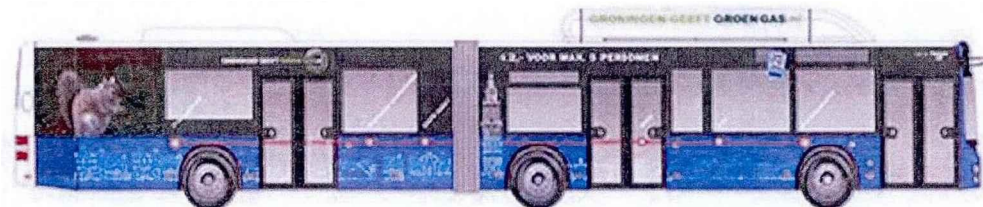


图 1-2 MAN 生产的纯沼气动力的铰链公交车

Fig. 1-2 Pure biogas power hinge bus produced by MAN

车用沼气燃料是将沼气净化为高热值的清洁生物质能源,作为汽车燃料使用,净化后的沼气热值、物理化学性能等多项指标非常接近或达到常用的天然气的质量标准。在国外,这一生产技术路线已经较为成熟,在欧洲已完全实现了工业化生产。

1.3.2 国内沼气动力的汽车的发展概况

我国为应对紧迫的能源环境形势,相继出台了一系列政策推广新能源汽车,尤其在车用替代燃料的领域。而沼气作为一种清洁的生物质能源,沼气动力的汽车的配套工程建设也同样受到了相当的重视。

2004 年鞍山市垃圾填埋制取车用燃料示范工程投入试运行,该工程项目得到联合国全球环境基金(GEF)支持,占地面积 45 万平方米,填埋容量 900 万吨,日处理垃圾 1200 吨,日产沼气体量 10000m³,净化后的沼气体量可达 6000m³,产品为净化垃圾填埋气压缩气(CLFG),用作汽车燃料^[23]。

河南安阳市贞元集团 2007 年启动“有机废弃物资源化处理制取车用沼气燃料工程”,该项目在由丹麦政府援助我国的沼气方面高级技术专家的指导下,采用厌氧发酵的关键技术,以城市生活垃圾、作物秸秆和畜禽粪便等为原料,将得到的沼气进行净化提纯处理制取车用燃气。在净化工艺处理后,沼气(中甲烷含量由原先的 60%~65%提纯至 97%以上,且各项指标均能达到国家车用压缩天然气

(CNG) 标准, 该项工艺技术达到国际领先水平, 总投资 4.5 亿元, 设计规模年产生车用沼气 (2200 万 m^3)。

2010 年 10 月东风汽车股份有限公司成功研发第一轮样车, 并设计出 3 款适合改装成各种环卫车辆、公交车及城市客车的底盘, 而这些底盘是针对沼气(动力系统而研发的。

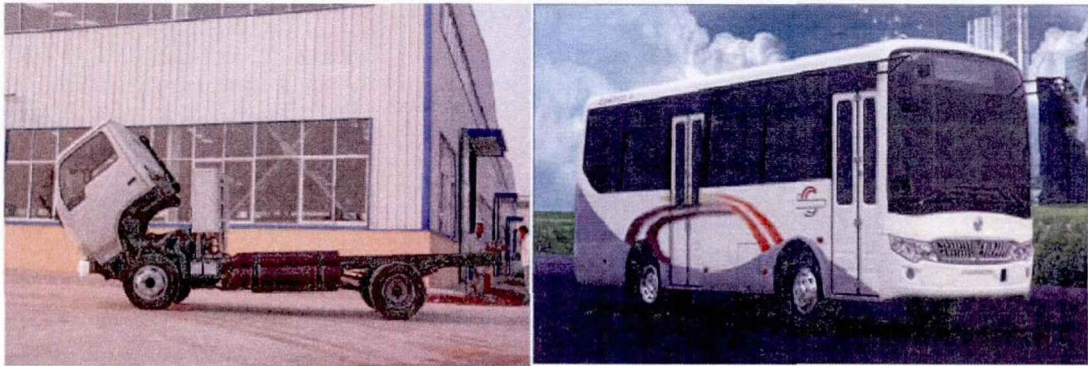


图 1-3 东风公司开发的沼气车底盘和沼气动力的客车

Fig. 1-3 The chassis of the biogas car and the biogas bus developed by Dongfeng company

2011 年, 广西武鸣生物质燃气集中供气示范工程正式启动, 该项目以畜禽粪便为原料将得到的沼气(经净化作为车用燃气(提供给当地出租车使用, 是国内首个日产量上万 m^3 的沼气工程。目前该项目产品已经满足了南宁市近 100 辆出租车的燃料需求, 由于价格优于汽油, 因此每年可为出租车司机节省约 2 万元成本。

2015 年 3 月广西南宁市餐厨废弃物资源化利用和无害化处理项目正式投入运行。该项目由广西蓝德再生能源有限公司承担, 总投资 1.2 亿元的垃圾处理厂一期的处理能力为每天 200 吨餐厨垃圾、预计年产生物质车用燃气 (350 万 m^3)。该项目计划将净化后的沼气(作为该市公交车燃料, 以替代高排放的传统燃料, 目前正在推进中。

1.4 车用燃料的生命周期研究概况

一种车用燃料从原料的获取、运输、再经加工转换、成品运输、车辆运行, 直至最终消耗完毕的整个过程即为车用燃料的生命周期。一般来说, 车用燃料的生命周期主要包括燃料上游、燃料下游(车辆运行)和车辆周期三个部分, 为便于开展研究工作, 也可以将其看作燃料循环与车辆循环两个系统。目前, 关于车用替代燃料的生命周期研究主要集中在燃料循环。

1.4.1 国外车用燃料的生命周期研究概况

西方发达国家最早开始展开对车用燃料的生命周期研究，特别是北美和欧洲，主要由于这些地区交通运输业的资源消耗、环境影响较大，而民众日益加强的环保意识也对车用燃气生命周期的研究与应用起到了促进作用。早在上世纪90年代初，就已经出现了比较系统和全面的车用燃料生命周期研究。

1991年，Delucchi^[25]对电力生产和多种交通工具所使用的燃料进行了生命周期温室效应分析，并建立了初步的评估模型。该项研究表明：制氢和采用核能发电将能够极大减少温室气体排放；煤基燃料的温室气体排放相对其他燃料更严重；基于天然气的燃料，其温室效应从大到小的排序依次为：天然气制甲醇、压缩天然气、液化天然气、天然气发电。

Malcolm A Weiss等^[26]采用生命周期分析法，对以原油为原料的汽油、柴油，原料为天然气的费-托柴油(FTD: Fischer-Tropsch Diesel)、压缩天然气、氢、甲醇以及电力作为汽车动力能源展开了一系列研究，主要对这些燃料的生命周期能耗、温室气体排放以及使用成本进行了综合评估。该研究显示：通过持续改进传统汽油发动机技术，在降低能耗和温室气体排放约1/3的同时，会增加用户成本约5%左右；其它先进车辆技术最多可减少约50%的温室气体排放，同时增加20%的用户使用成本。

GM公司^[27]共选取了13种成熟的燃料路线，以北美地区为背景展开了深入研究。研究认为：其中以原油和天然气为原料的燃料路线中，采用HEV技术的燃料路线，其能源消耗相对较低。其中，柴油-直喷压缩点燃-HEV路线的温室效应较大；气态氢-燃料电池-HEV路线的温室效应相对较小，而天然气制甲醇-质子交换膜燃料电池-HEV与其它基于原油和天然气的燃料路线相比，其在能耗与温室效应方面均不具优势；天然气制乙醇路线的温室气体排放最低；液态氢与电解氢路线的能耗较低，但其温室气体排放则与传统汽油路线相当。

Michael Wang^[28]对三种FTD生产路线进行了生命周期研究，主要分析了其全生命周期的能源消耗和温室气体排放情况，并与传统柴油和超低硫柴油路线进行了对比分析。该研究认为：天然气制取FTD这一路线的能耗较高，主要因为部分原先由天然气生产的电力由FTD生产过程中自身输出的电力所替代，而FTD路线中发电部分的能源转换效率要比天然气发电效率低，天然气发电的能

源转换效率约 50%，因而导致了一定的能量损失，随之也会导致更多的温室气体排放；其中能源消耗最低的是以闪蒸气((FG: Flared Gas)为原料的 FTD 路线，且温室气体排放也得到大幅减少，这是由于 FG 本身通常被当作排放物的原因。

2000 年以来，德国大众汽车公司从其生产的 Golf 汽车开始，而后扩展到对其推出的每款新车均发布了生命周期环境影响评价报告^[29-32]。其研究包含了车辆周期（汽车的制造和处理）和燃料周期（原油开采、提炼运输、车辆运行以及废油处理）。此后，这些研究也对之后的汽车生命周期评价研究具有很好的参考价值。

Jamie Ally 等^[33]运用生命周期评价方法，对克莱斯勒公司与巴拉德公司联合推出的燃料电池巴士及传统的柴油巴士、天然气巴士作了评价研究，通过对在澳大利亚伯斯试用的巴士进行包括氢能源基础设施、巴士生产制造、使用与报废处理等各个阶段的生命周期研究，得到了其全生命周期的能源消耗与环境排放情况。

Mousazadeh 等^[34]应用生命周期评价的方法，比较分析了混合动力拖拉机与传统内燃机拖拉机的能源消耗与环境排放。该研究认为：相对传统内燃机拖拉机，混合动力新型拖拉机每年可以减少 CO₂ 排放约 14 吨；同时 NO_x、CO 等其他污染物的排放也有所下降。

Hussain M. M.等^[35]将汽车与燃料分为生产、使用及运输三个阶段，对一款聚电解质薄膜燃料电池汽车进行了环境影响评价研究。研究结果表明：在其生命周期中，氢能在生产过程中的能耗要比汽油高约 3.5 倍，但是燃料电池汽车的全生命周期能量消耗比传统燃油汽车少约 2.3 倍，且全生命周期的温室气体排放比内燃机汽车少了约 2.6 倍。Mats Zackrisson 等^[36]为了优化锂离子电池的设计，采用生命周期评价方法，对插电式混合动力车的锂离子动力电池进行了分析研究。

1.4.2 国内车用燃料的生命周期研究概况

自 1995 年起，由国家各部委、清华大学、麻省理工学院和福特汽车公司联合展开了对我国车用燃料的生命周期研究。该项研究以山西省等富煤地区为背景，将原油基汽油作为研究的基准路线，并与各种基于煤的汽车代用燃料路线进行对比分析，考察这些煤基燃料路线的可行性^[37]。与此同时，该研究还增加了原

油基柴油路线和煤层气制甲醇路线作为参考。最终，对煤基燃料的能源、环境、经济的研究共涉及到 8 条燃料路线：煤-甲醇-甲醇车、煤层气-甲醇-甲醇车、焦炉气-甲醇-甲醇车、煤-联醇-甲醇车、煤-常规电-电动车、煤-汽油-汽油车、原油-汽油-汽油车、原油-柴油-柴油车。其中每条燃料路线均以原料的开采为始点（原油和煤层气由井口开始、煤由矿口开始），经过原料的运输，燃料的生产和运输、燃料的燃烧，直至汽车报废回收。结果显示：在同一车辆运行周期中，没有哪一种煤基燃料的全生命周期各个方面指标均占有绝对优势的，即便是电力（被普遍认为的清洁能源），但由于我国的电力结构以燃煤发电为主，导致其生命周期环境影响较大，而电池的制造和回收过程也会产生较多的环境排放，同时过高的电池制造成本以及运行费用使得其生命周期成本较高。该研究指出：车用燃料的发展必须衡量各种因素，才能更准确判断哪条路径最适合中国；并且在制定战略路线之前，首先要对这一燃料技术路线进行充分的、全面的可行性研究。

上海交通大学的胡志远^[38]针对汽车代用能源的环境影响展开了一系列研究，其研究认为：纯电动汽车运行阶段产生的污染物排放要比传统内燃机汽车少很多，甚至能够实现零排放；但由于我国的电力结构仍以燃煤发电为主，故从全生命周期的角度来看，我国电动汽车的环境排放并不比传统内燃机汽车的低。胡志远博士还对木薯乙醇汽油的生命周期环境影响展开了研究^[39, 40]，其指出：与传统原油基汽油相比，在其生命周期中，木薯乙醇汽油的全生命周期能耗有所增加，但可减少石油资源的依赖，有利于缓解我国能源安全威胁；在污染物排放方面，除了 SO_x 与 NO_x 的排放增多以外，包括温室气体在内的其他污染物排放，均有不同程度减少。

2002 年，重庆大学依据使用天然气生产汽车代用燃料实例，采用生命周期评价的方法，对以天然气为原料的汽车代用燃料的经济性进行了分析研究，研究认为：以天然气为原料的代用燃料这一技术路线对比传统燃料路线，具有良好的经济效益^[41-43]，但该研究主要倾向于燃料的经济成本及使用费用分析，对这一代用燃料的能耗与环境影响分析相对较少。

中国人民大学楚丽明和汤传毅等^[44]对新型车用氢能燃料和传统汽油燃料进行了对比分析，该研究主要通过专家评判，确定各类污染排放物的环境影响权重，得出一个污染物环境影响矩阵。结论显示：氢能并非是人们普遍认为的清洁能源，

其全生命周期的环境影响要高于传统汽油。

清华大学邱彤等^[45-47]对多种燃料电池汽车氢源供应方式以及相应的燃料电池汽车系统,进行了生命周期环境影响分析和 EEE 综合评价,该研究主要从能源利用效率和环境影响的角度,在汽车代用燃料的研究领域,首次引入了多系统综合评价理论,将生命周期环境影响的各项指标转为一个有机的整体。清华大学冯文等^[48, 49]应用生命周期评价理论,对燃料电池汽车氢能系统进行了环境影响评价。该研究对多种方案的各种类型环境影响、能源利用效率和氢气总成本多个方面进行了分析。研究认为:就目前氢能的生产、储运技术而言,采用天然气集中制氢,再经汽车运输储氢高压钢瓶至加氢站,最后加注给氢能燃料电池汽车,此路线的综合环境影响最小。

总结国内外已有的车用燃料生命周期研究,车用燃料的生命周期评价结果主要受能源转换技术及新型车辆技术的影响。在我国石油资源日益紧缺的形势下,随着机动车保有量的急剧增长,车用替代燃料路线将会逐渐受到各方面重视,从而推进替代燃料的发展。与此同时,应该对那些有潜力的、清洁的车用替代燃料展开生命周期环境影响评价研究,为将来的能源发展战略提供可靠的理论依据。

1.5 课题研究内容

本文以餐厨垃圾厌氧发酵生产车用燃气为研究对象,以南宁市餐厨垃圾处理项目为实际分析案例,建立生物质车用燃气的生命周期能源消耗、污染物排放与综合评价模型,并与可能产生竞争的传统柴油燃料路线进行比较分析,旨在为制定餐厨垃圾处理及生物质车用燃气的未来发展战略提供依据。主要在以下几方面开展工作:

(1) 实地考察餐厨垃圾生产车用燃气原料获取和燃料生产的实际情况,详细讨论各个单元过程,构建生物质车用燃气的生命周期评价模型。

(2) 搜集基础数据,对模型进行清单分析,计算餐厨垃圾厌氧发酵生产车用燃气的生命周期一次能源消耗与污染物排放。

(3) 依据不同类型的环境影响对数据进行分类,并经过特征化与加权量化处理,对研究对象进行综合评价。

(4) 将生物质车用燃气与传统柴油路线进行对比分析, 全面衡量生物质车用燃气的特点。

(5) 对生物质车用燃气的生命周期环境影响进行敏感性分析, 并提出改进措施。

本文的研究技术路线如图 1-4 所示。

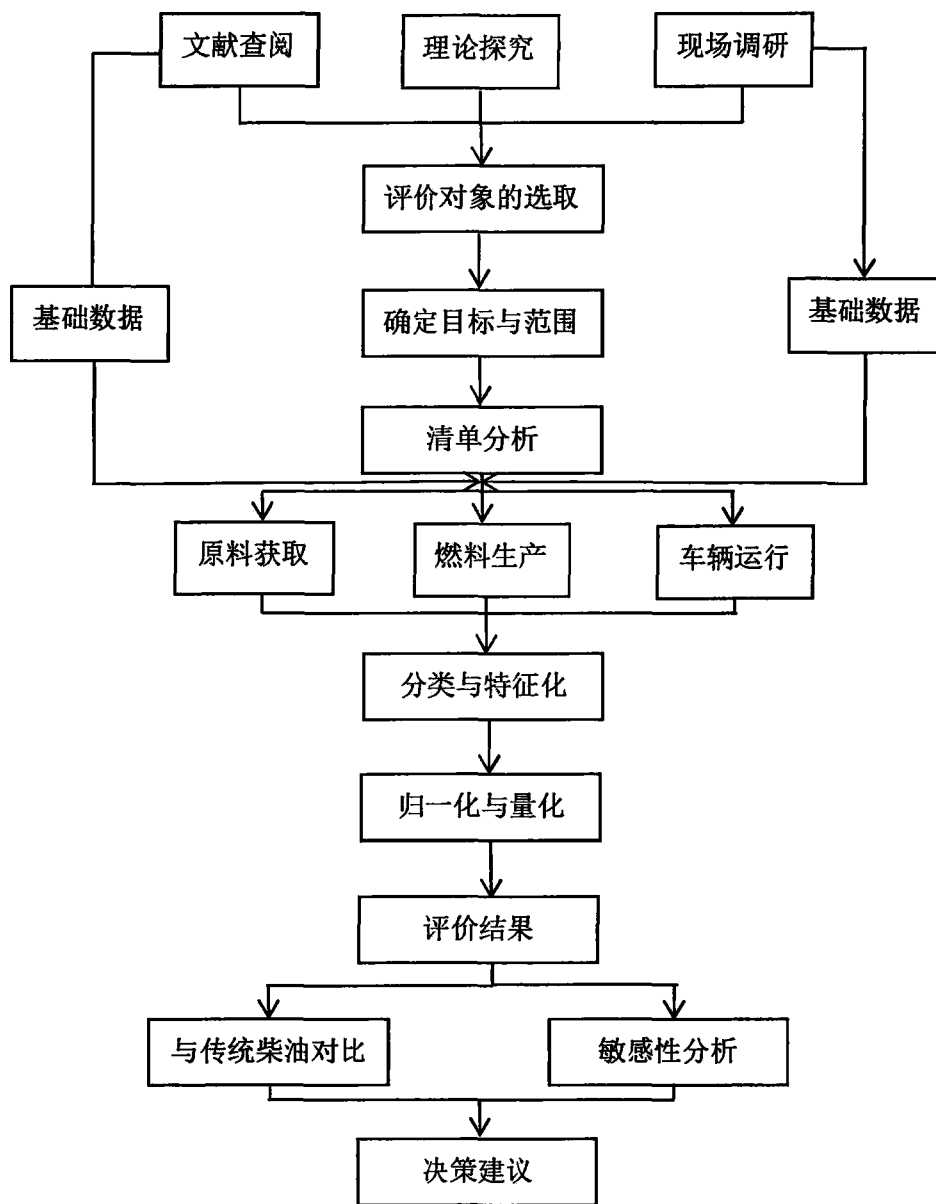


图 1-4 研究技术路线图

Fig. 1-4 The technical roadmap of research

1.6 创新点

本文创新之处在于以下几点：

(1) 以餐厨垃圾厌氧发酵生产的生物质车用燃气作为研究对象，结合南宁市餐厨垃圾处理项目的实际案例，对生物质车用燃气这一技术路线进行生命周期环境影响评价，为餐厨垃圾资源化处理以及生物质车用燃气替代传统燃料的发展提供理论依据。

(2) 对生物质车用燃气全生命周期的环境影响与传统柴油进行比较分析，从生命周期各阶段一次能源消耗、污染物排放、各环境影响类型以及综合评价指标多个方面，衡量生物质车用燃气的优势与缺点。其中生物质车用燃气的优势在于：其全生命周期的一次能源消耗与环境影响较传统柴油低，对可再生能源替代传统车用燃料的发展具有一定参考价值；而缺点在于：从生命周期的各阶段来看，生物质车用燃气的上游阶段部分污染物排放高于传统柴油，基于此，将可有针对性地对生物质车用燃气的应用发展提出改进建议。

第二章 生命周期评价简介

2.1 生命周期评价的概念

一般来说，一种产品或生产活动从原料获取开始，经过原料运输、生产制造、成品运输、产品销售、使用、维修和回收，最终再循环或作废弃处理，即从“出生”到“坟墓”的整个过程称为产品的生命周期。生命周期的各阶段都会产生资源消耗和污染物排放，因而资源的控制和环境污染的预防也应着眼于整个生命周期的各个阶段。生命周期评价（LCA，life cycle assessment）是对某种产品或某项生产活动全生命周期环境影响的一种系统评价方法。将产品的环境性能研究扩展到了产品的整个生命周期，克服了以往只关注产品生产阶段及销售阶段的不足，旨在从产品的原料、生产、销售、消费和回收处理等全部环节衡量该产品的可行性，或者在产品的性能、能耗和环境影响之间寻求合理的平衡，实现健康可持续发展^[7]。产品的生命周期如图 2-1 所示。

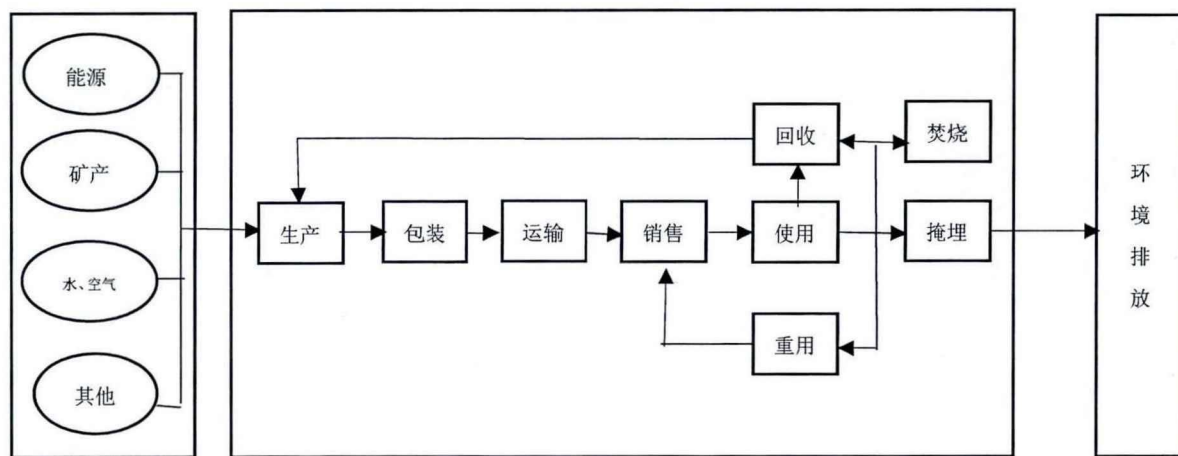


图 2-1 产品生命周期示意图

Fig. 2-1 The life cycle diagram of product

2.2 生命周期评价框架

作为产业生态学的理论基础和有效工具的生命周期评价（LCA）方法，越来越被广泛用于环境政策的制定及新产品的研发，其评价结果的准确性和实用性都决定了生命周期评价框架的重要性。ISO14000 环境管理系列标准对评价框架的

定义受到社会广泛认可，相对 SETAC 的定义，其更加便于开展评价研究工作，并且对产品生命周期阶段的划分更具实际意义，在产品 & 生产活动的环境政策制定方面的优势也是其备受欢迎的主要原因。根据 ISO14040（环境管理统一原则和框架）标准的定义，生命周期评价分为目的与范围的确定、清单分析、影响评价与结果解释四个基本步骤，具体流程如图 2-2 所示。在评价过程中，每个步骤相互影响，任意步骤都要随着其他步骤有可能发生的变化而及时地做出相应的调整，而根据评价目的与范围的不同，调整方式也会有所差异。

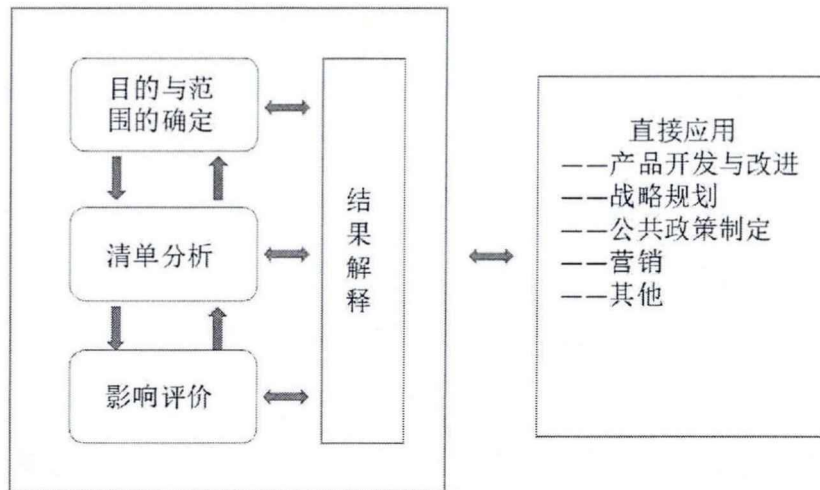


图 2-2 生命周期评价步骤

Fig. 2-2 The steps of life cycle assessment

2.2.1 目标与范围的确定

根据项目研究的原因、应用意图以及获取有利于决策的信息，以此来确定评价的目的，再根据评价目的界定系统范围。包括：定义评价系统、确定系统边界、设置假设条件以及说明有关数据要求和限制条件等。其中确定目标和范围需重点考察的有：评价目的、研究范围、系统边界、功能单位和数据可靠性。

(1) 确定评价目的

生命周期评价的目的是对一明确的产品或生产过程的环境影响进行评价，大致可以将评价目的归纳为环境管理认证与发展战略改进两类。关于发展战略改进方面的研究，往往需要对生命周期的各阶段进行具体分析，从各阶段的环境影响入手，对发展战略进行针对性的调整。而环境管理认证的生命周期研究则更侧重

于比较多种存在竞争的产品和生产过程的综合性能，以此帮助设定最合理的方案。系统的评价目的将会影响到功能单位以及系统边界的设定，确定评价目的是生命周期研究不得忽视的关键一环。

(2) 产品或系统的选择

生命周期评价研究主要可分为两大类：单一生命周期研究和比较生命周期研究。其中单一生命周期研究即为对单一产品或生产活动展开评价研究，这就要求对这一产品或生产活动的各个阶段进行具体分析，找出能源消耗或环境影响较大的阶段，便于优化产品路线及改进生产技术。而比较生命周期研究则用来对比两种或多种产品及生产活动，找出最优方案。在具体实施工作中，对于评价对象相同或相似且较为复杂的过程即可进行忽略，以此简化评价系统^[50]。

(3) 系统边界

定义系统边界，即定义要纳入所研究产品系统模型的单元过程，此步骤对于目的与范围的确定乃至整个评价模型尤为重要。任何一种产品或生产活动的评价研究都可以从以下几个方面对系统边界进行限定。

第一，自然边界。为了定义一种产品或生产活动的哪些阶段应归纳进该评价系统，即可通过确定自然边界来加以区分。生命周期清单分析与影响评价之间的边界，其本质即为自然体系与技术体系之间的边界。

第二，地域边界。通常，产品原料的出产地不同；不同地域环境的敏感性因素不同；不同地域的电力结构和产品运输实际情况不同，这都将直接影响到产品的生命周期评价，因此确定系统的地域边界也至关重要。

第三，时间范围。研究目的和生命周期评价的类型都分别对时间范围有不同要求。通常，基于设计型生命周期研究是前瞻性的（时间前进方向），而基变化型生命周期研究是回顾性的（时间向后方向）。

(4) 功能单位

功能单位的设置本质上是对产品功能的量化，在同一基础上描述产品的绩效特征。其目的在于为产品生命周期能源消耗及环境排放的输入和输出提供参考，而这种参考直接影响系统评价结果的可比性；同时也决定了该系统对不同产品进行比较的尺度和深度。在评价过程中，由于涉及的产品过程较多，可能同时具备多个功能单位，而具体选择哪一种或多种功能单位，应根据生命周期研究的目的

和范围作针对性的选择。因此,为实现预先的研究目的,确定不同产品系统的功能单位十分关键。

(5) 相关假设与局限性

在生命周期评价模型构建之前,首先要确定系统边界,并说明评价结果的局限性。而对于实际操作中无法解决的环节及相关无法查证的数据,应进行合理的假设。与此同时,相关假设也决定了系统的局限性,因而在作假设与局限性说明时,应确保不影响评价目的的执行。

综上所述,以上各个步骤都直接影响产品的生命周期研究以及评价结论的准确性。此外,研究中输入的过程数据都可能随着社会的快速发展而不断发生着变化,此时就需要考察搜集到的数据是否适用于研究对象在其生命周期中的不同阶段。生命周期研究是一个不断重复的过程,一旦过程数据更新,就可对数据清单及研究范围进行适当调整,以求得到更加时效、准确的结果。

2.2.2 清单分析

生命周期清单分析(Life Cycle Inventory, LCI),是一个以数据为基础的客观量化过程。这一步骤主要是对研究对象在其生命周期中各环节的资源消耗和污染物排放进行归纳和整理,为进一步实施生命周期影响评价提供支撑。当得到清单分析的结果数据时,应对研究对象的各阶段数据进行解释和验证,也是确保评价研究顺利展开的关键。清单分析实质就是用数据来描述研究对象生命周期各阶段能耗和排放的输入与输出,以原料的开采为起点,经产品生产、成品运输、销售等过程,最终以产品的回收和处置为终点。

清单分析主要分为以下几个方面:

1. 根据评价目的、系统范围和相关假设,结合实际生产工艺以及使用过程,构建生命周期评价模型;
2. 通过有效手段获取各个环节所需要的基础数据(包括能源和材料的输入、产品及废物的输出、环境排放及其他环境因素),结合实际应用中的相关情况,确保数据的准确性;
3. 将所有输入、输出数据换算为统一的功能单位,便于在评价目的的基础上进行比较分析和解释。

2.2.3 生命周期影响评价

影响评价是生命周期研究的核心内容，其主要包括分类、特征化，加权与量化。环境影响评价是对研究对象生命周期环境影响进行定量并统一量化排序的过程，是基于清单分析结果数据的进一步处理，最终得出生命周期研究的数据结果。其目的是对产品生命周期各环境影响类型以及综合环境负荷进行评估，为生命周期研究的进一步开展提供数据信息。具体实施步骤如图 2-3 所示。

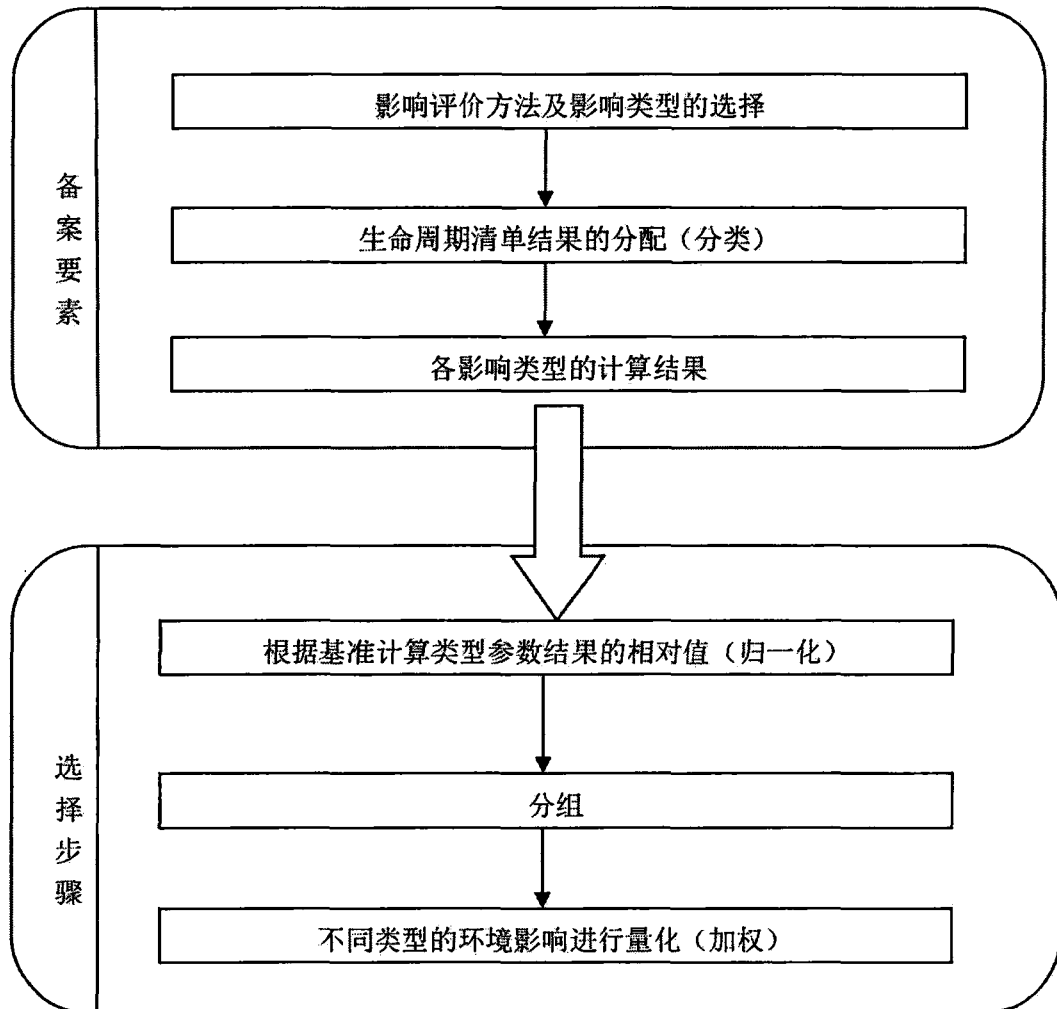


图 2-3 生命周期影响评价步骤

Fig. 2-3 The steps of life cycle impact assessment

2.2.4 结果解释

结果解释是对环境影响评价结果进行解释并得出结论的一个阶段，也是生命周期评价的最后一步。其主要目的是根据预先设定的研究目的和范围，得出相应

的结论并提出建议,同时也要对其局限性进行说明。结果解释只是基于评价结果而得出的结论,即对潜在的环境影响进行评估,而并不能对安全极限以及环境风险进行预测。在这一阶段的实施过程中,也可根据研究目的对数据质量和研究范围进行适当调整和改进,获取最有力的结论便于提出建议。

2.3 生命周期评价特点

生命周期评价是一种由起点到终点、由局部到整体对研究对象生命周期进行全面剖析的评价方法。该方法可依据决策者的需求获取多种信息,包括能源消耗、原料消耗、污染物排放、各环境影响类型潜势以及综合评价指标等。其可对单一产品生命周期的各阶段进行分析,也可对不同产品系统进行比较,进而对产品设计以及环境政策制定提供参考依据。但因为系统的复杂性,目前生命周期评价方法仍存在以下不足之处:

(1) 信息和数据的限制。生命周期研究涉及产品的各个阶段,其中每个阶段都会产生能源消耗和污染物排放,由此需要获取的数据量较大,而限于国内尚未建立权威的数据库,导致搜集的数据往往不够全面或者不具备时效性,这都将影响到评价结果的准确性。为了得到更准确的结果,一般需采用查阅文献、实地考察、专家评定和实验测试等多种手段来搜集数据,使得生命周期评价研究的成本较高,耗时较长。

(2) 时间和地域的局限性。由于产品原料的出产地不同,不同地域环境的敏感性因素不同,不同地域的电力结构和产品运输实际情况不同等多种因素,导致评价结果只对限定的时间及地域范围内有效。同时,同一系统的不同阶段也可能存在时间和空间的差异,这都不可避免地加大了研究的难度。

(3) 综合影响评价指标。根据研究目的的不同,决策者的取舍不同以及环境的承受限度不同,导致环境影响分类和各类型指标往往存在差异,因而难以确保评价结果的客观性以及无法得出符合多种要求的一般性结论。

2.4 本章小结

本章对详细介绍了生命周期评价理论，从目标与范围的确定、清单分析、影响评价及结果解释多各方面对生命周期评价框架进行了阐述，并分析了生命周期评价方法的优点与局限性，为论文的展开奠定了理论基础。

第三章 餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期分析模型

本章将根据南宁市餐厨垃圾处理项目的实例,应用生命周期评价的方法,构建餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期分析模型。

3.1 评价对象的选取

工业革命以来,全球经济社会的发展已离不开作为动力源的化石能源。然而日渐枯竭的化石资源与人类日益增长的能源需求之间的矛盾愈演愈烈,同时随着大量的能源消耗,导致日益恶化的环境形势已经受到世界各国的重视,至此,能源已经成为制约人类社会发 展进程的重要因素^[51, 52]。为应对这一挑战,各国政府和机构通过一系列的政策积极向健康可持续发展模式转型,清洁可再生能源成为全球关注的热点。目前备受关注的可再生能源有生物质能、风能、水能、太阳能、地热能等,其中生物质能是使用量最大、应用最广泛的可再生能源,其消费量仅次于煤、石油和天然气^[53]。

目前生物质能应用较多的有沼气、生物柴油、生物质燃料发电、生物质致密成型技术、以及燃料乙醇等^[54-57],在众多生物质能利用技术中,从产业技术的发展程度来看,沼气生产技术最为成熟,且其经济可行性、环保性均为最好。

沼气作为燃料是一种清洁能源,生产和使用成本低。通常,天然沼气的低位热值为 17.94~25.11 MJ/m³^[58]。若沼气得到适当的净化,可以获得高品质生物质燃料,热值比较高,可达到 35.91 MJ/m³,折合 1.1 升汽油^[59]。因此,合理使用沼气等生物质能,不仅有利于调整和优化我国能源结构,促进社会可持续稳定地发展,使生态环境得到改善,而且还有利于保障国家能源安全。

本文将餐厨垃圾通过厌氧发酵、净化处理而生产的生物质车用燃气作为研究对象,考察生物质车用燃气的全生命周期环境影响,并与传统柴油进行对比,衡量以生物质车用燃气替代传统柴油作为城市公交车燃料的优缺点,为新能源汽车的推广及“环境友好型”社会的发展提供理论依据。

3.2 案例分析

南宁市是全国首批 33 个餐厨废弃物资源化利用和无害化处理试点城市（区）之一。本文的参考案例即南宁市餐厨垃圾处理项目，该项目由广西蓝德再生能源有限责任公司承担，总投资约 1.2 亿元人民币，并于 2015 年 2 月正式投产。现阶段日处理餐厨垃圾 220 吨，沼气产出量为 $100\text{m}^3/\text{t}$ 。

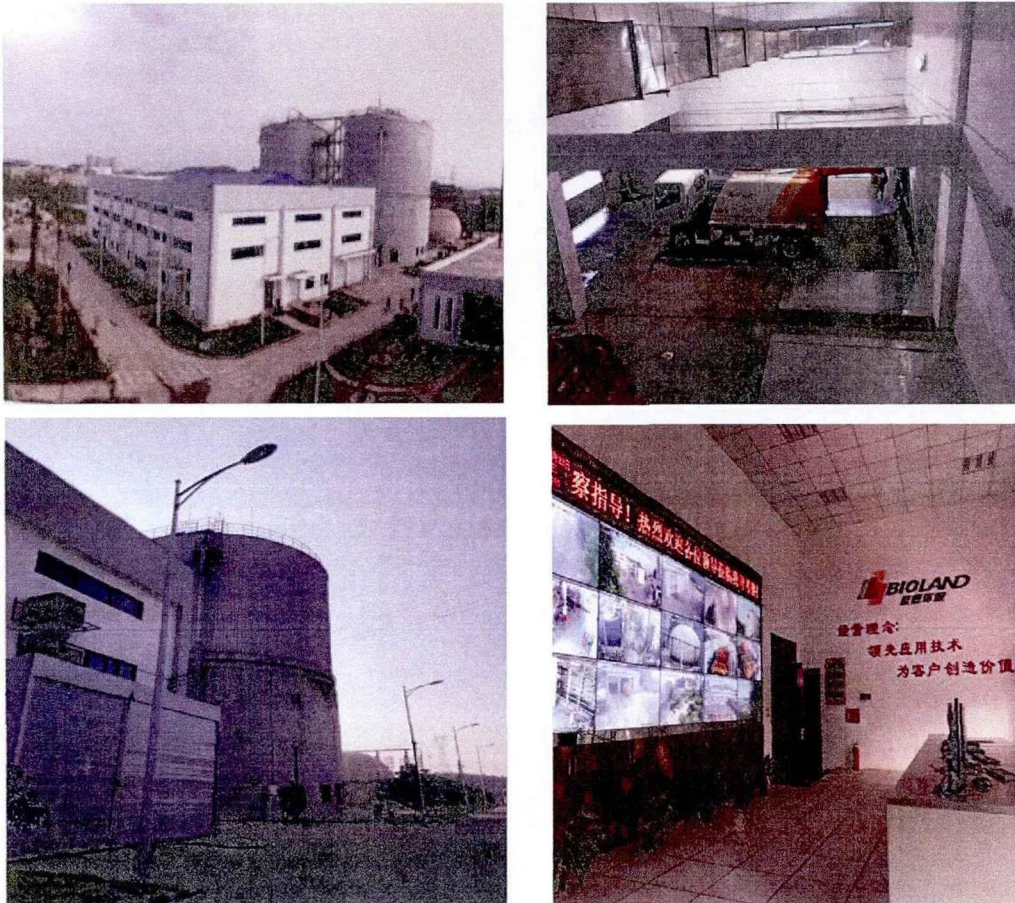


图 3-1 南宁市餐厨垃圾处理项目现场图

Fig. 3-1 The disposal project of kitchen garbage in Nanning

该项目采用目前的主流工艺（预处理和厌氧发酵工艺），餐厨垃圾进料后，经过磁选机、破袋机、风选机及生物质分离器等多项自动化分选后，其中有机部分经厌氧发酵产生沼气，沼气再经净化提纯系统制备车用燃气（CNG），该产品可满足 GB 18047-2017《车用压缩天然气》标准的要求。这种车用燃气的储运技术同等于被广泛应用的车用压缩天然气。根据 GB 17258-2011《汽车用压缩天然气钢瓶》的要求，车用储气瓶的公称工作压力为 20 MPa，公称水容积为 30 L~300 L，工作温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，设计使用寿命为 15 年。

该项目的具体处理工艺流程如图 3-2 所示。该案例的有关计算数据详见第四章 4.2 节。

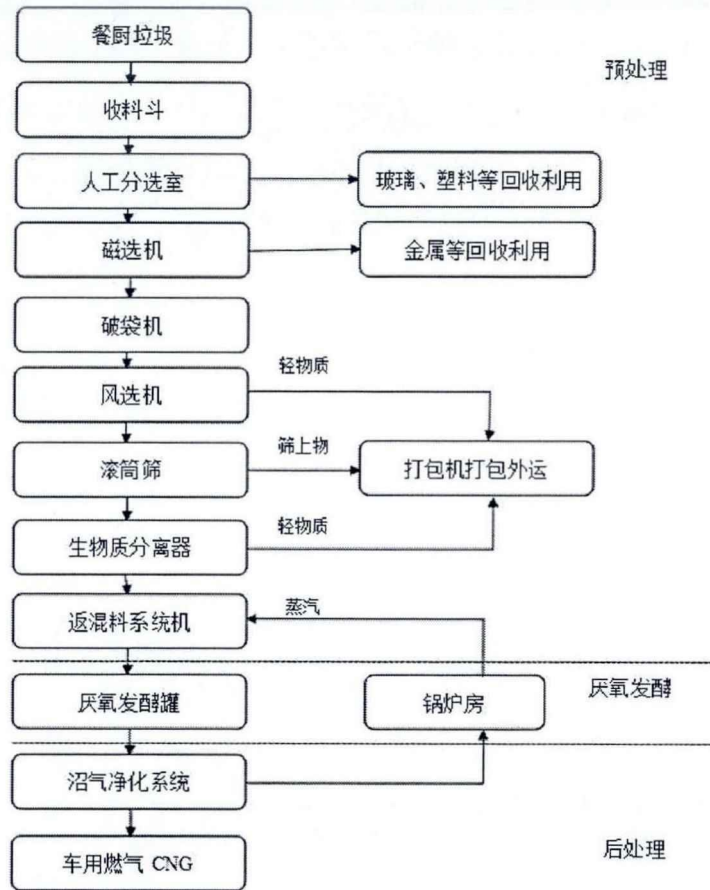


图 3-2 南宁市餐厨垃圾处理项目工艺过程

Fig. 3-2 The process of kitchen waste disposal project in Nanning

3.3 系统边界

餐厨垃圾厌氧发酵生产生物质车用燃气的生命周期范围，是以各餐厅、酒店和食堂等场所产生餐厨垃圾为始点，经过垃圾收运、垃圾预处理、厌氧发酵、沼气净化处理至加入车辆运行而消耗殆尽为终点。其中在垃圾预处理阶段分离出来的非生物质成分（塑料、纸张、金属、木头等），将用于填埋或分类回收，与车用燃气生产不属同一系统，不在本研究考虑之列；厌氧消化的残余物（沼渣、沼液）用于生产有机肥，也排除在本研究范围之内；研究对设备和土建工程方面的能耗及导致的污染物排放也不予考虑。

3.4 生命周期分析模型的构建

餐厨垃圾生产车用燃气系统可以分为原料阶段（原料收运）、燃料阶段（垃圾预处理、厌氧发酵、沼气净化）和车辆运行3个阶段。其中原料阶段是指由餐厨垃圾产生开始，经垃圾车于各餐厨垃圾产生地收运至餐厨垃圾处理厂；燃料阶段是指餐厨垃圾收运至处理厂并投进收料斗开始，经过预处理、厌氧发酵及沼气净化等工艺产出车用燃气，并输送至加气站为止；车辆运行阶段即为车用燃气投入汽车使用的阶段。

为了便于将生物质车用燃气与传统柴油进行对比分析，在研究中将原料阶段和燃料阶段称为燃料的上游阶段（WTP），将车辆运行称为燃料的下游阶段（PTW）。生物质车用燃气的生命周期示意图见图 3-3。

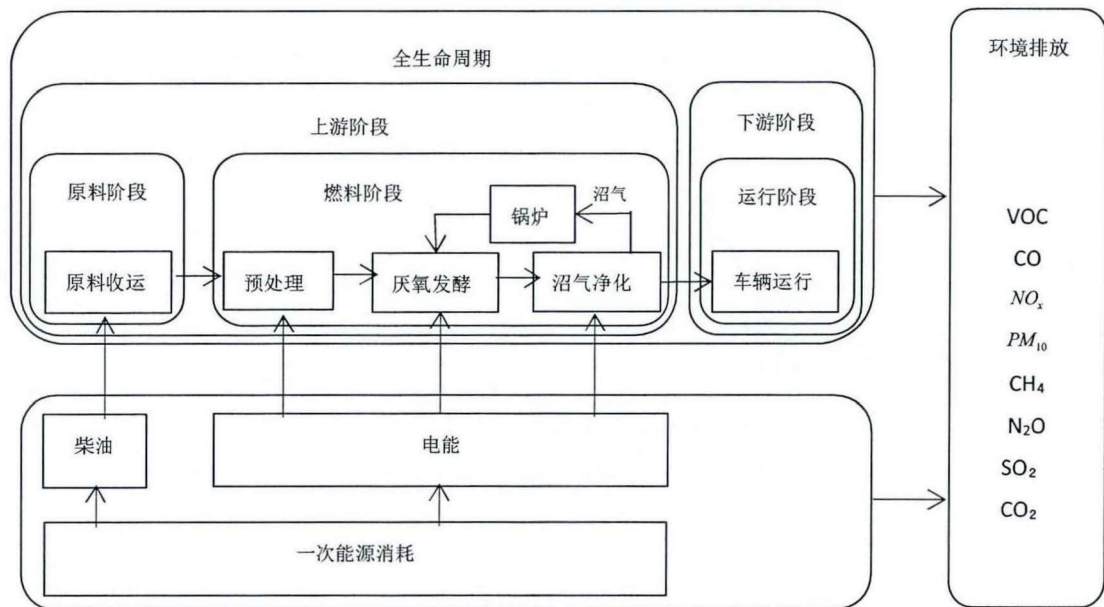


图 3-3 生物质车用燃气的生命周期
Fig.3-3 Life cycle of biomass vehicle gas

3.4.1 上游阶段

生物质车用燃气生命周期的上游阶段，包括原料收运、垃圾预处理、厌氧发酵及沼气净化等多个环节，其中每个环节都伴随着能源的消耗和污染物排放；同时任一环节所消耗的能源在其自身的原料开采、燃料生产以及成品运输等阶段也会产生能耗和排放，这就涉及到多个环节的子系统，导致计算过程较为复杂。

首先假设在生物质车用燃气生命周期的上游阶段共有 X 个环节 (s 即第 s 环节), 则其中某种分析指标的数量, 均可以用各个环节相应数据的推导得出。

第 s 环节的一次能源消耗量为 E_s , 即

$$E_s = e_{1s} + e_{2s} + e_{3s} \quad (3-1)$$

式中: e_{1s} 、 e_{2s} 、 e_{3s} 分别为第 s 环节的煤炭、原油和天然气的消耗量。

则上游阶段 (WTP) 的一次能源消耗总量 E_{WTP} 为:

$$E_{WTP} = \sum_{s=1}^X E_s \quad (3-2)$$

第 s 环节的第 i 种排放物数量为 ep_{si} , 即

$$ep_{si} = ep_{osi} + ep_{1si} + ep_{2si} + ep_{3si} \quad (3-3)$$

式中: e_{osi} 为第 s 环节 (如设备泄露、压缩、加气等) 产生的第 i 种排放物数量;

ep_{1is} 、 ep_{2is} 、 ep_{3is} 分别为第 s 环节中因消耗的煤炭、原油和天然气分别在其上游阶段 (开采、生产、运输) 的第 i 种排放物数量。

则上游阶段 (WTP) 的第 i 种排放物总量 EP_{WTP}^i 为:

$$EP_{WTP}^i = \sum_{s=1}^x ep_{si} \quad (3-4)$$

(1) 原料阶段即为餐厨垃圾自餐厅、酒店和食堂等场所产生后, 经垃圾车从各处收运到处理中心。原料阶段的一次能源消耗, 是收运过程中垃圾车所消耗的柴油, 在其上游阶段的一次能源消耗。原料阶段的排放量为收运过程中, 垃圾车的本身排放量和所消耗的柴油在其上游阶段的排放量。

(2) 燃料阶段的能耗主要为: 在车用燃气生产过程中, 各种机械设备电能的消耗和通入锅炉燃烧以加热厌氧发酵罐的沼气消耗。因为沼气不是一次能源, 所以燃料阶段的一次能源消耗为所消耗的电能, 在其上游阶段的一次能源消耗。燃料阶段的排放量为: 沼气在锅炉燃烧时的排放量; 所消耗的电能在其生产过程中的排放量; 以及生产电能而消耗的工艺燃料所造成的排放量。

3.4.2 下游阶段

下游阶段即车辆运行阶段，下游阶段排放量为生物质车用燃气投入车辆运行的排放量。我国排放法规规定：公交客车能耗和排放污染物的测量有两种方法：一种是通过发动机台架进行试验获得；另一种是通过计算机软件仿真获取^[60]。

本文此阶段的基础数据来源文献^[61]。该文献中：北京交通大学黄伟^[61]等对中国重汽集团的型号为WD615.00Q的电控燃气发动机作为试验样机，参考GB 18352.5-2013《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第五阶段）》标准，采用该标准中对公交车实际运行状况要求的13工况法，以沼气净化得到的车用燃气作为燃料进行了测试。这种发动机占国产燃气大型发动机40%以上市场份额，被大量用于总质量16~40 t级斯太尔系列重型载货汽车及城市公交客车中。详细数据见第四章4.2节。

3.5 本章小结

本章确定了评价对象，分析了南宁市餐厨垃圾处理项目实例，确定了系统边界，并通过对燃料的上、下游阶段的分析算法，最终构建了餐厨垃圾厌氧发酵生产车用燃气的生命周期分析模型，为接下来的研究奠定基础。

第四章 餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期清单分析

本章将对所需的基础数据进行搜集和整理,通过实地考察获取实例清单,根据第三章所构建的生命周期分析模型,对生物质车用燃气全生命周期的一次能源消耗与污染物排放进行分析,并将所得清单结果与传统柴油进行比较分析,从能耗与排放的角度衡量生物质车用燃气的特点。

4.1 基础数据清单

基础数据为清单分析提供数据支持,根据系统模型搜集并整理所需的数据是生命周期评价的关键步骤,基础数据的质量将决定研究结果的准确性。同时数据搜集也是生命周期评价最为耗时的过程,通常基础数据来源于已有数据库或者国内外公开发表的文献。

根据确定的研究范围和目的,本课题需要搜集的基础数据主要为生物质车用燃气生命周期各阶段所需工艺燃料(如柴油、电能),在其自身的生产过程中(包括原料开采、燃料生产、燃料运输等)的能耗与污染物排放数据。由于 GaBi 等生命周期评价常用软件的数据库都是由国外的研究机构根据当地的工艺技术水平而建立的,在查阅大量的文献资料后,对比发现这些国外的数据库并不完全符合我国的实际情况。因此本文采用的基础数据主要来源于文献资料。而且在采用这些数据之前,对能搜集到的数据进行对比和一致性检查,最终选择可靠性最高的数据。

本课题的目的是探讨生物质车用燃气替代传统柴油作为城市公交车用燃料的优缺点,所得生物质车用燃气生命周期的结果将与柴油进行对比分析,并且生物质车用燃气原料阶段的能源输入为柴油,这都涉及到柴油的生命周期数据。本文着重研究餐厨垃圾生产生物质车用燃气的生命周期,而柴油的相关数据通过查阅文献资料获得。柴油上游阶段的一次能源消耗与排放数据来源文献^[62],该文献基于我国的实际情况,对我国柴油的原料开采、原料运输、燃料生产、燃料成品运输等环节进行了分析计算。具体数据详见表 4-1。

表 4-1 柴油上游阶段的一次能源消耗与环境排放
Table 4-1 Primary energy consumption and environment emission of diesel in WTP

项目	能耗 (GJ/GJ)	VOC (g/GJ)	CO (g/GJ)	NOx (g/GJ)	PM ₁₀ (g/GJ)	SO ₂ (g/GJ)	CH ₄ (g/GJ)	N ₂ O (g/GJ)	CO ₂ (g/GJ)
上游阶段	1.395	8.51	6.37	77.7	7.33	1413	142.67	0.28	31359

生物质车用燃气燃料阶段的主要能源输入为电能，我国以燃煤发电为主的电力结构决定了电能的生产伴随着大量的能耗与污染物排放。据《2013 年中国电力年鉴》统计，我国燃煤发电占总发电量的 74.41%，其次为水电 17.16%^[63]。我国电能的结构详见表 4-2。

表 4-2 2013 年中国电力结构比例^[63]
Table 4-2 Power structure ratio of China in 2013

类型	燃煤发电	燃油发电	燃气发电	水电	风电	核电	其他
百分比%	74.41	0.11	2.19	17.16	2.07	1.97	2.09

据表 4-2 可知，燃油发电和燃气发电只占我国总发电量的 2.3%，故忽略其一次能源消耗和排放量。现假定水电、风电和核电不消耗化石能源，则根据燃煤发电的相关数据，即可得出我国电能平均的一次能源消耗和排放情况。其中燃煤发电的数据引用文献^[62]，该文献将燃煤发电以及供电线路损失的能耗全部转换为标准煤，再根据煤炭上游阶段的相关数据，而推算出我国燃煤发电的一次能源消耗与环境排放，详见表 4-3。

表 4-3 中国电力生产的一次能源消耗与排放
Table 4-3 Primary energy consumption and emission of China electric power production

项目	能耗 (GJ/GJ)	VOC (g/GJ)	CO (g/GJ)	NOx (g/GJ)	PM ₁₀ (g/GJ)	SO ₂ (g/GJ)	CH ₄ (g/GJ)	N ₂ O (g/GJ)	CO ₂ (g/GJ)
燃煤发电 ^[62]	3.26	26.45	41.48	880.91	51.57	10505	850.19	0.94	341483
平均	2.43	19.68	30.87	655.49	38.37	7817	632.63	0.70	254098

在生物质车用燃气的燃料阶段中，系统自产的部分沼气会经过锅炉燃烧用于加热厌氧发酵罐，由此涉及到沼气燃烧的环境排放。沼气经净化之后，在其燃烧过程中基本没有 PM₁₀ 微粒排放，且 S 元素也基本于脱硫塔清除掉了，则 SO₂ 的排放极少。至于沼气燃烧中 CH₄ 和 N₂O 的排放情况，在查阅大量文献之后，发现尚未有可靠的相关研究和数据，且考虑到这两种污染物排放量都很少，本文将

沼气燃烧中的 CH_4 和 N_2O 的排放量记为零。沼气燃烧的环境排放数据来源文献^[64]，具体见表 4-4。

表 4-4 沼气燃烧的排放量^[64]
Table 4-4 Emission quantity of biogas combustion

污染物	VOC(g/m ³)	CO(g/m ³)	NOx(g/m ³)	CO ₂ (g/m ³)
排放系数	0.4048	0.5238	0.4048	213.9

燃料的下游阶段即为车辆运行阶段，我国排放法规规定汽车能耗和污染物排放的测量有两种方法：一种是通过发动机台架进行试验获得；另一种是通过计算机软件仿真获取。北京交通大学黄伟等^[61]对中国重汽集团的型号为 WD615.00Q 的电控燃气发动机作为试验样机，参考 GB 18352.5-2013《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第五阶段）》标准，采用该标准中对公交车实际运行状况要求的 13 工况法，以沼气净化得到的车用燃气作为燃料进行了测试，这种发动机占国产燃气大型发动机 40% 以上市场份额，被大量用于总质量 16~40 t 级斯太尔系列重型载货汽车及城市公交客车中。

表 4-5 车辆运行阶段的能耗与排放
Table 4-5 Energy consumption and emission of the function stage of vehicles

项目	能耗 (MJ/km)	VOC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	PM ₁₀ (g/km)	SO ₂ (g/km)	CH ₄ (g/km)	N ₂ O (g/km)	CO ₂ (g/km)
柴油	14.82	1.85	3.95	6.84	1.03	0.29	0.004	0.017	932.06
生物质车用燃气	13.58	1.21	3.48	6.23	-	0.13	0.001	0.015	861.84

注：柴油的车辆运行阶段数据来源文献^[65]；生物质车用燃气的车辆运行阶段数据来源文献^[61]。

4.2 案例清单

本文以南宁市餐厨垃圾处理项目为例，该项目由广西蓝德再生能源有限责任公司承担，总投资约 1.2 亿元人民币，并于 2015 年 2 月正式投产。经现场考察获取到以下数据：

该项目现阶段日处理餐厨垃圾 220 吨，沼气产出量为 100m³/t，沼气净化效率为 55%。用于餐厨垃圾收运的柴油垃圾车共 40 辆，垃圾车为 ISUZU（型号：QL11009KARY），该车采用的是电装电控高压共轨压燃式柴油发动机（型号：

4HK1-TCG40)，最大总质量 10t，排放标准为国 V，其具体能耗及排放数据见表 4-6。



图 4-1 餐厨垃圾收运车

Fig. 4-1 Kitchen waste Collection truck

经统计，垃圾车平均油耗为 22L/100km，每个月垃圾收运的总油耗为 26000L。燃料生产阶段中，整套工艺每个月的耗电量为 28 万度，用于加热厌氧发酵罐的沼气占总产气量的 28.57%。

表 4-6 垃圾车的能耗与环境排放

Table 4-6 Energy consumption and environment emission of garbage trucks

项目	能耗 (MJ/km)	VOC (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)	PM ₁₀ (g/km)	SO ₂ (g/km)	CH ₄ (g/km)	N ₂ O (g/km)	CO ₂ (g/km)
垃圾车	7.84	0.98	0.74	0.28	0.55	0.15	0.002	0.009	403.96

注：垃圾车的能耗根据实际统计油耗计算得出；其中 CO、NO_x、SO₂ 的排放数据参考国 V 排放标准^[1]；其余排放数据来源文献^[2]。

4.3 结果与讨论

根据前文的清单数据和所建立的模型，即可得出餐厨垃圾生产车用燃气全生命周期的一次能源消耗和排放结果，并将结果与传统柴油燃料进行比较分析，具体数据如表 4-7 所示。

表 4-7 生物质车用燃气和传统柴油的生命周期一次能源消耗与排放

Table 4-7 Primary energy consumption and emission data of the biomass vehicle fuel gas

项目	能耗 (MJ/km)	VOC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	PM ₁₀ (g/km)	SO ₂ (g/km)	CH ₄ (g/km)	N ₂ O (g/km)	CO ₂ (g/km)
传统柴油 上游阶段	20.67	0.13	0.09	1.15	0.108	20.94	2.11	0.004	464.74
传统柴油 下游阶段	0	1.85	3.95	6.84	1.03	0.29	0.004	0.017	932.06
传统柴油 全生命周期	20.67	1.98	4.04	7.99	1.138	21.23	2.11	0.021	1396.8
生物质车用燃气 上游阶段	5.49	0.28	0.26	1.19	0.16	13.53	1.13	0.003	521.85
生物质车用燃气 下游阶段	0	1.21	3.48	6.23	0	0.13	0.001	0.015	861.84
生物质车用燃气 全生命周期	5.49	1.49	3.74	7.42	0.16	13.66	1.13	0.018	1383.69

生物质车用燃气与传统柴油生命周期的一次能源消耗对比如图 4-2 所示，在全生命周期中，生物质车用燃气的一次能源消耗量比传统柴油低 73.44%。这主要是因为传统柴油的原料是一次能源，而生物质车用燃气为废弃的餐厨垃圾所得，其原料并非一次能源，所以生物质车用燃气的一次能源消耗远低于传统柴油。由此可见，餐厨垃圾产车用燃气这一技术路线的节能效果较好。

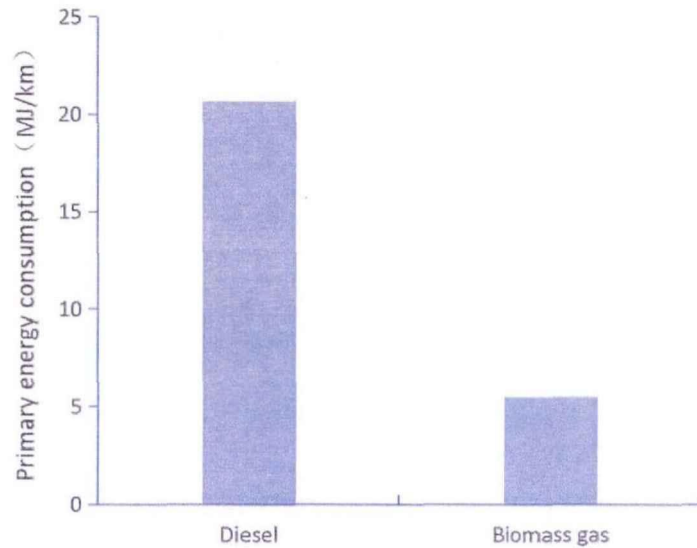


图 4-2 生物质车用燃气与传统柴油生命周期的一次能源消耗对比

Fig. 4-2 Life cycle's primary energy consumption comparison between biomass vehicle gas and conventional diesel

生物质车用燃气与传统柴油的生命周期排放量对比如图 4-3 所示，在整个生命周期中，生物质车用燃气的排放量都不同程度低于传统柴油；在上游阶段中，生物质车用燃气 VOC、CO、NO_x、PM₁₀ 和 CO₂ 排放量都比传统柴油高。这是

因为生物质车用燃气在生产过程中的主要能源为电能,而我国电力生产大部分依靠燃煤发电,并且我国燃煤发电的环境排放比较严重,所以生物质车用燃气上游阶段部分排放物的数值会比传统柴油高。

图 4-3(a)中,生物质车用燃气的全生命周期 VOC 排放比传统柴油低 24.75%,这两种燃料的生命周期 VOC 排放都主要集中在燃料的下游阶段,生物质车用燃气和柴油分别占比 81%和 93%。图 4-3(b)中,生物质车用燃气的全生命周期 CO 排放量比传统柴油低 7.43%,两种燃料的 CO 排放也都主要集中在燃料的下游阶段,生物质车用燃气和柴油分别占比 93%和 98%。图 4-3(c)中,全生命周期中生物质车用燃气的 NO_x 排放量比传统柴油低 7.13%。这主要因为车用燃气比柴油更容易稀燃,燃烧温度低于柴油,所以生物质车用燃气的 NO_x 排放比使用柴油的少。

图 4-3(d)中,可以看出在全生命周期中,生物质车用燃气的全生命周期 PM₁₀ 微粒排放比传统柴油少 85.94%。这是因为生物质车用燃气在燃烧过程中基本不产生微粒,而传统柴油机运行阶段仍有微粒排放,因此车用燃气微粒排放的值远小于柴油。

图 4-3(e)中,生物质车用燃气全生命周期的 SO₂排放量较传统柴油少 35.66%,两种燃料的 SO₂排放都集中在燃料的上游阶段,车用燃气和柴油分别占比 99.0%、98.6%。这是因为餐厨垃圾通过厌氧发酵获得的沼气,再经过净化处理,其中绝大部分 S 元素都在脱硫塔清除掉了;而柴油方面,我国于 2016 年 12 月开始实施的 GB 19147-2013《车用柴油(V)》标准中,大幅降低了柴油中 S 的含量(不高于 10mg/kg),因此这两种燃料在下游阶段的 SO₂排放量都较少。

图 4-3(f)中,生物质车用燃气生命周期的 CO₂排放与柴油相差不大,且两种燃料的上、下游阶段的占比也都比较均衡,车用燃气的上、下游阶段占比分别为 33%、67%,柴油的上、下游阶段占比分别为 38%、62%。

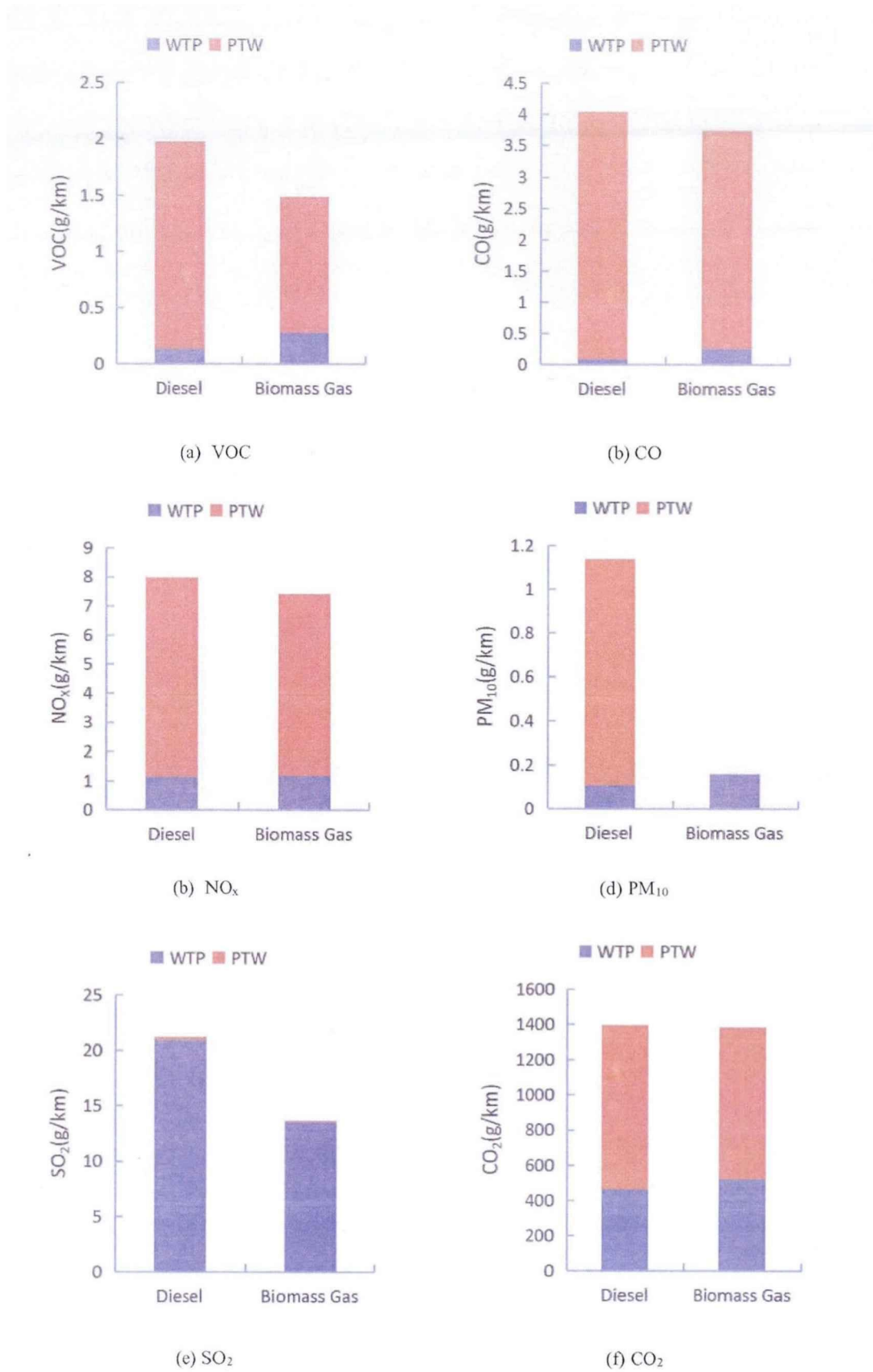


图 4-3 生命周期环境排放对比

Fig. 4-3 Emission comparison of life cycle

4.4 本章小结

(1) 根据餐厨垃圾厌氧发酵生产车用燃气的生命周期能耗与排放分析模型, 对该模型进行了清单分析, 并对生物质车用燃气生命周期中各阶段的能耗和排放进行了计算, 获得了餐厨垃圾厌氧发酵生产车用燃气生命周期的能耗和排放数值。

(2) 在全生命周期中, 生物质车用燃气的一次能源消耗比传统柴油低 73.44%, 可见餐厨垃圾生产车用燃气这一技术路线的节能效果较好。

(3) 在全生命周期中, 餐厨垃圾厌氧发酵产车用燃气的排放都不同程度低于传统柴油燃料, 生物质车用燃气全生命周期的 VOC、CO、NO_x、PM₁₀、SO₂、CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放量比传统柴油分别低 24.75%、7.43%、7.13%、85.94%、35.66%、46.5%、14.29%、0.94%; 两种燃料的 VOC、CO 和 NO_x 排放都主要集中在燃料的下游阶段。

第五章 餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期环境影响评价

前文第 4 章详细地给出了餐厨垃圾生产车用燃气的环境清单结果，本章将对环境清单进行进一步探讨，得出餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期环境影响评价结果，并通过敏感性分析，提出改进建议。

5.1 分类与特征化

为了进行餐厨垃圾厌氧发酵生产车用燃气的生命周期环境影响评价，将在环境影响清单的基础上，对清单分析的结果进行特征化，得到各类环境影响潜势。本课题将通过一次能源消耗 (EU)、全球变暖 (GWP)、酸化潜力 (AP)、人体毒害 (HTP)、光化学烟雾 (POCP) 和气溶胶潜力 (AQP) 六种环境影响类型对生物质车用燃气的环境影响进行分类评价。生物质车用燃气全生命周期环境清单的分类与特征化如图 5-1 所示。

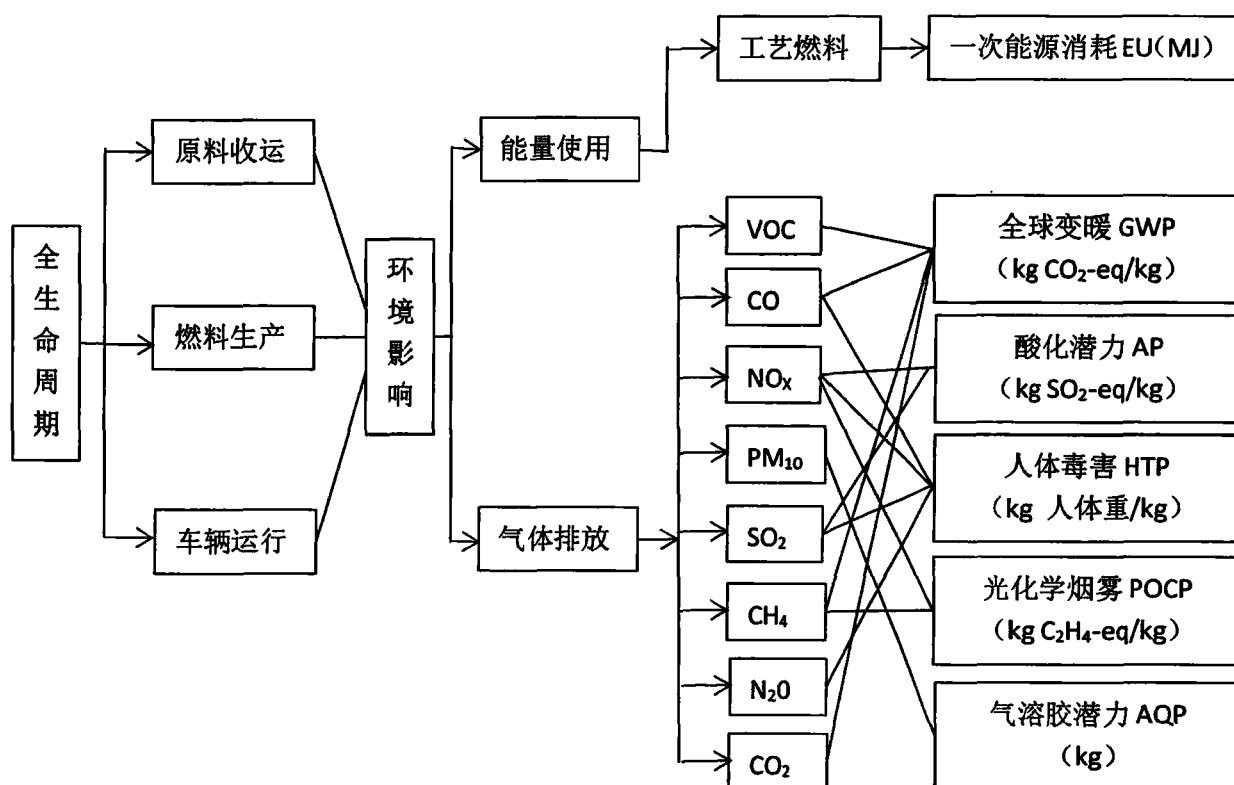


图 5-1 生物质车用燃气生命周期清单分类特征化

Fig. 5-1 Classification and characterization of life cycle list for biomass vehicles gas

(1) 一次能源消耗 (EU)

一次能源消耗 (Energy Use), 即指生命周期一次能源消耗量。计算公式如下:

$$EU = \sum_i \sum_j eu_{ij} \quad (5-1)$$

式中,

eu_{ij} 指第 i 环节第 j 种一次能源的消耗量。

(2) 人体毒性潜势 (HTP)

人体毒性潜势 (Health Toxic Potential), 指生命周期污染物排放毒害人体健康的潜力。本文采用每 kg 污染物排放对人体健康的毒害相对人体重量 (kg) 的比值表示^[67]。计算公式如下:

$$HTP = \sum_i HTP_i \cdot m_i \quad (5-2)$$

式中,

HTP_i 指生命周期中第 i 种污染物的人体毒性潜势因子;

m_i 指生命周期中第 i 种排放物数量 (kg)。

表 5-1 人体毒性潜势因子^[68]
Table 5-1 Potential factor of HTP

污染物	HTP(kg 人体重/kg 污染物)
CO	0.012
NOx	0.78
SO ₂	1.2

(3) 全球变暖潜势 (GWP)

全球变暖潜势 (Global Warming Potential), 指生命周期中的污染物排放对全球变暖的影响潜势, 本文以 CO₂ 为基准, 采用每 kg 的 CO₂ 当量来表示。

计算公式如下:

$$GWP = \sum_i GWP_i \cdot m_i \quad (5-3)$$

式中,

GWP_i 指生命周期中第 i 种污染物的全球变暖潜势因子;

m_i 指生命周期中第 i 种污染物的排放量 (kg)。

表 5-2 全球变暖潜势因子^[69]

Table 5-2 Potential factor of GWP

污染物	GWP (kg CO ₂ -eq/kg)
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298

(4) 酸化潜势 (AP)

环境污染物排放导致酸性降水, 造成土壤和水体酸化, 进而引起环境功能衰退, 并且危害人体健康。酸化潜势(Acid Potential), 即指生命周期中污染物的排放导致环境酸化的潜势, 本文以 SO₂ 基准, 采用每 kg SO₂ 当量(SO₂-eq)来表示。

计算公式如下:

$$AP = \sum_i AP_i \cdot m_i \quad (5-4)$$

式中,

AP_i 指生命周期中第 i 种污染物的酸化潜势因子;

m_i 指第 i 种污染物的排放量 (kg)。

表 5-3 酸化潜势因子^[70]

Table 5-3 Potential factor of AP

污染物	AP (kg SO ₂ -eq/kg)
SO ₂	1
NO _x	0.7

(5) 气溶胶潜势(AQP)

气溶胶主要由颗粒污染物排放产生的环境烟雾, 影响空气质量, 损害人体呼吸道系统。气溶胶潜力 (Air Quality Potential), 是指生命周期中直径小于 10 μm 的颗粒污染物排放的气溶胶影响潜力。本文只涉及到 PM₁₀ 一种颗粒污染物, 则取 PM₁₀ 的气溶胶潜势因子为 1。

计算公式如下:

$$AQP = \sum_i m_i \quad (5-5)$$

式中,

m_i 指生命周期中第 i 环节的 PM₁₀ 排放量 (kg)。

(6) 光化学烟雾潜势(POCP)

光化学烟雾是指污染物中的 HC 和 NO_x 受紫外线作用而发生光化学反应产生二次污染物,致使多种污染物混合而形成有害人体健康的浅蓝色烟雾。光化学烟雾潜势 (Photochemical Ozone Creation Potential), 即指生命周期中污染物排放导致光化学烟雾的潜力, 本文以乙烯(C₂H₄)为基准, 采用每 kg 乙烯(C₂H₄-eq)当量来表示。

计算公式如下:

$$POCP = \sum_i POCP_i \cdot m_i \quad (5-6)$$

式中,

$POCP_i$ 表示生命周期中第 i 种污染物的光化学烟雾潜势因子;

m_i 表示生命周期中第 i 种污染物的排放量 (kg)。

表 5-4 光化学烟雾潜势因子^[71]

Table 5-4 Potential factor of POCP

污染物	POCP (kg C ₂ H ₄ -eq/kg)
C ₂ H ₄	1
NO _x	0.028
CH ₄	0.006

5.2 归一化与量化

5.2.1 归一化

在对生物质车用燃气生命周期的环境排放数据进行分类与特征化之后, 接下来是将特征化潜值进一步归一化处理, 就需为各环境影响类型设置标准化基值, 便于下一步加权的实施。标准化基值 (也称归一化基值) 主要分为以下几种:

(1) 评价范围内的能源消耗或环境排放总量。

此类标准化基值主要依据该研究设定范围内某种资源的总储量或某污染物的总排放量, 以此作为的基准值, 即可得到产品生命周期各环境类型的影响值。而这一基准值主要受到研究范围 (如地域、时间等) 的影响。

(2) 特定范围内的人均(或类似均值)能源消耗量或环境排放量。

(3) 基线情境, 例如特定的某产品系统或生产活动, 根据评价目的的不同

而选择的特定情境，此类归一化基准值则需根据具体情形进行具体分析。

本文在分析了大量文献以及评价软件数据库之后，认为文献^[68]的数据更符合我国国情，故采用以下归一化基准值，如表 5-5 所示。

表 5-5 各影响类型的归一化基准值

Table 5-5 The normalized basis of each influence type

影响类型	数值	单位
能量的使用 (EU)	5.48E+04	MJ/人
人体毒性潜势 (HTP)	1.09E+05	g/人
全球变暖潜势 (GWP)	7.11E+06	g/人
酸化潜势 (AP)	5.40E+04	g/人
气溶胶潜力(AQP)	4.53E+04	g/人
光化学烟雾潜势(POCP)	7.06E+02	g/人

5.2.2 加权

加权是指应特定的案例要求或者基于某种研究目的，根据系统边界和各类型环境影响大小而设立的权重，旨在得到产品的统一量化指标，便于对环境的影响进行综合评价。但由于决策者的主观意见以及特定环境的承受限度不同，因而难以确保评价结果的客观性以及无法得出符合多种要求的一般性结论。加权作为一个具有代表性的方法，其能否可靠地衡量环境影响类别相对重要性，一直是备受生命周期研究工作者共同探讨的热点。

目前各环境影响类型的权重因子还没有统一的标准，这也主要由于不同范围的价值取舍不同而造成的，因此往往依据国家政策目标、人们支付意愿或临界承载能力等因素来衡量不同环境影响类别的相对重要性^[72]。目前使用较为广泛的加权方法为目标距离法、层次分析法和货币化法。上世纪 70 年代，由美国匹兹堡大学教授 T.L.Saaty 提出的基于层次分析的加权方法，受到了国际上的广泛认可^[73]。其不仅能让决策专家充分运用其判断能力和有价值的经验，而且还能更有力地保证评价系统的合理性，从而为产品设计、环境安全以及能源发展政策制定等多个方面提供强有力的数据支撑。

权重因子即为不同环境影响类型的折算因子，其反映了各环境类型对总体环境影响的程度。通过权重因子对不同环境影响类型进行加权后，即可得出综合评价指标，从而便于进一步开展更全面的分析。权重因子应该反映本地化的特点，

因为其与各国家或各区域的环境背景条件、环境关注重点和环境目标相关，所以在研究中要特别重视。由于常用的评价软件 GaBi 中只有国外的相关参数，其并不符合我国国情，故本文的加权系数参考文献^[68]。该文献中，上海交通大学胡志远博士根据我国国情采用层次分析法对各环境影响类型进行了深入研究。各环境影响类型的权重系数如表 5-6 所示。

表 5-6 各影响类型的权重^[68]
Table 5-6 Weight of each influence type

影响类型	EU	HTP	GWP	AP	AQP	POCP
权重	0.134	0.267	0.16	0.106	0.114	0.121

5.3 评价结果

根据第 3 章生物质车用燃气及传统柴油的生命周期环境影响清单，采用上文所述的计算方法及基础数据，对数据进行特征化处理，即可得到生物质车用燃气和传统柴油的生命周期环境影响特征化结果，如表 5.7 所示。

表 5-7 生物质车用燃气和传统柴油的生命周期环境影响特征化结果

Table 5-7 The characteristic results of the life cycle environmental impact of biomass vehicle gas and traditional diesel

项目	EU (MJ/km)	HTP (人体重 g/km)	GWP (g CO ₂ eq/km)	AP (g SO ₂ eq/km)	AQP (PM ₁₀ g/km)	POCP (g C ₂ H ₄ eq/km)
传统柴油	原料阶段	7.23	4.52	210.84	3.79	0.07
	燃料阶段	13.44	21.51	307.84	17.96	0.04
	运行阶段	0	5.73	937.23	5.08	1.03
	全生命周期	20.67	31.76	1468.72	26.82	1.138
生物质 车用燃气	原料阶段	1.89	2.45	117.64	2.05	0.1
	燃料阶段	3.6	14.72	433.36	12.32	0.06
	运行阶段	0	5.06	866.34	4.49	0
	全生命周期	5.49	22.23	1417.33	18.86	0.16

将特征化结果进行归一化和加权计算，即可得到生物质车用燃气和传统柴油的生命周期环境影响量化结果，如表 5-8 所示。

表 5-8 生物质车用燃气和传统柴油的生命周期环境影响量化结果

Table 5-8 The quantitative results of the life cycle environmental impact of biomass vehicle gas and traditional diesel

项目	EU	HTP	GWP	AP	AQP	POCP	综合评价
原料阶段	1.77E-05	1.11E-05	4.74E-06	7.44E-06	1.76E-07	3.43E-06	4.45E-05
传统柴油							
燃料阶段	3.29E-05	5.27E-05	6.93E-06	3.53E-05	1.01E-07	3.43E-06	1.31E-04
运行阶段	0.00E+00	1.40E-05	2.11E-05	9.97E-06	2.59E-06	3.26E-05	8.03E-05
全生命周期	5.05E-05	7.78E-05	3.31E-05	5.26E-05	2.86E-06	4.11E-05	2.58E-04
生物质车用燃气							
原料阶段	4.62E-06	6.00E-06	2.65E-06	4.02E-06	2.52E-07	1.71E-06	1.93E-05
燃料阶段	8.80E-06	3.61E-05	9.75E-06	2.42E-05	1.51E-07	5.14E-06	8.41E-05
运行阶段	0.00E+00	1.24E-05	1.95E-05	8.81E-06	0.00E+00	2.91E-05	6.98E-05
全生命周期	1.34E-05	5.45E-05	3.19E-05	3.70E-05	4.03E-07	3.60E-05	1.73E-04

5.4 对比分析

根据评价结果,即可对生物质车用燃气与传统柴油生命周期的各阶段、各环境影响类型以及综合评价指标进行对比分析,全面衡量生物质车用燃气路线的优缺点。

(1) 由表 5-7 和表 5-8 的计算结果可知:若使用生物质车用燃气替代传统柴油作为城市公交车用燃料,减排效果较好。其中,从减排百分比的角度来看,全生命周期 AQP 减排潜力最大,达到 85.94%,其次依次为:EU(73.44%)、HTP(30.01%)、AP(29.68%)、POCP(12.5%)、GWP(3.5%);从减排量化数值的角度来看,生命周期各环境影响类型的减排效果排序为:EU>HTP>AP>POCP>AQP>GWP;从环境综合评价的角度来看,生物质车用燃气的全生命周期环境负荷比传统柴油低 32.88%。由此可见,对比传统柴油路线,餐厨垃圾生产车用燃气这一技术路线减排效果明显。

(2) 两种燃料的全生命周期各环境影响类型对比如图 5-2 所示。可见,这两种燃料的生命周期中,都对 HTP 影响最大,对 AQP 影响最小,并且两种燃料的全生命周期对 GWP 的影响相差很小,仅为 3.63%。在生物质车用燃气的生命周期中,对各环境类型影响的排序为:HTP>AP>POCP>GWP>EU>AQP。

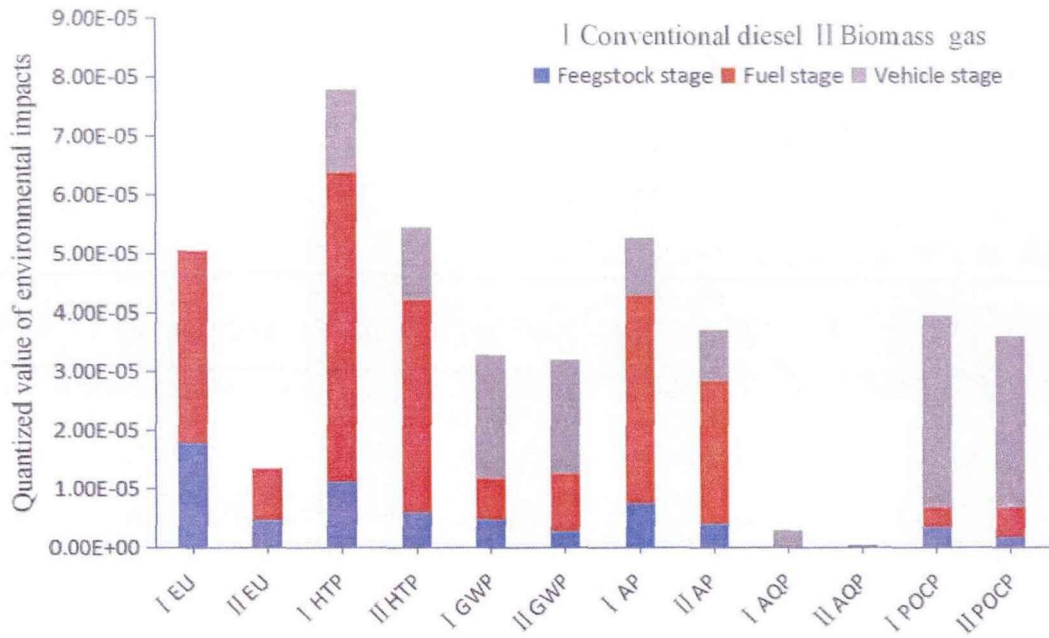


图 5-2 生命周期各环境影响类型对比

Fig. 5-2 Comparison of the environmental impacts types in the life cycle

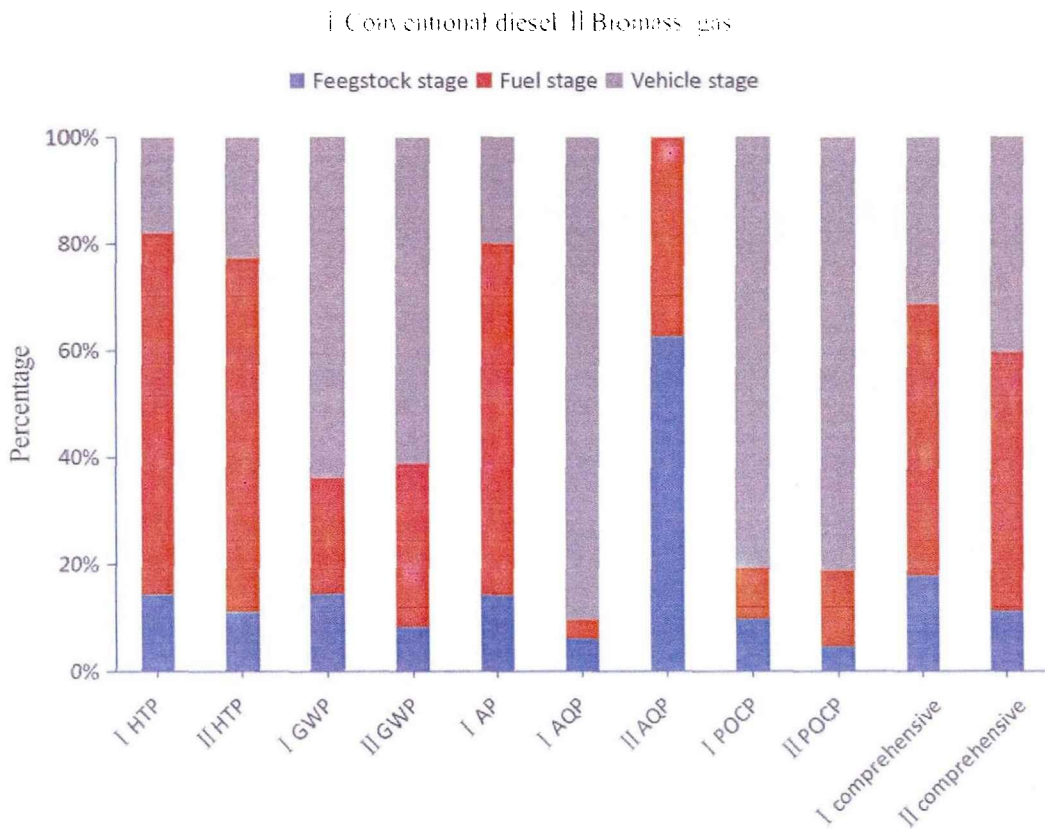


图 5-3 生命周期各环境影响类型对比(百分比)

Fig.5-3 Comparison of the environmental impacts types in the life cycle (percentage)

(3) 两种燃料生命周期各阶段环境影响类型的百分比对比如图 5-3 所示, 图中显示, 两种燃料的原料阶段对除了 AQP 以外的其他类型影响均为最小; 两种燃料的燃料阶段都对 HTP 和 AP 的影响最大, 柴油燃料阶段对 HTP 和 AP 的影响在其全生命周期中占比分别为 67.74%、67.11%, 生物质车用燃气的燃料阶段占比分别为 66.24%、65.41%; 两种燃料的运行阶段都对 GWP 和 POCP 的影响最大, 柴油运行阶段对 GWP 和 POCP 的影响在其全生命周期中的占比分别为 63.75%、79.32%, 生物质车用燃气的运行阶段占比分别为 61.13%、80.83%。

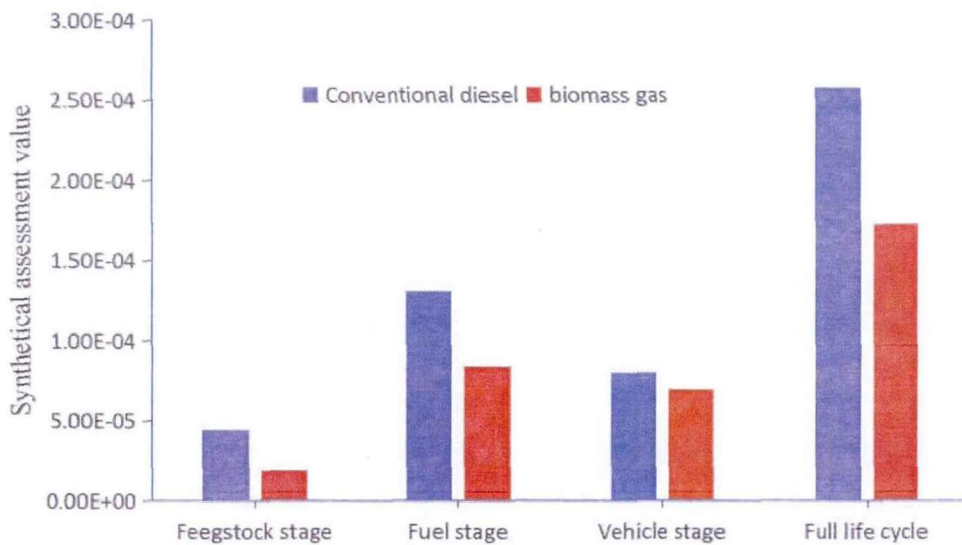


图 5-4 生命周期各阶段环境影响综合评价对比

Fig. 5-4 Comparison of synthetical assessment of environmental impact in each stages of life cycle

(4) 生物质车用燃气和传统柴油的生命周期各阶段综合评价对比如图 5-4 所示。图中显示, 生物质车用燃气生命周期各阶段的环境影响负荷都比传统柴油低, 其原料阶段、燃料阶段和运行阶段比柴油分别低 56.76%、35.94%、12.98%, 由此可见生物质车用燃气的原料阶段减排效果最好, 其次是燃料阶段、运行阶段。

(5) 在生物质车用燃气的生命周期中, 其燃料阶段和运行阶段对环境影响的贡献较大, 分别占比 48.61%、40.35%。这主要的原因是: 在生物质车用燃气的燃料阶段中, 其能耗主要为各种机械设备的电能消耗, 而我国电能的 70% 以上都来自于燃煤发电, 该过程会产生大量的温室气体、人体致毒污染物及酸化气体 NO_x 和 SO_2 , 而 POCP 方面也主要是由于该过程排放过多的氮氧化物(NO_x)造成的。因而减少燃料生产过程中的电能的消耗, 同时改变我国以燃煤发电为主的电

力结构将有助于降低生物质车用燃气的环境影响。从车辆运行的角度来看,改善生物质燃气发动机技术及汽车,也将有助于减少环境排放。

5.5 敏感性分析

敏感性分析是对某一种或多种可能影响该系统评价结果的因素,进行影响程度分析,其主要建立在数据的基础之上,通过设定该因素的变化值,得出敏感性结论,为产品设计以及政策改进提供数据支撑。敏感性分析也是评估研究中解决不确定性问题的一种系统分析方法^[74, 75]。敏感性分析法包括多因素敏感性分析法和单因素敏感性分析法^[76]。所谓单因素敏感性分析,是假定在同一时间只有一个不确定性因素发生变化,其它因素不变,每次仅分析这个因素的变化对评价指标影响大小的方法。多因素敏感性分析法是指在假定其它不确定性因素不变的条件下,分析两种或两种以上不确定性因素同时发生变动,对项目经济效益值的影响程度,确定敏感性因素及其极限值。由于生物质车用燃气全生命周期是一个复杂的系统,各种因素可能发生的不同变动幅度的组合关系复杂,组合方案繁多,故本文对生物质车用燃气全生命周期进行敏感性分析时,采用单因素敏感性分析法。

通过上述对餐厨垃圾厌氧发酵生产车用燃气的生命周期评价结果分析可知,我国的发电结构对生物质车用燃气的生命周期能耗与排放影响很大。基于此,本文将分析除了生物质能源发电以外的其他可再生能源电力(如水电、风电和太阳能电等)替代煤电时,燃煤发电比例对生物质车用燃气生命周期能耗和排放的影响。

根据前文所建立的评价模型及基础数据,分别选取我国煤电占总发电量的比例为0%、20%、40%、80%、100%五种情形进行计算,得出生物质车用燃气全生命周期一次能源消耗随煤电比例变化的关系,如图5-5所示。由图可见,生物质车用燃气全生命周期一次能源消耗与煤电比例接近线性关系,其全生命周期一次能源消耗量随着煤电比例的增大而增加。

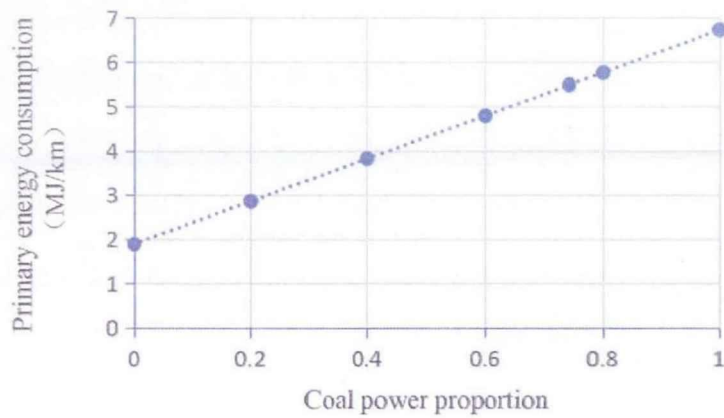


图 5-5 煤电比例对生命周期一次能源消耗的影响

Fig. 5-5 The effect of coal power proportion on the primary energy consumption of life cycle

据国网能源研究院李琼慧等^[2]分析，预计到 2020 年我国煤电比例有望下降至 55%。代入此数据可得，预计到 2020 年煤电比例为 55%时，生物质车用燃气全生命周期的一次能源消耗为 4.55MJ/km，较现阶段将降低 17.1%。同时，根据上文所建立的餐厨垃圾厌氧发酵生产车用燃气的生命周期评价模型，可以计算得出，当煤电比例为 55%时，生物质车用燃气全生命周期的各环境影响类型与现阶段对比数据，如表 5-9 所示。

表 5-9 煤电比例对生命周期评价的影响

Table 5-9 The effect of coal power proportion on life cycle assessment

环境影响类型	EU	HTP	GWP	AP	AQP	POCP	综合评价
74.41%煤电	1.34E-05	5.45E-05	3.19E-05	3.70E-05	4.03E-07	3.60E-05	1.73E-04
55%煤电	1.11E-05	4.51E-05	2.95E-05	3.07E-05	3.52E-07	3.60E-05	1.53E-04
下降比例	17.16%	17.25%	7.52%	17.03%	12.66%	0.00%	11.56%

由上表可见，生物质车用燃气全生命周期的环境影响随着煤电比例的下降而减少，综合评价指标下降了 11.56%。除了 POCP 影响没有变化之外，其他环境影响类型均有不同程度降低。其中 HTP 下降幅度最大，达到 17.25%，其次依次为 EU(17.16%)、AP(17.03%)、AQP(12.66%)、GWP(7.52%)。这主要是因为生物质车用燃气的生命周期中，燃料生产过程主要依靠电能，而随着煤电比例的下降，其燃料阶段的各环境污染物排放都会相应减少，所以生物质车用燃气的全生命周期环境影响会随之减小。

以上分析说明，我国电力结构直接影响生物质车用燃气生命周期的能耗和排放。因而，在我国生物质燃气发动机技术尚未取得突破性进展的前提下，优化我

国电力结构,同时积极发展清洁高效的新型燃煤发电技术,提高燃煤发电的能量转化效率,是降低生物质车用燃气全生命周期环境影响的有效途径,对推广生物质车用燃气以及环境可持续性发展有着十分重要的意义。

5.6 改进建议

通过以上对生物质车用燃气生命周期环境影响的敏感性分析,结合生物质车用燃气的环境影响评价结果,本文提出以下改进建议:

(1) 优化我国电力结构,增大水电、风电和太阳能电等清洁能源电力的比例。

生物质车用燃气在其生产过程中主要消耗电能,由此产生了大量的污染物排放,这与我国以燃煤发电为主的电力结构有着密切的联系。目前我国电能的70%以上由燃煤发电获得,煤矿的开采会对地下水资源和土地资源产生严重的破坏,同时煤炭开采过程中会产生大量的废水,造成水资源浪费。除此之外,煤炭的燃烧过程中又会产生大量的污染物排放。而水能、风能和太阳能等清洁能源发电则对环境影响很小。因而我国应增大清洁能源发电比例,即使在短时间内无法取得明显进展的情况下,也可以通过对燃煤发电过程中排放的污染物进行集中处理,或者发展清洁高效的新型燃煤发电技术以及提高燃煤的能量转化效率等途径,以减少我国发电过程中的环境污染。

(2) 提高生物质车用燃气生产效率。

根据评价结果可以看出,生物质车用燃气的燃料阶段的环境影响在全生命周期中占比较大,主要是因为生物质车用燃气的生产过程中消耗了大量的电能,而我国电力结构决定了发电过程中伴随着比较严重的污染。基于此,着眼于餐厨垃圾厌氧发酵生产车用燃气工艺中的各个环节,改进现有工艺模式,开发更加清洁高效的反应装置,提高生物质车用燃气的生产效率,以减少其电能的消耗,是降低生物质车用燃气生命周期环境影响的有效手段。

(3) 加强对生物质燃气汽车等新能源汽车的推广。

据上文评价结果显示,生物质车用燃气的生命周期综合环境影响比传统柴油低32.88%,同时又能充分利用废弃的餐厨垃圾,改变城市餐厨垃圾的处置方式,

可见生物质车用燃气替代传统柴油的环境效益明显。因而,我国应从加强规划引领、完善实施方案、推动落实扶持政策、创新推广应用模式等方面来加强对生物质燃气汽车等新能源汽车的推广,继而缓解能源和环境压力,推动“环境友好型”社会的建设。

(4) 改善并建立符合我国国情的生命周期评价方法及数据库。

关于生命周期影响评价的研究很多,但目前我国并没有统一标准,大多都只能借鉴国外数据,导致评价结果与我国的实际情况存在较大误差,加快完善符合我国国情的评价方法已经势在必行。

5.7 本章小结

本章在前文的研究基础之上,对生物质车用燃气的全生命周期进行了环境影响评价,并将结果与传统柴油燃料进行了对比分析。通过对生物质车用燃气生命周期评价的敏感性分析,针对性地提出了政策建议。本章的主要结论有:

(1) 相对传统柴油路线,生物质车用燃气全生命周期的环境影响较小。其中,生物质车用燃气的全生命周期综合环境影响比传统柴油低 32.88%;各环境类型影响也均比柴油低,其减排收益排序为:EU>HTP>AP>POCP>AQP>GWP。

(2) 两种燃料的生命周期中,都对 HTP 影响最大,对 AQP 影响最小;从生命周期各阶段的环境影响来看,两种燃料的原料阶段对除了 AQP 以外的其他类型影响均为最小;两种燃料的燃料阶段都对 HTP 和 AP 的影响最大;两种燃料的运行阶段都对 GWP 和 POCP 的影响最大。

(3) 在生物质车用燃气的生命周期中,燃料阶段和运行阶段对环境影响的贡献较大,分别占比 48.61%、40.35%;生物质车用燃气的全生命周期对各环境类型影响的排序为:HTP>AP>POCP>GWP>EU>AQP。

(4) 通过敏感性分析,煤电在我国电力结构中的比例对生物质车用燃气的生命周期环境评价有直接影响。生物质车用燃气的一次能源消耗和环境污染都随着煤电比例的下降而减少。

(5) 根据评价结果及敏感性分析,本文提出了几点改进建议:优化我国电力结构,增大水电、风电和太阳能电等清洁能源电力的比例;提高生物质车用燃

气生产效率；加强对生物质燃气汽车等新能源汽车的推广；改善并建立符合我国国情的生命周期评价方法及数据库。

第六章 总结与展望

6.1 全文总结

本课题依托广西科技计划项目“餐厨垃圾资源化技术的开发与应用”（合同编号：桂科 AB16380249），根据南宁市餐厨垃圾处理项目的实例，系统分析了餐厨垃圾生产车用燃气的生产工艺。为全面衡量这种生物质燃气作为汽车替代燃料的可行性，本文采用生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）方法，建立了餐厨垃圾厌氧发酵生产车用燃气的生命周期评价模型，对生物质车用燃气进行了生命周期分析与环境影响评价，并将评价结果与传统燃用柴油进行比较分析。最后分析了我国电力结构对生物质车用燃气生命周期能耗和环境排放的影响。得出以下结论：

（1）生物质车用燃气全生命周期的一次能源消耗和环境影响均低于传统柴油，综合环境影响比传统柴油低 32.88%，其中各环境影响类型的减排效益排序为：EU>HTP>AP>POCP>AQP>GWP。可见相对传统柴油燃料，餐厨垃圾生产车用燃气这一技术路线具有较好的节能减排效果。

（2）在生物质车用燃气的生命周期中，燃料阶段和运行阶段对环境影响的贡献较大，分别占比 48.61%、40.35%；生物质车用燃气的全生命周期对各环境类型影响的排序为：HTP>AP>POCP>GWP>EU>AQP。

（3）通过敏感性分析，煤电在我国电力结构中的比例对生物质车用燃气的生命周期环境评价有直接影响。生物质车用燃气的一次能源消耗和环境污染都随着煤电比例的下降而减少。由此，优化我国电力结构，增大水电、风电和太阳能电等清洁能源电力的比例，将有利于降低生物质车用燃气的环境影响。

6.2 研究展望

本文从环境影响的角度，证实了以餐厨垃圾生产的生物质车用燃气替代传统柴油作为城市公交车用燃料的可行性。但研究中仍有诸多不足之处，还需进一步改进和深入研究，主要为以下几点：

(1) 由于国内基础数据缺乏，实际情况随时会发生变化，文中引用的部分基础数据可能不太具备时效性，应加强对数据的积累。

(2) 本文仅对燃料的生命周期进行了环境影响评价，若要更全面考察生物质车用燃气发展的可行性，还需从基础设施、运行成本、加气站等环节对其经济性展开研究，研究结果将更具实际意义。

(3) 本文仅将生物质车用燃气的环境影响与传统柴油燃料进行了对比，若能比较当下新能源公交车的多个方案（如混动公交车，电动公交车等），将能对新能源公交车的发展提供更全面、更合理的方案。

参考文献

- [1]杨天华. 新能源概论[M]. 化学工业出版社, 2013.
- [2]中国能源研究会. 中国能源发展报告[M]. 北京大学出版社, 2013.
- [3]中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2017 年国民经济和社会发展统计公报[M]. 中国统计, 2018.
- [4]国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2016[M]. 中国统计出版社, 2016.
- [5]杨建新. 面向产品的环境管理工具:产品生命周期评价[J]. 环境科学, 1999,20(1):100-103.
- [6]中国汽车工业协会. 中国汽车工业发展年度报告 : Annual Report on the Development of China Automotive Industry (2016) , 2016[M]. 社会科学文献出版社, 2016.
- [7]邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 化学工业出版社环境科学与工程出版中心, 2003.
- [8]钱兴坤. 国内外油气行业发展报告[M]. 石油工业出版社, 2015.
- [9]张亮. 车用燃料煤基二甲醚的生命周期能源消耗、环境排放与经济研究[D]. 上海交通大学, 2007.
- [10]CHEN D, CHRISTENSEN T H. Life-cycle assessment (EASEWASTE) of two municipal solid waste incineration technologies in China[J]. Waste Manag Res, 2010,28(6):508-519.
- [11]KIM M H, KIM J W. Comparison through a LCA evaluation analysis of food waste disposal options from the perspective of global warming and resource recovery[J]. Science of the Total Environment, 2010,408(19):3998.
- [12]CHANG N B, QI C, ISLAM K, et al. Comparisons between global warming potential and cost - benefit criteria for optimal planning of a municipal solid waste management system[J]. Journal of Cleaner Production, 2012,20(1):1-13.
- [13]BERNSTAD A, LA C J J. Review of comparative LCAs of food waste management systems--current status and potential improvements.[J]. Waste

- Management, 2012,32(12):2439-2455.
- [14]Leibniz-Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim. IEA Bioenergy Task 37, Country report: Germany[R].2013.
- [15]Ren 21. Renewables global status report[R].2013.
- [16]Swedish gas center. IEA bioenergy task 37, country report: Sweden[R].2013.
- [17]译陈艳鑫. 瑞典林雪平市公共交通实现 100%沼气供电[J]. 人类居住, 2013(4):9-10, 11.
- [18]丁少钦, 李尚城. 沼气动力的在我国开发前景与应用探析[J]. 专用汽车, 2011(1):51-53.
- [19]武斌. 生物沼气生产利用系统建模分析及可持续性评价[D]. 中国科学院研究生院(过程工程研究所), 2016.
- [20]吴杰民. 沼气作为车用燃气应用模式的研究[J]. 太阳能, 2011(11):9-11.
- [21]生物燃料车——奥迪 A4 时速超越布加迪[J]. 精细与专用化学品, 2009(12):4.
- [22]于龙, 王晓东, 李卫鹏, 等. 噬菌体作为模式病毒的应用研究概况[J]. 中国消毒学杂志, 2011,28(1):89-93.
- [23]王艳秋. 国内垃圾填埋气利用新途径——压缩制汽车燃料气[J]. 中国沼气, 2004,22(1):33-34.
- [24]邢宇辉. 河南引进外国专家,研发有机废弃物生产车用沼气[J]. 国际人才交流, 2008(3):57.
- [25]DELUCHI M A. Emissions of greenhouse gases from the use of transportation fuels and electricity[J]. Greenhouse Gases, 1991.
- [26]WEISS M A, HEYWOOD J B, DRAKE E M, et al. On The Road In 2020 - A life-cycle analysis of new automobile technologies[J]. Spectra, 2000.
- [27]WANG M. Well-to-wheel energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems North American analysis.[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2001.
- [28]WANG M. Assessment of well-to-wheel energy use and greenhouse gas emissions of Fischer-Tropsch diesel.[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2001.
- [29]SCHWEIMER L. Life Cycle Inventory for the Golf A4 [R].2000.

- [30]VOLKSWAGEN. The Golf Environmental Commendation — Background Report [R].2008.
- [31]VOLKSWAGEN. The Golf Environmental Commendation — Background Report [R].2012.
- [32]AG V. he Caddy Environmental Commendation Background Report[R].2010.
- [33]ALLY J, PRYOR T. Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems[J]. Journal of Power Sources, 2007,170(2):401-411.
- [34]MOUSAZADEH H, KEYHANI A, JAVADI A, et al. Life-cycle assessment of a Solar Assist Plug-in Hybrid electric Tractor (SAPHT) in comparison with a conventional tractor[J]. Energy Conversion & Management, 2011,52(3):1700-1710.
- [35]HUSSAIN M M, DINCER I, LI X. A preliminary life cycle assessment of PEM fuel cell powered automobiles[J]. Applied Thermal Engineering, 2007,27(13):2294-2299.
- [36]ZACKRISSON M, AVELLÁN L, ORLENIUS J. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles - Critical issues[J]. Journal of Cleaner Production, 2010,18(15):1519-1529.
- [37]孙柏铭. 生命周期评价方法及在汽车代用燃料中的应用[J]. 现代化工, 1998(7):34-38.
- [38]胡志远, 浦耿强. 代用能源汽车生命周期评估[J]. 汽车工程学报, 2002(5):49-53.
- [39]胡志远, 浦耿强, 王成焘. 车用燃料乙醇的应用与发展[J]. 汽车科技, 2002(4):9-11.
- [40]胡志远, 张成, 浦耿强, 等. 木薯乙醇汽油生命周期能源、环境及经济性评价 [J]. 内燃机工程, 2004,25(1):13-16.
- [41]陈迅, 刘小利. 生命周期评价及其在汽车代用燃料经济分析中的应用[J]. 系统管理学报, 2002,11(4):340-344.
- [42]吴锐, 任玉珑, 雍静, 等. 4种天然气基汽车燃料的生命周期 3E 评价[J]. 系统

- 工程理论与实践, 2004(09):114-120.
- [43] 吴锐, 张忠益, 任玉珑, 等. 基于生命周期的天然气基汽车燃料的分析[J]. 工业工程与管理, 2004,9(4):102-106.
- [44] 楚丽明, 汤传毅. 汽车能源生命周期评价[J]. 节能与环保, 2003(11):27-29.
- [45] 邱彤, 孙柏铭, 洪学伦, 等. 发展以天然气为原料的燃料电池汽车[J]. 天然气工业, 2003,23(5):1-4.
- [46] 邱彤, 谢华伟. FCV 氢源系统生命周期评价及其软件实现[J]. 计算机与应用化学, 2004,21(1):16-18.
- [47] 邱彤, 孙柏铭, 洪学伦. 燃料电池汽车氢源系统的生命周期 EEE 综合评估[J]. 化工进展, 2003,22(5):448-453.
- [48] 冯文, 王淑娟, 倪维斗, 等. 燃料电池汽车氢能系统的环境、经济和能源评价[J]. 太阳能学报, 2003,24(3):394-400.
- [49] 冯文, 王淑娟, 倪维斗, 等. 燃料电池汽车氢源基础设施的生命周期评价[J]. 环境科学, 2003,24(3):8-15.
- [50] 刘泓伶. 生命周期评价方法在照明光源比较中的应用研究[D]. 山东大学, 2010.
- [51] 苏亚欣毛玉如赵敬德. 新能源与可再生能源概论[M]. 化学工业出版社, 2006.
- [52] 羌宁, 季学李, 徐斌. 大气污染控制工程.第 2 版[M]. 化学工业出版社, 2015.
- [53] 袁振宏, 吴创之, 马隆龙. 生物质能利用原理与技术[J]. 中国科学院广州能源研究所, 2005.
- [54] DEMI RBAS M F, BALAT M. Recent advances on the production and utilization trends of bio-fuels: a global perspective.[J]. Energy Conversion & Management, 2006,47(15):2371-2381.
- [55] FAAIJ A. Modern Biomass Conversion Technologies[J]. Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change, 2006,11(2):343-375.
- [56] 吴创之, 庄新姝, 周肇秋, 等. 生物质能利用技术发展现状分析[J]. 中国能源, 2007,29(9):35-41.
- [57] 陈曦, 韩志群, 孔繁华, 等. 生物质能源的开发与利用[J]. 化学进展, 2007,19(7):1091-1097.

- [58]冉毅, 蔡萍, 黄家鹤, 等. 国内外沼气提纯生物天然气技术研究及应用[J]. 中国沼气, 2016,34(5):61-66.
- [59]孟昭满. 生活垃圾填埋产沼的提取净化利用[J]. 中国环保产业, 2007(12):49-51.
- [60]黄伟, 张欣, 胡准庆. 车用沼气燃料生命周期的评价[J]. 内燃机学报, 2015(06):549-554.
- [61]黄伟, 张欣. 城市客车燃用沼气的生命周期分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016,16(2):44-48.
- [62]张亮. 车用燃料煤基二甲醚的生命周期能源消耗、环境排放与经济性研究, 2007[C]. 上海交通大学.
- [63]中国电力年鉴编辑委员会. 2013-中国电力年鉴[M]. 中国电力出版社, 2013.
- [64]王明新, 夏训峰, 柴育红, 等. 农村户用沼气工程生命周期节能减排效益[J]. 农业工程学报, 2010,26(11):245-250.
- [65]欧训民, 张希良, 常世彦. 多种新能源公交车能耗与主要污染物排放全生命周期对比分析[J]. 汽车与配件, 2008(52):16-20.
- [66]环境保护部. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法 : Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles : 中国第五阶段[M]. 中国环境出版社, 2013.
- [67]冷如波. 产品生命周期 3E+S 评价与决策分析方法研究[D]. 上海交通大学, 2007.
- [68]胡志远. 燃料乙醇生命周期评价及多目标优化方法研究[D]. 上海交通大学, 2004.
- [69]IPCC I. IPCC Fourth Assessment Report: climate change 2007[J]. 2007,1340-1356.
- [70]李书华. 电动汽车全生命周期分析及环境效益评价[D]. 吉林大学, 2014.
- [71]GUINEE J B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2002,7(5):311-313.
- [72]田亚峥, 郑泽根. 生命周期影响评价权重系数的确定方法探讨[J]. 土木建筑与环境工程, 2003,25(5):61-64.

- [73]王雪铭. 评价方法的演变与分类研究[D]. 上海交通大学, 2009.
- [74]唐少清. 项目评估与管理[M]. 中国人民大学出版社, 2015.
- [75]余金凤. 项目论证与评估[M]. 华东理工大学出版社, 2015.
- [76]李娟. 纯电动汽车与燃油汽车动力系统生命周期评价与分析[D]. 湖南大学, 2015.
- [77]李琼慧, 王彩霞. 从电力发展“十三五”规划看新能源发展[J]. 中国电力, 2017,50(1):30-36.

致谢

转眼间，曾经万般憧憬的研究生生活即将结束，在此，我要对帮助和照顾过我的老师和同学表示感谢。

首先，我要特别感谢我的导师黄福川教授。本论文是在黄老师认真、细致的指导下完成的。黄福川教授严谨的治学态度、渊博的专业知识和精益求精的工作作风，时刻鞭策和激励着我不断前进。黄老师的谆谆教诲始终谨记于心，必将令我终身受益，再次衷心地感谢黄福川教授！

感谢校外指导老师覃克高级工程师、黄磊总经理和南宁市德联车护汽车科技有限公司。感谢潘树林老师、卢苇老师、林清宇老师、黄世钊老师、冯振飞老师给予的帮助和教诲。

感谢广西科技计划项目“餐厨垃圾资源化技术的开发与应用”（桂科AB16380249）对本课题的资助。感谢广西蓝德再生能源有限公司和陆思宇主任对工作的支持。

感谢我的师兄马骁飞、李康春、韦开焕、刘宇恒、邓富康和陈彪在学习生活中的照顾。感谢同学陈一帆、唐弓斌、苏杨、张姗姗、黄军和师弟师妹们的帮助。

最后，感谢我的亲人和朋友在我研究生生活中的支持，祝愿以上所有人永远幸福！

肖 锋

2018年3月 于南宁 广西大学

攻读硕士期间论文发表情况

- [1] Xiao Feng, Zhang Shanshan, et al. Analysis on Life Cycle Energy Consumption and Emission of Vehicle Gas Produced by Kitchen Waste[J]. Earth and Environmental Science (MSETEE 2018, EI) Accepted.