

# 含氧生物质燃料的生命周期评价

易红宏<sup>1</sup>, 朱永青<sup>1,2</sup>, 王建昕<sup>2</sup>, 郝吉明<sup>1\*</sup>

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京, 100084; 2. 清华大学汽车工程系, 北京, 100084)

摘要: 为公正评价汽车代用燃料的能耗与环境效益, 运用生命周期评价方法, 研究了在燃料中分别添加不同比例的乙醇和甲酯 2 种生物质, 带来的生命周期能耗和污染物排放变化, 并对含氧生物质燃料的未来情景进行了预测分析. 结果表明: 乙醇代用燃料未降低化石燃料消耗, 甲酯代用燃料可降低约 20% 的化石燃料消耗; 几种配比的代用燃料均可降低石油消耗, 甲酯代用燃料降低的趋势更加明显; 各种代用燃料的温室气体排放都比较严重; 乙醇代用燃料增加了  $\text{NO}_x$  排放, 而甲酯代用燃料可降低约 50% 的  $\text{NO}_x$  排放; 乙醇和甲酯的加入均能降低车用阶段的  $\text{PM}_{10}$  排放; 燃料生产阶段的  $\text{SO}_2$  排放在整个生命周期中约占 80%, 必须严格控制; 甲酯代用燃料可降低 VOC 排放.

关键词: 生物质燃料; 代用燃料; 生命周期评价

中图分类号: X382.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)06-0028-05

## Life Cycle Assessment on Oxygen Biofuels

YI Hong-hong<sup>1</sup>, ZHU Yong-qing<sup>1,2</sup>, WANG Jian-xin<sup>2</sup>, HAO Ji-ming<sup>1</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Automobile Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Life Cycle Assessment (LCA) was used to compare energy consumption and pollutant emissions of two oxygen biofuels, ethanol and methyl ester, which were mixed with gasoline and diesel oil at levels of 10% and 30% of the biofuel. The future of oxygen-containing biofuels was analyzed and forecasted. The results show that the mixture of biofuels and petroleum products can reduce crude oil consumption, but only methyl ester alternative fuel can reduce fossil fuel consumption. Use of methyl ester mixtures would reduce  $\text{NO}_x$  by 50% compared to gasoline or diesel on a life cycle basis; however,  $\text{NO}_x$  would increase using ethanol. Each alternative fuel mixture reduced  $\text{PM}_{10}$  emissions from the vehicle and methyl ester decreased VOCs. The  $\text{SO}_2$  emissions from the fuel production processes, which account for about 80% of  $\text{SO}_2$  life cycle emissions, must be strictly controlled.

Key words: oxygen biofuels; alternative fuels; life cycle assessment

2003 年底, 我国的汽车保有量已达  $2.380 \times 10^4$  辆, 随着汽车保有量的增加, 机动车尾气排放污染已经成为大城市空气污染的一个主要来源, 同时, 全球性持续的汽车能源不足问题也越来越严峻. 控制汽车尾气排放和缓解能源压力的一个重要途径是采用新型清洁代用燃料, 如在汽油、柴油中加入含氧燃料<sup>[1-4]</sup>. 为了公正评价汽车代用燃料的能耗与环境效益, 有必要对燃料开采、生产和运输等各个阶段的能耗和污染排放进行综合评价<sup>[5]</sup>. 本文研究了乙醇和甲酯 2 种生物质分别按照 10% 和 30% 的比例加入燃料后, 带来的生命周期能耗及污染物排放变化; 为了进一步了解能耗和环境优化后生物质燃料的能源、环境特性, 对含氧生物质燃料的未来情景进行了分析和预测.

### 1 评价框架

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是一种评价产品、工艺过程或活动的整个生命周期环境影响的分析工具, 包括初始化、目标定义和范围界

定、清单分析、影响评价和改善评价 4 个阶段<sup>[6-7]</sup>, 是汇总和评估一个产品 (或服务) 体系生命周期的所有投入及产出对环境造成的和潜在的影响的方法<sup>[8]</sup>.

本文研究的汽车燃料包括: 汽油、柴油、含乙醇 10%、30% 的混合燃料、含甲酯 10%、30% 的混合燃料, 其中乙醇和甲酯的来源分别为玉米加工和棉籽油加工.

评价涉及的流程主要包括燃料生产、燃料加工、燃料使用 3 个阶段. 以乙醇燃料为例, 建立评价框架, 如图 1 所示.

### 2 评价方法

#### 2.1 评价内容

首先计算了各种混合燃料的生命周期污染排放

收稿日期: 2004-12-07; 修订日期: 2005-02-21

基金项目: 清华大学基础研究基金重点项目 (200208003)

作者简介: 易红宏 (1976-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染控制.

\* 通讯联系人, E-mail: hji@den@tsinghua.edu.cn

因子和能耗. 生命周期排放因子是机动车尾气排放因子和燃料的上游排放因子的总和. 生命周期能耗的计算方法与排放因子计算类似, 是原材料开采能耗、能源生产能耗和机动车能耗等的总和<sup>[9, 10]</sup>.

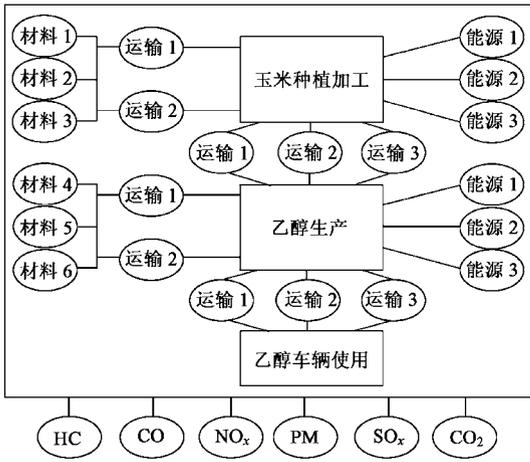


图 1 乙醇代用燃料评价框架

Fig. 1 Assessment frame of ethanol alternative fuels

此外, 根据工业随年代的变化, 应用评价模式对 2010 年燃料的排放和能耗状况进行预测. 工业随年代的变化表现在 3 个方面: ①污染控制技术的普及和新技术的使用; ②能源结构的变化; ③新技术的应用<sup>[11]</sup>. 污染控制技术的普及可以反映在排放因子的变化上. 因此, 本文将固定源、流动源的排放因子分为现状和未来 2 类, 分别采用目前的排放因子和污染控制技术后的排放因子.

## 2.2 评价指标及清单分析

本研究的气体污染物包括: 5 种主要大气污染物 HC、CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub> 和 SO<sub>2</sub>, 以及 3 种温室气体 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub>.

(1) 固定源 固定源燃烧排放的 CO、HC、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通过(1)式计算.

$$Em_i = \sum_j \sum_k EF_{i,j,k} \times FC_{j,k} \div 10^6 \quad (1)$$

$Em_i$ : 每 MJ 燃料产生的第  $i$  种污染物排放;  
 $EF_{i,j,k}$ : 第  $j$  种燃料采用第  $k$  种燃烧技术时的排放因子(g/MJ);  
 $FC_{j,k}$ : 第  $k$  种燃烧技术消耗的第  $j$  种燃料的消耗量(MJ).

SO<sub>2</sub> 排放因子由公式(2)计算.

$$SO_2 = D \div LHV \times 10^5 \times S \times 64 \div 32 \times C_s \quad (2)$$

SO<sub>2</sub>: 某种燃料以某种燃烧方式燃烧时的 SO<sub>2</sub> 排放因子(g/MJ);  
 $D$ : 燃料密度(g/L);  
 $LHV$ : 燃料的低热值(J/L);  
 $S$ : 燃料中硫含量的质量分数;  
 $C_s$ : 为 S 的

转化率.

CO<sub>2</sub> 的排放因子采用碳平衡计算, 即燃料中的含碳量减去污染物(HC、CO、CH<sub>4</sub>)中的含碳量, 再转化成 CO<sub>2</sub> 排放量, 见公式(3).

$$CO_2 = [D \div LHV \times 10^6 \times C - (HC \times 0.85 + CO \times 0.43 + CH_4 \times 0.75)] \times 44 \div 12 \times E \quad (3)$$

CO<sub>2</sub>、HC、CO、CH<sub>4</sub>: 某种燃料以某种燃烧技术燃烧时的 CO<sub>2</sub>、HC、CO、CH<sub>4</sub> 排放因子(g/MJ);  
 $C$ : 燃料中碳含量的质量分数;  
 $E$ :  $C$  的转化率;

其它符号意义同前.

现状排放因子通过实测数据的统计, 选取全国平均水平以及国内文献调研获得, 基本代表了我国目前污染物的排放水平<sup>[12~14]</sup>. 鉴于国内尚无系统的 PM<sub>10</sub> 排放因子研究报告, 本文采用美国环保局“EPA's AP-42”报告推荐的数值.

除固定源的燃烧排放外, 固定源的非燃烧排放考虑了液态燃料储运时的 HC 泄漏排放. 燃煤发电生命周期中采煤场 CH<sub>4</sub> 排放和洗煤厂非燃烧排放等, 这些污染排放主要由生产过程中污染蒸发、燃料泄漏造成. 由于国内缺乏以上过程的相关数据, 计算时采用了美国的调查结果<sup>[12, 13]</sup>.

(2) 流动源 流动源(机动车)的污染物同固定源相同. 汽车的排放主要包括 2 个阶段, ①原材料储运、燃料输配环节; ②燃料的车用阶段. 本文考虑的汽车主要为汽油车和柴油车, 类型为普通小车.

机动车 HC、CO、NO<sub>x</sub> 的排放因子通过国内文献获得<sup>[15]</sup>; PM<sub>10</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放因子采用美国环保局报告的数据; SO<sub>2</sub> 排放基于硫平衡计算, 并假设所有燃料中的 S 都转化为 SO<sub>2</sub>; CO<sub>2</sub> 排放基于 C 平衡计算. 代用燃料车排放因子中, 除 CO<sub>2</sub> 外, 其它数据由汽油车污染排放因子乘以代用燃料车排放改变系数得到, CO<sub>2</sub> 排放的计算和汽油车相同.

能耗参数包括: 石油系的能源转化效率、天然气系的能源转化效率、煤系的能源转化效率和发电.

## 3 评价结果与分析

评价结果包括汽油、柴油、含乙醇 10% 的代用燃料、含乙醇 30% 的代用燃料的近景及远景评价. 由于目前甲酯作为代用燃料, 尚未大规模应用, 近景评价没有意义, 因此, 对含 10% 甲酯的柴油和含 30% 甲酯的柴油仅进行了远景评价.

### 3.1 生命周期能耗分析

#### 3.1.1 总能耗

燃料的生命周期总能耗是开采、运输、生产、运输和使用这 5 个环节能源消耗的总和<sup>[16]</sup>,如图 2 所示。

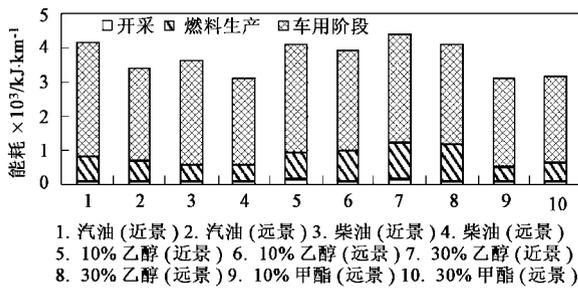


图 2 生命周期总能耗对比

Fig. 2 The comparison of total energy consumption

由图 1 可知,2010 年的总能耗变化趋势和目前是一致的,即使用柴油车可以降低总能耗,因此,从交通节能的角度,与近期国家提倡的柴油车是一致的。

### 3.1.2 化石能源和石油消耗

化石燃料和石油燃料的变化趋势分别见图 3 和图 4。

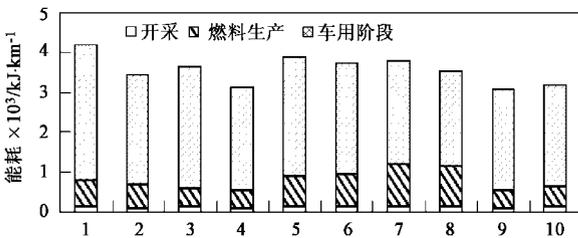


图 3 生命周期化石燃料消耗对比(1~10 数字含义同图 2)

Fig. 3 The comparison of fossil fuel consumption

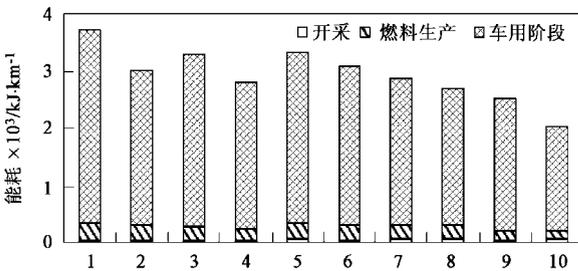


图 4 生命周期石油消耗对比(1~10 数字含义同图 2)

Fig. 4 The comparison of petroleum consumption

可以看出:未来的化石燃料和石油消耗将降低为现在的 75%左右;使用乙醇代用燃料,并不会降低化石燃料消耗量,因为在乙醇生产过程中,化石燃料的消耗量增加了;使用甲酯代用燃料,会降低化石

燃料消耗量 20%左右;使用几种代用燃料,都会降低石油的消耗量,使用甲酯代用燃料时,降低的趋势更加明显。

### 3.2 生命周期中污染物排放分析

#### 3.2.1 温室气体

CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 3 种温室气体的生命周期排放结果分别见图 5~图 7。

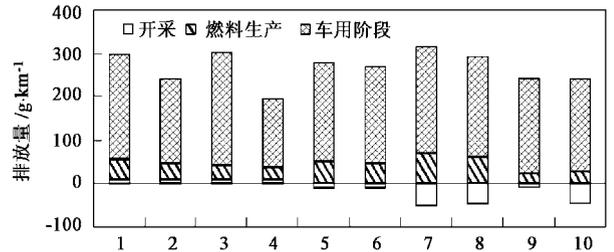


图 5 CO<sub>2</sub> 排放量对比(1~10 数字含义同图 2)

Fig. 5 The comparison of CO<sub>2</sub> e mission

由图 5 可知,绝大部分的 CO<sub>2</sub> 排放仍集中在车用阶段。未来 CO<sub>2</sub> 排放量将降低至目前的 60%左右,这主要得益于技术改进。使用乙醇代用燃料,生产和车用阶段的 CO<sub>2</sub> 排放将会增加,通过技术改进可以降低其排放,但是仍高于汽油燃料。甲酯代用燃料减少了 CO<sub>2</sub> 排放量,同时植物生长过程中会吸收部分 CO<sub>2</sub>,总体看来,加入甲酯可以降低 CO<sub>2</sub> 排放。

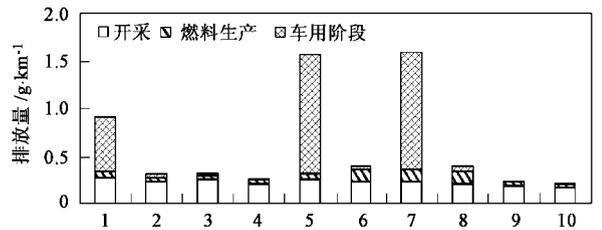


图 6 CH<sub>4</sub> 排放对比(1~10 数字含义同图 2)

Fig. 6 The comparison of CH<sub>4</sub> e mission

由图 6 所知,CH<sub>4</sub> 的主要排放集中在目前的汽油,含 10%乙醇和 30%乙醇的混合燃料,但通过技术改进,可将 CH<sub>4</sub> 排放降至很低的水平;燃料开采阶段的 CH<sub>4</sub> 排放也不容忽视,且技术改进对开采阶段的影响不大;柴油、加入 10%和 30%甲酯的代用燃料在车用阶段基本没有 CH<sub>4</sub> 生成。

由图 7 整体看来, N<sub>2</sub>O 排放的数量级低于其它温室气体的排放,其中绝大部分 N<sub>2</sub>O 产生在车用阶段;乙醇生产阶段也是 N<sub>2</sub>O 排放的一个重要阶段;甲酯的加入不会带来其变化;技术改进对降低 N<sub>2</sub>O 排放的作用不是很明显。

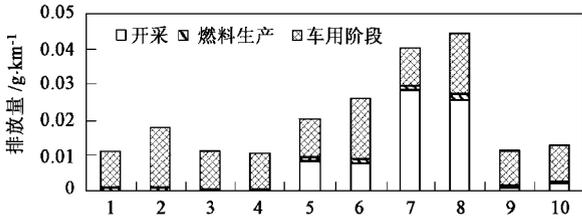


图 7 N<sub>2</sub>O 排放对比 (1~10 数字含义同图 2)

Fig. 7 The comparison of N<sub>2</sub>O emission

此外,根据 IPCC 推荐的全球气候变暖势(见表 1),将 3 种温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O)分别乘以各自的全球气候变暖势,计算了基于 CO<sub>2</sub> 平衡的温室气体(Greenhouse gasses, GHGs)排放,计算结果如图 8 所示。

表 1 全球气候变暖势

Table 1 The trend of global climatic change

| 温室气体             | 全球气候变暖势 |
|------------------|---------|
| CO <sub>2</sub>  | 1       |
| CH <sub>4</sub>  | 21      |
| N <sub>2</sub> O | 310     |

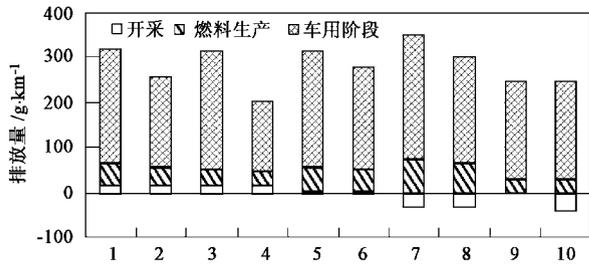


图 8 GHGs 排放对比 (1~10 数字含义同图 2)

Fig. 8 The comparison of GHGs emission

由表 1 和图 8 可知,N<sub>2</sub>O 的温室作用最明显,其次是 CH<sub>4</sub>。各种燃料的温室气体排放都比较严重,且只有柴油可以通过技术改进较大的降低其排放,降低比例约 40%。此外,燃料生产过程中的温室气体排放也较多,并且通过技术改进得不到很好地解决,需要给予重视。

### 3.2.2 NO<sub>x</sub>

NO<sub>x</sub> 的生命周期排放结果见图 9。

由图 9 所示,NO<sub>x</sub> 排放仍集中在车用阶段;乙醇的加入增加了 NO<sub>x</sub> 排放,而加入甲酯可以降低 NO<sub>x</sub> 排放,降低幅度约 50%;通过技术改进可有效控制 NO<sub>x</sub> 的排放。

### 3.2.3 PM<sub>10</sub>

PM<sub>10</sub> 的生命周期排放结果绘于图 10。

如图 10 可知,汽油燃料排放的 PM<sub>10</sub> 远远低于柴油燃料,但通过技术改进可有效控制未来柴油燃料的 PM<sub>10</sub> 排放;乙醇和甲酯的加入均能降低车用阶段的 PM<sub>10</sub> 排放,值得注意的是,乙醇燃料在开采过程中会带来较大的 PM<sub>10</sub> 排放,并且技术改进对其没有很好的控制效果。

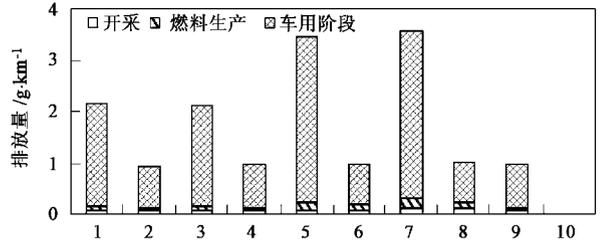


图 9 NO<sub>x</sub> 排放对比 (1~10 数字含义同图 2)

Fig. 9 The comparison of NO<sub>x</sub> emission

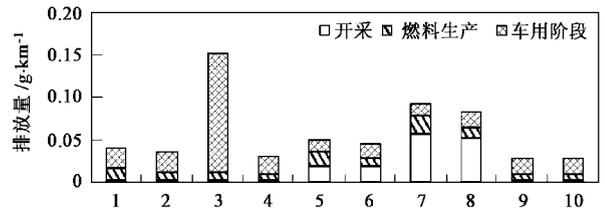


图 10 PM<sub>10</sub> 排放对比 (1~10 数字含义同图 2)

Fig. 10 The comparison of PM<sub>10</sub> emission

### 3.2.4 SO<sub>2</sub>

SO<sub>2</sub> 的生命周期排放结果见图 11。

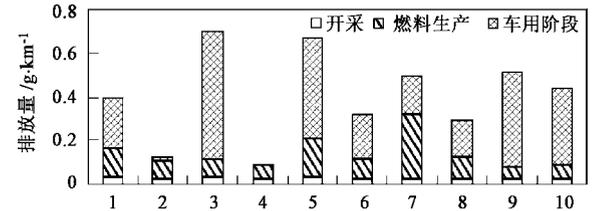


图 11 SO<sub>2</sub> 排放对比 (1~10 数字含义同图 2)

Fig. 11 The comparison of SO<sub>2</sub> emission

由图 11 可知,SO<sub>2</sub> 排放主要集中在燃料的车用过程,通过技术改进可降低 90% 以上;同时,乙醇生产过程中排放的 SO<sub>2</sub> 也很严重,不过,这种排放可以得到较好的控制。

### 3.2.5 VOC

VOC 的生命周期排放结果见图 12。

由图 12 可知,汽车燃料在开采和生产过程中,

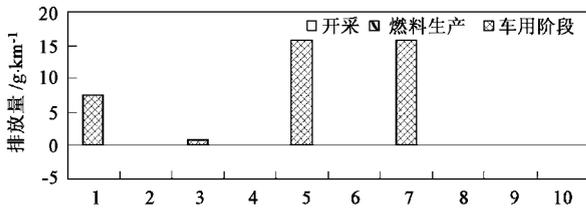


图 12 VOC 排放对比 (1~10 数字含义同图 2)

Fig. 12 The comparison of VOC emission

不会带来 VOC 排放;目前,不管是汽油,还是乙醇代用燃料,车用阶段的 VOC 排放都不容忽视,不过通过技术改进可有效控制 VOC 排放;另外,加入甲酯可以降低 VOC 排放。

#### 4 结论

根据对含氧生物质燃料生产和使用现状的调研,以及对未来燃料的预测,运用生命周期评价方法,评价了乙醇和甲酯 2 种含氧生物质燃料的能耗和环境特性,得出以下结论:

(1) 乙醇代用燃料未降低化石燃料的消耗,而甲酯代用燃料可降低约 20% 的化石燃料消耗;几种代用燃料均可降低石油的消耗量,使用甲酯代用燃料时,这种趋势更加明显。

(2)  $N_2O$  的温室作用最明显,其次是  $CH_4$ 。各种燃料的温室气体排放都比较严重,且只有柴油可通过技术改进降低约 40% 的排放;燃料生产过程中排放的 GHGs 也较多。

(3) 乙醇代用燃料增加了  $NO_x$  排放,而甲酯代用燃料可降低  $NO_x$  排放;乙醇和甲酯的加入均能降低车用阶段的  $PM_{10}$  排放;车用阶段的  $SO_2$  排放在整个生命周期中占 60%~70%,必须严格控制;甲酯代用燃料可降低 VOC 排放。

#### 参考文献:

[1] 何邦全. 发动机含氧燃料的燃烧与排放特性研究[R]. 博士后研究报告. 北京:清华大学, 2003.

- [2] 何邦全, 王建昕, 阎小光. 柴油机含氧燃料的研究进展[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 134~138.
- [3] 王建昕, 傅立新, 黎维彬. 汽车排气污染治理及催化转化器[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [4] Sirman M B, Owens E C, Whitney K A. Emissions comparison of alternative fuels in an advanced automotive diesel engine southwest research institute [A]. International Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition [C]. Paris, 2000.
- [5] 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.
- [6] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, et al. Life cycle assessment- Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications [J]. Environment International, 2004, 30 (5): 701~720.
- [7] Pennington D W, Potting J, Finnveden G. Life cycle assessment Part 2: current impact assessment practice [J]. Environment International, 2004, 30 (5): 721~739.
- [8] International Standard ISO 14040. Environmental management life cycle assessment — principles and framework [M]. 1997.
- [9] 郑毅. 汽车燃料替代与城市汽车污染控制研究[D]. 北京: 清华大学, 1998.
- [10] Adams W, Schmidt W P. Design for recycling and design for environment: use of life cycle assessment at ford motor company [A]. EURO ENVIRONMENT Proceedings [C]. Aalborg: Aalborg Kongres & Kultur Center, 1998. 1~5.
- [11] 何邦全, 阎小光, 王建昕. 电喷汽油机燃用乙醇-汽油燃料的排放性能研究[J]. 内燃机学报, 2002, 20(5): 399~402.
- [12] 中美合作研究组. 中国山西省和其他富煤地区把煤转化成汽车燃料及其应用的经济、环境和能源利用的生命周期评估 [A]. 项目总结报告[C]. 中美合作研究组, 1997.
- [13] 清华大学环境科学与工程系. 中国机动车排放控制战略研究——综合报告 [A]. 世界银行贷款中国环境技术援助项目 [C]. 清华大学, 1997.
- [14] 胡名操. 环境保护实用数据手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [15] 北京市可持续发展科技促进中心, 清华大学环境科学与工程研究院. 北京市替代燃料车发展战略研究 [R]. 清华大学, 2004.
- [16] Arnold Tukker. Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20 (4): 435~456.