

文章编号:0254-0096(2014)09-1700-08

生物质制取高品位液体燃料的生命周期评价

瞿婷婷, 肖 军, 沈来宏

(东南大学能源与环境学院, 能源转换及其过程测控教育部重点实验室, 南京 210096)

摘 要: 采用生命周期评价方法(LCA)对稻秸热解提质制取液体燃料和稻秸气化合成液体燃料4种工艺进行环境影响评价。将CO₂、NO_x、SO₂等污染物分为7种环境影响类型,用货币化方法量化不同污染物对环境的影响。结果表明,生命周期环境影响成本由低到高分别为二甲醚11.54 ¥/GJ、精制油16.79 ¥/GJ、乳化油17.86 ¥/GJ、柴油18.04 ¥/GJ和费托油20.30 ¥/GJ;生物燃料(乳化油除外)的生产上游环境性能较好,液体燃料的消费排放亦比柴油有所改善,生产过程环境影响较大;以化石柴油为基准,生物质制取液体燃料的温室效应降低9.4%~121.1%,二甲醚酸化和光化学污染分别降低27.8%~34.7%和15.6%~53.8%,但其他3种生物燃料酸化增加5.0%~61.2%。

关键词: 生命周期评价; 生物质; 热解提质; 液体燃料

中图分类号: TK6

文献标识码: A

0 引 言

生物质转化为高品位液体燃料代替化石燃料,对保障能源安全具有重要意义。生物质转化为液体燃料的工艺目前有多种选择,木质素类生物质可气化合成费托油、甲醇、二甲醚,也可热解提精制取绿色柴油。在国外欧美日等发达国家,生命周期评价技术应用已较为普遍,美国 Argonne 国家实验室从 1995 年开始致力于汽车燃料的生命周期分析,其报告中的模型、基础数据及研究结果被广为引用^[1]。基于 LCA 方法,国外针对大豆^[2]、木材类、稻草^[3]和废弃食用油^[4,5]等开展了大量研究;国内也有部分研究人员研究了大豆、油菜籽、光皮树等制取液体燃料的环境影响^[6,7]。国内外的研究结果一致表明:相比于化石柴油,生物质制取液体燃料对环境有益,可显著降低温室效应。但目前对于农作物秸秆通过热解提质制取液体燃料的研究较少,且通过不同技术路线制取液体燃料的比较也少有报道。

本文从环境影响角度考虑,采用生命周期评价(LCA)方法,对稻秸热解提质制取液体燃料和气化合成液体燃料4种工艺进行评价,并与化石柴油进行比较,分析生物质通过不同技术路线制取液体燃料的优劣。

1 研究方法

LCA 是一种用于评估产品在其整个生命周期(即从原材料的获取、生产、使用直至最终处置)中的环境影响因素及其潜在影响的技术和方法。对生物质转化为液体燃料而言,其生命周期是指从原料的获取到燃料的消耗殆尽。

1.1 研究对象

本文生物质选择水稻秸秆,成分分析如表1所示。稻秸热解乳化制取乳化油系统工艺如图1所示,稻秸快速热解采用串行流化床技术^[8]。热解得到的生物原油通过乳化剂与柴油进行混合乳化。稻秸热解酯化加氢制取精制油的系统工艺如图2所示,采用串行流化床技术热解稻秸,收集的生物油先减压蒸馏,脱除其中的部分水分后与甲醇混合通入高压反应釜中,在催化剂的作用下实现加氢反应;最后对产物进行分离提纯,未反应的甲醇回收再利用。采用串行流化床稻秸气化合成二甲醚,包括稻秸气化、气体净化、合成气二甲醚合成和产物分离(图3);采用串行流化床稻秸气化合成费托油,包括稻秸气化、气体净化、合成气费托合成和产物分离(图4)^[9]。

收稿日期: 2012-06-01

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2013CB228106)

通信作者: 肖 军(1968—), 女, 博士、教授, 主要从事生物质热化学转化利用方面的研究。jxiao@seu.edu.cn

表1 稻秸成分分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of rice straw

工业分析/%				元素分析/%				
W_{ad}	FC_{ad}	V_{ad}	A_{ad}	$[C]_{ad}$	$[H]_{ad}$	$[O]_{ad}$	$[N]_{ad}$	$[S]_{ad}$
9.10	16.75	63.69	10.46	35.37	4.82	39.15	0.96	0.14

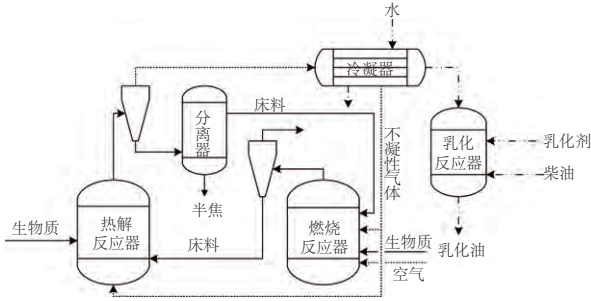


图1 生物质制取乳化油系统示意图
Fig. 1 System for bio-emulsified diesel

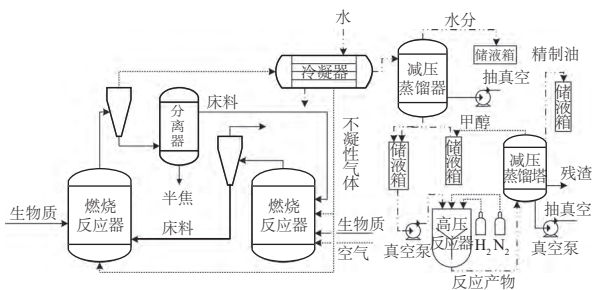


图2 生物质制取精制油系统示意图
Fig. 2 System for bio-hydrogenized diesel

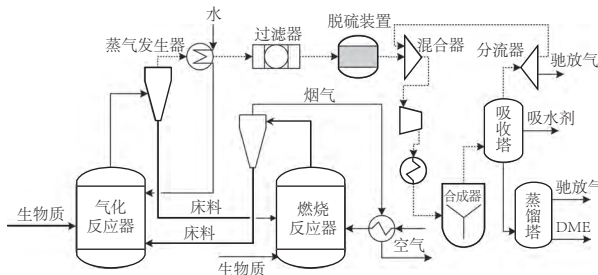


图3 生物质制取二甲醚系统示意图
Fig. 3 System for biomass dimethyl ether (DME)

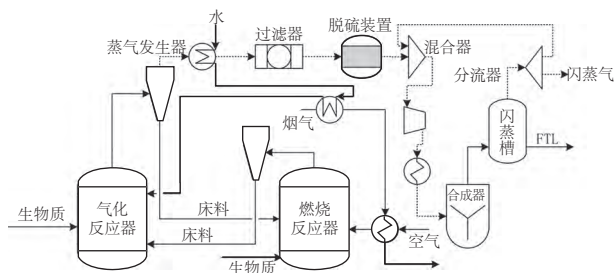


图4 生物质制取费托油系统示意图
Fig. 4 System for biomass Fischer-Tropsch liquid (FTL)

1.2 生命周期评价的系统边界

本文考察生物质转化为液体燃料的环境影响,分为生产上游、生产过程和生产下游3个单元阶段。其中,生产上游包括生物质生长和运输;生产过程指液体燃料的制取;生产下游指液体燃料的消费和废弃物处置。环境影响考虑生物质生长、运输、生产和消费对环境的直接影响以及化肥、电力等输入资源生产对环境的间接影响。期间考虑的排放物包括 CH_4 、 CO 、 CO_2 、 HC 、 NO_x 、 N_2O 、 PM_{10} 、 SO_2 、排污水(COD、N、 NH_3-N)、农药和固废。

2 生命周期排放清单分析

2.1 生产上游污染物清单分析

生物质生长阶段的环境影响主要考虑:稻秸生长光合作用对 CO_2 的吸收固定(根据稻秸的含碳量计算)、稻田排放的温室气体 CH_4 和 N_2O ^[10]、化肥的使用引起水体总氮超标导致的水体富营养化^[11,12]。稻田化肥纯 N、磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)施用量分别以 30.57、10.61 和 8.55 kg/t 计算^[13];农药施用导致农田生态系统生物多样性减少,农药平均施用量为 3 kg/(t 稻谷),流失率为 18%;由于缺乏有效的农药生产数据,且农药的施用量远低于化肥,只考虑化肥生产引起的间接排放^[14]。稻秸生长阶段污染物的排放按经济价值进行计算,稻秸环境影响权重系数 K_{rs} 按式(1)计算。

$$K_{rs} = \frac{P_{rs}}{MF_{rs} \times P_{rs} + P_{rg}} \quad (1)$$

式中, K_{rs} ——稻秸环境影响权重系数; MF_{rs} ——稻秸与稻谷的质量比,为 0.9:1; P_{rs} ——稻秸价格,取 300 元/t; P_{rg} ——稻谷价格,取 2560 元/t。

生物质运输过程中仅考虑运输过程中机动车的排放。假设生物质收集半径为 50 km,道路曲折因子为 1.3,运输工具为载重 5 t 的柴油轻型货车,油耗为 0.18 L/km,柴油密度取 0.85 kg/L,含碳量平均为 85.5%,含硫量平均为 0.125%。假设柴油完全燃烧, CO_2 和 SO_2 的排放按各自的元素含量计算;

HC、CO、PM₁₀、NO_x的排放参考国家标准计算^[15];CH₄和 N₂O 的排放基于欧Ⅲ的柴油轻型货车主要污染物排放因子计算^[16]。稻秸生长和运输排放清单如表 2。

作为乳化油的原料之一的化石柴油,其生产过程中带来的环境影响不可忽视^[14,17],计入生产上游。化石柴油的运输途径与生物质截然不同,国内原油运输以管道运输方式为主,因此仅考虑柴油通过铁路运输的过程排放^[14]。化石柴油生产和运输排放清单如表 3。

表 2 稻秸生长和运输排放清单

Table 2 Inventory results of rice straw growth and transportation

污染物	污染物排放/kg·(t 稻秸) ⁻¹	
	稻秸生长	运输
CO ₂	-1261.52	6.24
CH ₄	4.3002	0.0001
N ₂ O	0.0375	0.0003
NO _x	0.1255	0.0279
SO ₂	0.1078	0.0050
CO	0.0155	0.0119
HC	0.0022	0.0037
PM ₁₀	0.0173	0.0002
TN	0.3240	—
农药	0.0572	—

表 3 化石柴油生产和运输排放清单

Table 3 Inventory results of fossil diesel production and transportation

污染物	污染物排放/kg·(t 柴油) ⁻¹		
	石油开采	柴油生产	柴油运输
CO ₂	230.75	1701.93	10.17
CH ₄	0.7166	0.6563	0.0005
N ₂ O	0.0047	0.1312	0.0001
NO _x	0.9848	4.7624	0.1301
SO ₂	0.3852	2.9490	0.0129
CO	4.4214	1.2880	0.0394
HC	0.0590	0.1246	0.0105
PM ₁₀	0.0543	0.5084	0.0033
COD	—	0.0671	—
NH ₃ -N	—	0.0083	—
固废	—	68.22	—

2.2 生产过程的污染物清单分析

乳化油由生物油、0#柴油和乳化剂按质量分数 20%、75%和 5%配比制得。乳化剂生产的间接影响

参考非离子表面活性剂环境评价报告计算^[18]。生产每吨乳化油需消耗稻秸 0.5 t,生成副产品焦炭 129 kg,消耗电能 296 kWh。生产每吨精制油需消耗生物质 4.077 t,甲醇 0.8 t,生成副产品焦炭 2050 kg,消耗电能 1172 kWh。过程中添加的甲醇由稻秸气化合成,甲醇生产的环境影响包括稻秸生长、运输、气化合成甲醇^[19,20]和甲醇运输,作为间接环境影响计入精制油的生产过程中。基于稻秸热解原油的污染物排放^[8]得到稻秸热解制取乳化油和精制油的生产过程排放清单(如表 4)。稻秸气化合成二甲醚和费托油过程污染物排放基于文献^[9]计算得到,生产每吨二甲醚需用稻秸 3.7 t,消耗电能 600 kWh。生产每吨费托油需用稻秸 13.007 t,副产蜡 378 kg,消耗电能 800 kWh。

表 4 稻秸制取不同液体燃料的生产排放清单

Table 4 Inventory results of four liquid fuels from biomass production

污染物	污染物排放/kg·(t 液体燃料) ⁻¹			
	乳化油	精制油	二甲醚	费托油
CO ₂	422.77	1973.75	3304.57	12398.34
CH ₄	0.0023	11.4219	3.6712	1.9258
N ₂ O	0.0021	0.1133	0.0060	0.0019
NO _x	0.6530	6.6353	2.4629	12.7726
SO ₂	0.7166	6.2454	4.4527	12.8728
CO	0.1035	2.6170	5.4660	12.8957
HC	0.0100	0.0896	0.0282	0.0087
PM ₁₀	0.2116	2.6638	1.6106	10.3669
COD	0.0226	0.2937	0.0750	0.3000
NH ₃ -N	0.0032	0.0490	0.0125	0.0500
固废	27.12	244.75	438.62	1419.37

2.3 生产下游的污染物清单分析

本文液体燃料统一作为车用燃料消费,乳化油热值为 37.4 MJ/kg,精制油热值 21.4 MJ/kg,二甲醚热值 27.6 MJ/kg,费托油热值 43.7 MJ/kg,0#柴油热值 42.7 MJ/kg,根据液体燃料性质,假设完全燃烧,各污染物排放基于不同机动车排放^[18,21-24],折算到牡丹中巴车(型号:MD6601)得到。生物燃料暂不考虑 CH₄和 N₂O 的排放。乳化油和精制油生产过程中副产品焦炭考虑作为固体吸附剂使用,排放为固体废弃物。费托油生产过程中的费托蜡考虑用来制作纤维板,不考虑该部分的环境影响。生产下游消费排放清单见表 5。

表5 生产下游消费排放清单

Table 5 Inventory results of the downstream process consumption

污染物	污染物排放/kg·(t燃料) ⁻¹				
	乳化油	精制油	二甲醚	费托油	0#柴油
CO ₂	2713	2090	1914	3113	3135
CH ₄	—	—	—	—	0.0784
N ₂ O	—	—	—	—	0.1569
NO _x	20.7307	11.9586	6.9202	18.2052	22.1527
SO ₂	2.0000	—	—	—	2.5000
CO	6.7491	3.5273	1.7279	7.3091	8.3432
HC	2.4299	0.8142	0.5184	2.2445	2.5893
PM ₁₀	0.2410	0.0634	0.1555	0.2008	0.3165
固体废弃物	12.89	205.00	—	—	—

3 环境影响评价

根据 LCA 排放清单,考虑 7 种不同环境影响类型,基于污染物造成的经济损失,结合各污染物的环境影响当量因子^[25],通过货币化方法量化不同的污染物环境影响,从而对稻秸制取不同液体燃料的环境影响进行综合评价。

1)CO₂、CH₄和 N₂O 会引发温室效应,发展中国家由于温室效应引起的 GDP 损失为 2%~9%,其中 CO₂ 约占 50%^[26]。据 EIA 统计,我国 2001~2005 年排放 CO₂ 20.5 亿 t,GDP 总值为 7.09×10⁴亿元,由此计算出 CO₂ 的环境影响成本为 35~156 元/t,取中间值为 80 元/t,这与 2005 年 IPCC 数据报道的 CO₂ 的影响成本 12 \$/t 相当。根据 CO₂、CH₄和 N₂O 的温室效应当量因子,分别计算出 CH₄和 N₂O 的环境影响成本,约为 2000 元/t 和 23840 元/t。

2)酸化影响主要来自 SO₂与 NO_x,据 2007 年国家统计数据,我国 SO₂ 的年均排放量为 1980 万 t,其引起的经济损失超过 1100 亿元,估算出 SO₂ 的经济损失约为 6000 元/t^[27,28],该值等于我国发电行业 SO₂ 环境价值标准。根据 NO_x与 SO₂ 的酸化当量因子,计算出 NO_x 的酸化影响成本为 4200 元/t。

3)CO、HC 和 NO_x 是引起光化学污染的主要物质,但其引起的经济损失在我国尚缺少统计资料,据研究,CO 与 CO₂ 间的环境影响比率关系为 20~40^[29,30],可估算 CO 的环境影响成本约为 2400 元/t。再根据 HC、NO_x 和 CO 的光化学污染当量系数,计算出 HC 的光化学污染环境成本为 31800 元/t,

NO_x 光化学污染环境成本为 2600 元/t。

4)通过比较烟尘 PM₁₀ 与光化学污染 CO 的环境影响,二者的环境影响成本比率在 4.5~6.0 之间^[29,30],由此计算出 PM₁₀ 环境成本约 12000 元/t。

5)本文水体的富营养化主要来自 N、COD 和 NH₃-N 的排放,N 与酸化 SO₂ 的环境影响成本比率为 0.2~0.8^[25],计算取中间值 3000 元/t,COD 和 NH₃-N 参照三者的当量因子计算,分别为 160 元/t 和 2500 元/t。

6)《中国绿色国民经济核算研究报告 2004》显示,2004 年我国新增工业固体废弃物 1762 万 t,占地 617.7 万 m²,由此丧失土地机会成本约为 0.91 亿元,估算出固体废弃物因占用土地而引起的经济损失为 5.2 元/t,按占地 20~100 a 估算,取中间值为 260 元/t。

7)基于农药流失渗漏引起生物多样性减少而引起作物减产导致的经济损失考虑,稻田农药施用量以平均 3 kg/t 稻谷计算,农药渗漏与流失量平均约为 18%,假设施用农药后,生物多样性减少造成的水稻减产产量约为 6%^[11],当稻秸价格为 2560 元/t 时,估算出农药生物毒性环境影响成本,约为 285000 元/t。

不同生物燃料全生命周期的货币化环境影响成本可表示为:

$$PE = \sum_{k=1}^R \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M W(i,j) \cdot PWR(j,k) \quad (2)$$

式中,PE——每吨生物燃料的环境影响成本;W(i,j)——i 过程中 j 污染物的排放量;PWR(j,k)——每吨 j 污染物第 k 种环境影响类型的环境影响成本。

不同液体燃料的热值差异明显,为便于比较,各液体燃料的环境影响计量功能单位统一为元/GJ,如表 6 所示。由表 6 可见,各液体燃料的生命周期环境影响成本,由低到高分别是二甲醚、精制油、乳化油、柴油和费托油。化石柴油的主要环境影响来自 CO₂、NO_x 和 HC,乳化油由于生物油的掺混生命周期环境影响成本略有降低,其环境影响主要还是来自化石柴油。精制油的生命周期环境影响成本相比柴油降低 7%,主要污染物的环境影响差别较大,其中 CO₂ 的环境影响为负,显著降低生命周期环境影响成本。而 NO_x、CH₄、PM₁₀、SO₂、农药和固废均较柴油相应污染物的环境影响高许多。二甲醚的环境影响成本显著低于柴油(约低 36%),CO₂ 排放

降低 82%, NO_x 和 HC 排放分别降低 45%和 68%,同时农药和 CH_4 的环境影响明显增加。费托油是稻秸制取 4 种液体燃料生命周期环境影响成本唯一高于化石柴油的,原因是稻秸制取费托油生命周期内的环境影响全部施加于产品费托油,未考虑副产品蜡的市场价值而进行环境影响分配;同理,若稻秸制取精制油考虑副产品焦炭的市场价值而进行环境影响分配,则精制油的生命周期环境影响成本将有所降低。

表 6 不同液体燃料的环境影响成本

Table 6 Environmental cost of five liquid fuels in the life cycle

污染物	环境影响成本/元·GJ ⁻¹				
	乳化油	精制油	二甲醚	费托油	柴油
CO_2	8.481	-3.940	1.664	-1.494	9.495
CH_4	0.170	2.706	1.419	2.648	0.064
N_2O	0.078	0.298	0.126	0.269	0.076
NO_x	4.703	6.107	2.452	5.131	4.443
SO_2	0.848	1.880	1.059	1.969	0.820
CO	0.717	0.702	0.634	1.129	0.790
HC	2.201	1.379	0.655	1.695	2.065
PM_{10}	0.284	1.569	0.796	2.964	0.247
TN	0.013	0.185	0.130	0.289	0.000
COD	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.001	0.006	0.001	0.003	0.001
农药	0.218	3.108	2.187	4.856	0.000
固废	0.144	2.788	0.413	0.844	0.042
合计	17.86	16.79	11.54	20.30	18.04

3.1 生命周期不同阶段的环境影响分析

由图 5 可见,柴油的环境影响主要在生产下游,占生命周期环境影响成本的 67.8%。与柴油相比,掺混了 20%生物油的乳化油环境影响主要在生产下游,但生产过程环境影响低于生产上游的环境影响,主要原因是乳化油转化过程中柴油的环境影响作为原料计入生产上游,因此生产上游环境影响明显增加。精制油的各阶段环境影响与柴油和乳化油具有明显差异,生产上游和生产过程环境影响明显增加,生产过程占生命周期环境影响成本的 33.3%,相比于化石柴油, CO_2 、 CH_4 、 NO_x 、 SO_2 、CO、 PM_{10} 和固废排放均较高;生产上游由于稻秸生长大量吸收 CO_2 ,大幅降低该阶段的环境影响,使该阶段的环境影响为负,精制油生命周期环境影响成本降低 30.9%。二甲醚和费托油生产过程的环境影响均

较大,分别占生命周期环境影响的 42.5%和 49.3%,相比于柴油和乳化油,稻秸制取精制油、二甲醚和费托油的生产过程环境影响比重更大,因此应注重生产转化技术研究,减少生产过程中污染物的排放。

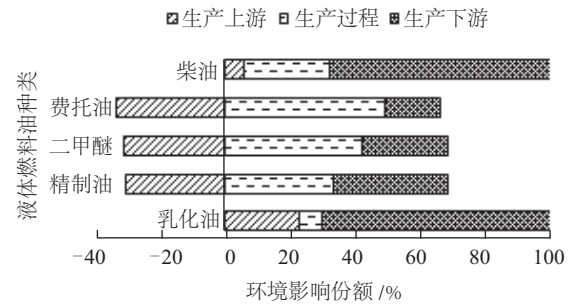


图 5 液体燃料不同转化阶段的环境影响份额

Fig. 5 Contributions of environmental impact in different stages

3.2 环境影响类型的比较分析

由图 6 和图 7 可见,柴油的温室效应显著,主要由 CO_2 排放引起,乳化油掺混 75%的柴油,温室效应同样明显,但由于生物油的掺入, CO_2 排放降低,温室效应与柴油相比有所下降。稻秸生长大量吸收固定 CO_2 ,显著降低温室效应,因此费托油和二甲醚温室效应较柴油明显降低,甚至出现精制油温室效应为负,这是因为生产转化过程中大量焦炭的生成使部分碳以固体形式固定。稻秸制取液体燃料酸化影响比较明显,乳化油由于生物油掺混比重小,酸化比柴油略高约 5%,精制油比柴油高约 58.6%,主要原因是精制油生产过程原料消耗大、能源转化率低,导致热解提质过程中 NO_x 和 SO_2 排放较大,分别是柴油生产的 2.78 倍和 4.23 倍,其中, NO_x 主要来自热解原油的提质过程,即甲醇和电力生产的间接排放; SO_2 来自:生物质热解过程中补燃生物质的燃烧直接排放,甲醇和电力生产的间接排放,分别占生产过程的 47%、21%和 32%。由于原料消耗量大,生产上游 NO_x 和 SO_2 排放亦高于柴油;单位热值的精制油消费 NO_x 的排放略高于柴油;因此虽然柴油含硫量高,导致其在消费阶段 SO_2 排放较高,但考虑全生命周期内的环境影响,精制油的酸化明显高于柴油。费托油同样因为生产阶段 NO_x 和 SO_2 排放高和生产上游 NO_x 和 SO_2 排放略高导致酸化影响较高。二甲醚的酸化影响明显降低,约为柴油的 72%,原因是二甲醚生产过程和消费阶段

NO_x均比柴油低且消费阶段无SO₂排放,而柴油因为含硫量高,消费阶段SO₂排放较高。因此,精制油和费托油生产过程应考虑分别在烟气出口和弛放气出口加装脱硫脱硝装置。与柴油相比,光化学污染,乳化油增加约4%,精制油减少3%,二甲醚的NO_x和HC的排放较低,其减少51%,费托油增加5%。烟尘主要在生产过程中产生,乳化油、精制油、二甲醚和费托油比柴油分别高约15%、535%、222%、1100%。生物毒性,柴油明显具有优势,稻秸生长阶段的农药施用会引起生物多样性的减少,各液体燃料生物毒性的不同由稻秸耗量不同引起,稻秸耗量越大,导致生物毒性越高。固体废弃物、精制油明显高于其他液体燃料,主要原因是其生产过程产生大量焦炭,也正因为大量碳被固定,所以其温室效应为负。

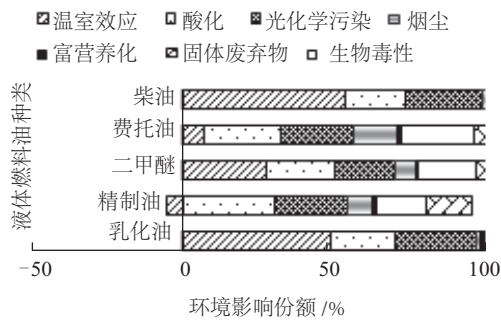


图6 液体燃料的不同环境影响类型份额

Fig. 6 Contributions of different environmental impact categories

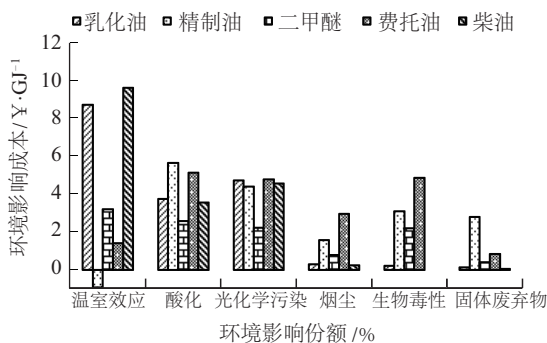


图7 不同液体燃料的主要环境影响成本比较

Fig. 7 Main environmental impacts cost comparison of different liquid fuels

4 结论

本文对稻秸通过4种不同工艺途径制取液体燃料进行了环境影响综合评价,生命周期环境影响成本由低到高分别为二甲醚、精制油、乳化油、柴油和

费托油。对比化石柴油(乳化油除外),生物燃料的生产上游环境性能较好,液体燃料的消费排放亦比柴油有所改善。生产过程环境影响较大,尤其是精制油、二甲醚和费托油,应注重研究生产转化技术,实现减排。温室效应、酸化和光化学污染是生物质转化为液体燃料的主要环境影响类型。与化石柴油相比,生物质制取液体燃料的温室效应降低9.4%~121.1%,二甲醚酸化和光化学污染分别降低27.8%~34.7%和15.6%~53.8%,但是其他3种生物燃料酸化增加5%~61.2%,光化学污染差异较小。

[参考文献]

- [1] Wang M Q. GREET1.5-transportation fuel-cycle model [R]. Illinois: Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, 1999.
- [2] Sheehan John, Camobreco Vince, Duffield James, et al. Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus [R]. United States: National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- [3] Jungbluth Niels, Büssey Sybille, Frischknecht Rolf, et al. Life cycle assessment of biomass-to-liquid fuels [R]. Uster: ESU-Services Ltd., 2008.
- [4] Talens P L, Lombardi L, Villalba M G, et al. Life cycle assessment (LCA) and exergetic life cycle assessment (ELCA) of the production of biodiesel from used cooking oil (UCO) [J]. Energy, 2010, 35(2): 889—893.
- [5] Varanda M G, Pinto G, Martins F. Life cycle analysis of biodiesel production [J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92(5): 1087—1094.
- [6] 董进宁, 马晓茜. 生物柴油项目的生命周期评价[J]. 现代化工, 2007, 27(9): 59—63.
- [6] Dong Jinning, Ma Xiaoqian. Life cycle assessment on biodiesel production [J]. Modern Chemical Industry, 2007, 27(9): 59—63.
- [7] 胡志远, 谭丕强, 楼狄明, 等. 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, 22(11): 141—146.
- [7] Hu Zhiyuan, Tan Piqiang, Lou Diming, et al. Assessment of life cycle energy consumption and emission for several kinds of feedstock based biodiesel [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 141—146.
- [8] 赵坤. 基于多组分的生物质快速热解实验及模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
- [8] Zhao Kun. Experimental and simulation study of bio-

- mass rapid pyrolysis based on multi- components [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [9] 江宏玲. 生物质制取高品位液体燃料的技术经济分析研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [9] Jiang Hongling. Technical and economic study on high-grade liquid fuels from biomass [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [10] 刘晓雨, 李志鹏, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区稻田净温室效应和温室气体排放强度的变化[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1783—1790.
- [10] Liu Xiaoyu, Li Zhipeng, Pan Genxing, et al. Greenhouse gas emission and C intensity for a long-term fertilization rice paddy in Tai Lake Region China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1783—1790.
- [11] 向平安, 黄 璜, 燕惠民, 等. 湖南洞庭湖区水稻生产的环境成本评估[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2187—2193.
- [11] Xiang Ping'an, Huang Huang, Yan Huimin, et al. Environmental cost of rice production in Dongting Lake area of Hunan Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11): 2187—2193.
- [12] 唐 浩. 水稻田农药、氮素流失特性及其控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [12] Tang Hao. Study on the rule of loss of pesticides & N in rice fields and the controlling technology of agricultural non-point source pollution [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2003.
- [13] 张卫峰. 中国化肥供需关系及调控战略研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [13] Zhang Weifeng. Study of fertilizer supply and demand relationship and its control strategy in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007.
- [14] 胡志远. 车用生物柴油生命周期评价及多目标优化[R]. 上海: 同济大学, 2006.
- [14] Hu Zhiyuan. Life cycle assessment and multi-objective optimization of biodiesel [R]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [15] GB 17691—2005, 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)[S].
- [15] GB 17691—2005, Exhaust emission limits and measurement methods of automotive compression ignition, gas fuels spark ignition engines, and car (China Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ stage)[S].
- [16] 蔡 皓, 谢绍东. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 319—326.
- [16] Cai Hao, Xie Shaodong. Determination of emission factors from motor vehicles under different emission standards in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Peknensis, 2010, 46(3): 319—326.
- [17] 袁晓华, 李 援, 韩建华, 等. 《石油炼制工业污染物排放标准》编制说明[R]. 北京: 中国石油化工集团公司, 2010.
- [17] Yuan Xiaohua, Li Yuan, Han Jianhua, et al. Petroleum refining industrial pollutants emission standards [R]. Beijing: China Petrochemical Corporation, 2010.
- [18] 吴东雷, 王凤平, 傅柳松. 安吉奇河印染助剂有限公司年产4000吨非离子表面活性剂生产线建设项目环境影响报告书[R]. 浙江: 浙江大学环境影响评价研究室, 2008.
- [18] Wu Donglei, Wang Fengping, Fu Liusong. Annual capacity of 4000 metric tons of nonionic surfactant production line construction project environmental impact report of Angie river printing and dyeing auxiliaries corporation [R]. Zhejiang: Institute of Environment Impact Assessment, Zhejiang University, 2008.
- [19] Xiao Jun, Shen Laihong, Zhang Yanan, et al. Integrated analysis of energy, economic, and environmental performance of biomethanol from rice straw in China [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(22): 9999—10007.
- [20] 邢爱华, 马 捷, 张英皓, 等. 生物柴油环境影响的全生命周期评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(6): 917—922.
- [20] Xing Aihua, Ma Jie, Zhang Yinghao, et al. Life cycle assessment of biodiesel environmental effects [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(6): 917—922.
- [21] 葛蕴珊, 陆小明, 吴思进, 等. 车用增压柴油机燃用不同掺混比生物柴油的试验研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(3): 278—280.
- [21] Ge Yunshan, Lu Xiaoming, Wu Sijin, et al. An experimental study on turbocharged diesel engines with different blends of biodiesel [J]. Automotive Engineering, 2005, 27(3): 278—280.
- [22] 葛蕴珊, 信建民, 吴思进, 等. 增压柴油机燃用生物柴油的排放特性[J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10(2): 125—129.
- [22] Ge Yunshan, Xin Jianmin, Wu Sijin, et al. Emission characteristic of turbo-charge diesel engine with bio-die-

- sel fuel[J]. Journal of Combustion science and Technology, 2004, 10(2): 125—129.
- [23] 汪 映. 二甲醚中巴客车生命周期分析研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 4—8.
- [23] Wang Ying. Life cycle analysis of dimethyl ether fuel for middle grade city bus [J]. Journal of Xin'an Jiaotong University, 2010, 44(1): 4—8.
- [24] 武 涛, 黄 震, 张武高, 等. 增压直喷柴油机燃用GTL的燃烧与排放特性[A]. 中国内燃机学会2006年学术年会暨燃烧、测试分会联合学术年会[C], 天津, 2006, 291—295.
- [24] Wu Tao, Huang Zhen, Zhang Wugao, et al. Pressurized combustion and emission characteristics of a direct injection diesel engine burning GTL[A]. 2006 Academic Annual Meeting and Combustion, Test Branch of the Joint Conference of Chinese Society for Internal Combustion Engine[C], Tianjin, 2006, 291—295.
- [25] CML 2010 [EB/OL]. <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/index.html>.
- [26] Fankhauser Samuel, Tol Richard S J. Climate change costs recent advancements in the economic assessment [J]. Energy Policy, 1996, 24(7): 665—673.
- [27] 胡予红, 孙 欣, 张文波, 等. 煤炭对环境的影响研究[J]. 中国能源, 2004, 26(1): 32—35.
- [27] Hu Yuhong, Sun Xin, Zhang Wenbo, et al. Study on the influence of coal on environment [J]. Energy of China, 2004, 26(1): 32—35.
- [28] 黄盛初. 中国煤炭开发与利用的环境影响研究[R]. 北京: 煤炭信息研究院洁净能源与环境中心, 2003.
- [28] Huang Shengchu. Environmental impact study of coal development and utilization in China[R]. Beijing: Center of clean energy and environment, China Coal Information Institute, 2003.
- [29] Roth Ian F, Ambs Lawrence L. Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing [J]. Energy, 2004, 29 (12—15): 2125—2144.
- [30] Vogtländer J G, Brezet H C, Hendriks ChF. The Virtual Eco-costs '99, a single LCA-based indicator for sustainability and the Eco-costs / Value Ratio (EVR) model for economic allocation [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2001, 6(3): 157—166.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF HIGH-QUALITY LIQUID FUELS FROM BIOMASS

Qu Tingting, Xiao Jun, Shen Laihong

(Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The method of LCA (Life Cycle Assessment) was applied to evaluate the impact of pollutant emissions in the full life cycles of biomass emulsified diesel (BED20), biomass hydrogenated diesel (BHD), biomass dimethyl ether (DME), and biomass Fischer-Tropsch liquid (FTL). The pollutants (i.e., CO₂, NO_x, SO₂, etc.) in life cycle were classified into seven categories on the basis of environmental impacts, and the magnitude of each pollutant was monetized. The results showed that the environmental costs of DME, BHD, BED20, fossil diesel and FTL are 11.54 ¥/GJ, 16.79 ¥/GJ, 17.86 ¥/GJ, 18.04 ¥/GJ, 20.30 ¥/GJ, respectively by ascending order. The upstream environmental performance of bio-flues, except for BED20, is significant better than that of fossil diesel; the consumption environmental performance of bio-flues is also better than that of fossil diesel; and the production process make a greater contribution to the life cycle environmental impact of bio-flues. Compared with fossil diesel, the greenhouse effect of biofuel is reduced by 9.4%-121.1%; acidification and photochemical smog of DME are reduced by 27.8%-34.7% and 15.6%-53.8%, respectively; but other three bio-fuels acidification increases by 5%-61.2%.

Keywords: life cycle assessment; biomass; fast pyrolysis and upgrading; liquid fuel