

基于开放式培养的微藻生物柴油生命周期环境影响评价

侯 坚^{1,2}, 张培栋^{1*}, 袁宪正^{1,2}, 郑永红¹

(1. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 青岛 266101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 为定量评价以微藻为原料生产的生物柴油生命周期系统产生的各种潜在环境影响, 以基于开放式培养的微藻生物柴油为研究对象, 应用生命周期分析方法, 以 1 MJ 能量的柴油产品为功能单位, 对生产、使用微藻生物柴油产生的环境影响进行了分析。结果表明: 微藻生物柴油生命周期最显著的环境影响类型为不可更新资源消耗, 其次为光化学烟雾形成, 生命周期总环境影响指数为 4.63×10^{-4} 人当量, 较石化柴油降低 19.34%, 以油菜籽为原料的生物柴油生命周期总环境影响指数是微藻生物柴油的 7.19 倍, 微藻培养与生物柴油制取对生命周期总环境影响指数的贡献分别为 27.95% 与 46.24%。基于开放式培养的微藻生物柴油相对于石化柴油与以油菜籽为原料的生物柴油具有较好的生命周期环境效益, 控制微藻生物柴油生命周期环境影响的要点在于减少微藻培养与生物柴油制取阶段的动力消耗。

关键词: 生物柴油, 生命周期, 环境影响评价, 开放式培养, 微藻

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.07.044

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-07-0251-07

侯 坚, 张培栋, 袁宪正, 等. 基于开放式培养的微藻生物柴油生命周期环境影响评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 251-257.

Hou Jian, Zhang Peidong, Yuan Xianzheng, et al. Life cycle environmental impact assessment of biodiesel from microalgae in open ponds[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 251-257. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

化石能源的日趋耗竭、石油需求的持续增长与环境污染问题的日益突出使开发利用生物质液体燃料成为国际上备受关注的热点^[1-2]。以传统糖类、淀粉类或油脂类等农作物为原料生产生物质液体燃料对于解决交通燃料短缺、促进农业发展、增加农民收入具有积极作用。但随着生物燃料生产与粮食供应对耕地的竞争不断加剧, 原料价格与生产成本较高导致基于粮食作物的生物质液体燃料可持续发展面临极大挑战^[3]。近年来, 利用微藻生产生物柴油引起人们的极大关注^[4-5]。微藻是一类在水体中广泛分布的光合自养微型植物, 相对于普通陆生植物的光能利用效率约为 0.5%, 微藻的光能利用效率为 3%~8%, 在特定培养条件下, 一些微藻种类可达到较高的油脂含量, 最高可达 80% 以上^[6-7]。

目前工业化规模的微藻生物柴油生产系统尚未建立, 但在微藻生物柴油生产的可行性研究方面取得了积极进展。Regan 等^[8]和 Benemann 等^[9]均对开放式大规模微藻培养系统进行了较为完善的设计, 并对其生产生物柴油的经济成本进行了分析。微藻生物柴油的可行性研

究除需对原料的光能利用效率、含油量以及生物柴油生产的经济成本等方面进行分析以外, 对生物柴油生产、使用过程产生的环境影响进行评价是微藻生物柴油实现可持续发展的重要前提。生命周期评价是通过对其某个产品、过程或活动整个生命周期能源、材料消耗及污染物排放进行鉴定及量化来评估其对环境带来影响的客观方法^[10-11]。Stephenson 等^[12]利用生命周期分析方法对分别基于开放式高效藻塘和封闭式光生物反应器培养的微藻生物柴油生命周期能耗与温室气体净排放量进行了分析, 这对于定量评价微藻生物柴油的节能和温室气体减排效益具有重要意义。但微藻培养过程中的营养物质挥发, 生物柴油生产废水中含有的各种化学物质, 以及物资和能源生产过程的各种输入、输出等, 还会导致水体富营养化、生态毒性等其他类型环境影响^[13]。对微藻生物柴油生命周期系统产生的各种潜在环境影响进行评价可为微藻生物柴油的可持续性与环境友好性的评估提供更为科学、全面的参考依据。本文结合 Regan 和 Benemann 等设计的开放式微藻培养系统, 依照 ISO 14 040 框架^[10], 对微藻生物柴油生命周期产生的不可再生资源消耗、生态环境破坏和人体健康等环境影响进行了评价, 在综合各种类型环境影响评价结果的基础上, 为评判与决策微藻生物柴油作为能源替代领域的重要方向提供参考依据。

1 评价方法

1.1 研究目标与范围

1.1.1 研究目的

本文的研究目的在于对微藻作为原料生产的生物柴油生命周期各种环境输入与输出进行分析, 对其生命周

收稿日期: 2010-10-09 修订日期: 2011-07-08

基金项目: 国家环境保护部公益性行业科研专项经费项目 (2008467087); 国家自然科学基金 (40901063)

作者简介: 侯 坚 (1985-), 女, 湖南永州人, 博士研究生, 研究方向为可再生能源生命周期评价。青岛 中科院青岛生物能源与过程研究所, 266101。Email: houjian@qibebt.ac.cn

*通信作者: 张培栋 (1977-), 男, 甘肃华池人, 博士, 副研究员, 主要从事能源技术评价研究。青岛 中科院青岛生物能源与过程研究所, 266101。Email: eeesc@163.com 农业工程学会会员 (E041200444S)。

期产生的各种潜在环境影响进行评价。通过以石化柴油、菜籽油生产的生物柴油为参照，对微藻生物柴油相对于石化柴油、油菜籽作为原料的生物柴油生命周期环境影响大小进行评价。

1.1.2 微藻生物柴油生命周期系统

微藻生物柴油生命周期包括微藻培养、油脂提取、油脂预处理、生物柴油制取、车辆使用 5 个阶段。微藻在开放式藻塘中生长，供给微藻生长所需的水源、碳源、氮源与磷源。在微藻生物量与油脂含量达到一定水平时，将微藻分离、干燥。从收获的微藻中提取油脂，得到副产品藻渣。初步提取得到的油脂中仍含有一定的杂质，对粗油脂进行脱酸、脱胶处理。精炼后的油脂与过量甲醇在催化剂、加热、加压等条件下进行酯交换反应制取生物柴油。将反应剩余的甲醇回收，将粗甲酯水洗、分馏和干燥得到生物柴油成品和副产品甘油。生物柴油在车用发动机上燃烧使用。

1.1.3 系统边界

微藻生物柴油生命周期系统边界如图 1 所示。

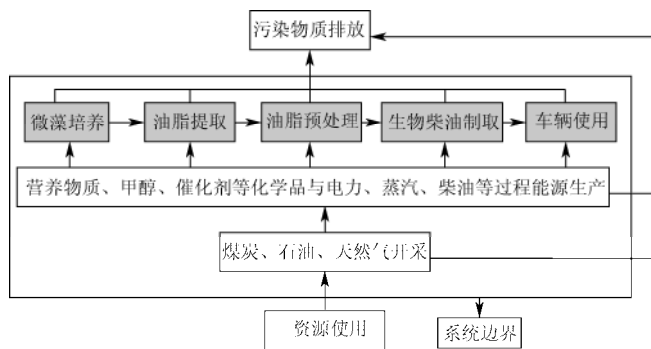


图 1 微藻生物柴油生命周期系统边界

Fig.1 Life cycle system boundary of microalgae biodiesel

表 1 微藻培养阶段的营养物质、电力、柴油消耗、NH₃ 排放与微藻产出

Table 1 Nutrients, power, diesel consumption, NH₃ emissions and yield of microalgae cultivation

消耗/产出项目	N/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	电/ (kWh·hm ⁻² ·a ⁻¹)	柴油/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	微藻产量/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	微藻油脂 含量/%	NH ₃ 排放/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)
数量	609	141	21 890	11	109 600	40	2.958

注：相关数据来自文献[8-9]。

表 2 植物油脂提取、预处理阶段的物质、动力消耗

Table 2 Materials and power consumption of vegetable oil extraction and pretreatment

消耗/产出项目	植物油脂提取					植物油脂预处理				
	微藻/t	电/kWh	蒸汽/kg	粗油脂/t	藻渣产出/t	电/kWh	蒸汽/kg	碱液/kg	磷酸/kg	油脂产出/t
数量	2.5	62.5	250	1.02	1.48	22	190	10	1.4	1

注：相关数据来自文献[15]。

生物柴油制取采用碱催化工艺，生物柴油制取阶段的油脂、甲醇、催化剂与动力消耗与环境排放来自文献[16]，如表 3 所示。

生物柴油在车用发动机上的燃烧排放来自文献[17]。

2) 微藻生物柴油生命周期背景数据

蒸汽生产过程的资源消耗与环境排放数据来自 Gabi

微藻生物柴油生命周期产生的潜在环境影响来源于：生命周期各阶段物资与能源使用引起的直接资源消耗与环境污染排放；生命周期消耗物资与能源生产导致的间接资源消耗与环境污染排放。

1.1.4 功能单位

为将微藻生物柴油与其他柴油产品进行生命周期评价比较，根据生物柴油与石化柴油均具有相似的燃烧特性，本研究选取具有 1 MJ 能量的柴油产品为功能单位。

1.2 清单分析

1.2.1 基础数据的收集与计算方法

根据所确定的微藻生物柴油产品系统边界，将基础数据分为 2 部分进行收集：1) 生命周期各阶段初始物资、能源输入与产品、副产品以及环境污染输出；2) 物资与能源生产过程的资源消耗与环境污染排放，即背景数据。为将微藻生物柴油与石化柴油、油菜籽作为原料的生物柴油生命周期环境影响进行比较，对石化柴油与以油菜籽为原料的生物柴油生命周期系统输入与输出数据进行了收集。采用 PE international 公司开发生命周期评价软件 Gabi4.3^[14]，对基础数据进行计算。

1) 微藻生物柴油生命周期直接消耗与环境污染排放

微藻生长所需 CO₂ 来自发电厂的烟道气。为减少运输过程中的蒸发损失，微藻培养用水取自临近海域。为防止 N、P 化合物流失对环境造成污染，对微藻收获后的培养液进行回流，微藻培养阶段的 N 元素挥发系数为 0.004，微藻生长所需营养物质、水和 CO₂ 运输、微藻收获等过程的柴油、电力消耗来自文献[8-9]，如表 1 所示。微藻产量与含油量按照微藻平均生长速率与含油量进行计算。

植物油脂提取与预处理阶段的动力与化学物质消耗来自文献[15]，如表 2 所示。

数据库中已有的中国蒸汽生产输入与输出清单。电力、柴油生产相关数据分别来自文献[18-19]。营养物质、甲醇、氢氧化钠等各种化学品生产均采用国际平均水平技术，各种化学品生产的相关数据来自 Gabi 数据库中已有的利用国际平均水平技术的化工产品生产输入与输出清单。

表 3 生物柴油制取阶段基础输入与输出

Table 3 Inputs and outputs in the stage of biodiesel production

输入与输出项目		数量	
产品产出	生物柴油/kg	1 000	
	甘油/kg	106	
	原料、催化剂与动力消耗	油脂/kg	991
		甲醇/kg	112
		NaOH/kg	10.4
		盐酸/kg	37.9
		电/kWh	8.6
蒸汽/kg	1 820		
环境排放	甲醇（排放到水体）/kg	2.9	
	NaCl（排放到水体）/kg	15.2	
	盐酸（排放到水体）/kg	2.65	

注：相关数据来自文献[16]。

3) 石化柴油与以油菜籽为原料的生物柴油生命周期基础输入与输出数据

石化柴油生产过程的资源消耗与污染物排放来自文献[19]，石化柴油在车用发动机上燃烧排放清单从 Gabi 数据库中获取。油菜种植所需农资与动力来自文献[20]，肥料与农药使用导致的 NH_3 、 NO_3^{-1} 、 N_2O 、 NO_x 、 PO_4^{-3} 与毒性物质排放来自文献[21]。菜籽油提取、预处理以及与甲醇进行酯交换反应制取生物柴油采用的技术工艺与微藻相同。

1.2.2 分配

当产品生命周期系统输出多种产品时，需将系统输入与输出在共生产品间进行分配^[10]。生物柴油属能源产品，微藻生物柴油生产过程中产出的藻渣以及粗甘油等副产物均可作为能源用途（燃烧发热、发电等），本研

究采用能值分配方法对生物柴油生命周期系统输入与输出在生物柴油与副产品间进行分配。各种产品与副产品的净热值来自文献[22-24]，如表 4 所示。

表 4 生物柴油产品系统各种产品与副产品的净热值

Table 4 Net calorific values of products output in the biodiesel products system

产品/副产品	植物油	生物柴油	藻渣	甘油
热值/ ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	37	39.5	10.83	25.6

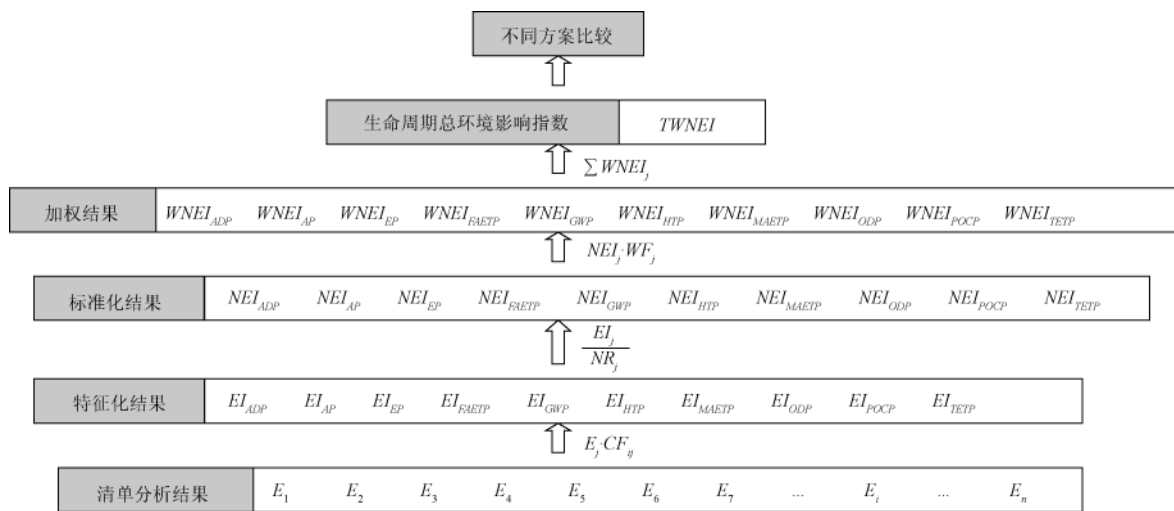
注：相关数据来自文献[22-24]。

1.3 环境影响评价方法

生命周期环境影响评价的目的在于，通过建立一系列影响类型参数对产品系统潜在环境影响的大小和相对重要性进行分析和评价，从而为决策者提供环境数据或信息支持，是整个生命周期评价研究的关键阶段^[11]。

产品生命周期总环境影响指数是指对产品生命周期各环境影响类型指数进行标准化、加权、合并等处理步骤，得到的总的产品生命周期环境影响分数^[25-26]。产品生命周期总环境影响指数使产品生命周期各种类型环境影响评价结果可用一个全面的单一结论进行说明，为决策者从不同产品生产方案选择提供较为简单、明确的参考依据。

本文基于 ISO 14040 标准，建立的生物柴油生命周期环境影响评价模型如图 2 所示。将生物柴油生命周期清单分析结果进行分类、计算得到各环境影响类型指数。对环境影响类型指数进行标准化与加权处理，使不同环境影响类型结果大小可进行比较。将所有环境影响类型指数的加权结果合并，得到总环境影响指数，从而可用于不同产品方案比较。



注： E_i 为生物柴油生命周期系统第 i 种环境输入或输出； CF_{ij} 为第 i 种环境输入或输出对第 j 种环境影响类型的当量系数（特征化因子）； EI_j 为第 j 种环境影响类型指数； NR_j 为第 j 种环境影响类型的标准化基准； NEI_j 为第 j 种环境影响类型指数的标准化结果； WF_j 为第 j 种环境影响类型的权重因子； $WNEI_j$ 为第 j 种环境影响类型指数的加权结果； $TWNEI$ 为生命周期总环境影响指数； ADP 为不可再生资源消耗； AP 为酸化； EP 为水体富营养化； $FAETP$ 为淡水生态毒性； GWP 为全球变暖； HTP 为人体毒性； $MAETP$ 为海洋生态毒性； ODP 为臭氧层消耗； $POCP$ 为光化学烟雾形成； $TETP$ 为陆生生态毒性。

图 2 生物柴油生命周期环境影响评价模型

Fig.2 Life cycle impact assessment model for biodiesel

1.3.1 特征化因子

采用 CML 2001^[27]中的特征化因子对微藻生物柴油

生命周期系统输入和输出进行分类，对不可再生资源消耗、人体健康以及生态环境破坏 3 个方面的环境影响类

型指数进行计算。

1.3.2 标准化基准

标准化是在特征化的基础上,以一定的标准化基准对环境影响类型指数进行处理,使所有环境影响类型指数的标准化结果具有同一单位,便于将不同类型环境影响大小进行比较^[28]。为将各种类型环境影响在同一水平上进行比较,本研究以全球人均每年造成的环境影响作为标准化基准,标准化结果表示单位数量环境污染影响的人数(即采用人当量表示环境影响大小)^[29-30]。各环境影响类型的标准化基准来自文献^[31]。

1.3.3 加权方法

加权是在考虑社会、政治以及道德等价值因素影响的基础上,对不同环境影响类型的严重性进行排序,赋予环境影响类型权重因子的过程^[28]。环境影响类型指数经标准化、加权处理后可对不同环境影响类型大小进行比较^[28]。本研究采用环境税表征权重因子的方法,以环境税值表示各种环境影响类型的权重因子,可以直接、

有效地反映政府、公众对于不同环境影响类型的权重信息^[32-33]。各种环境影响类型的权重因子来自文献^[33]。

2 结果与分析

2.1 不同环境影响类型对微藻生物柴油生命周期总环境影响指数的贡献

微藻生物柴油生命周期各环境影响类型指数与其标准化、加权处理结果,以及不同环境影响类型分别对生命周期总环境影响指数的贡献见表5。

微藻生物柴油生命周期总环境影响指数为 4.63×10^4 人当量。微藻生物柴油生命周期最为显著的环境影响类型为不可更新资源消耗,其次为光化学烟雾形成,分别为 2.2456×10^4 与 1.0985×10^4 人当量。不可再生资源消耗与光化学烟雾形成对生命周期总环境影响的贡献分别为 48.50%、23.73%,海水生态毒性、淡水生态毒性、酸化、富营养化对生命周期总环境影响的贡献均不足 10%,全球变暖、臭氧耗竭、人体毒性与陆生生态毒性对生命周期总环境影响的贡献均不足 1%。

表5 微藻生物柴油生命周期环境影响类型指数及其标准化与加权处理结果

Table 5 Life cycle impact category indicators and normalization and weighting results of microalgae biodiesel

环境影响类型	环境影响指数/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	标准化基准(用人均环境影 响潜力表示) / ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	标准化结果 (用人当量表示)	权重因子	加权结果(用人当 量表示)	百分比/%
不可更新资源消耗(用Sb当量表示)	2.877×10^4	28.07	1.0249×10^5	21.91	2.2456×10^4	48.50
全球变暖(用CO ₂ 当量表示)	4.157×10^2	7 192.98	5.7792×10^6	0.09	5.2013×10^7	0.11
酸化(用SO ₂ 当量表示)	6.8241×10^4	56.14	1.2156×10^5	2.52	3.0633×10^5	6.62
富营养化(用PO ₄ ³⁻ 当量表示)	4.79×10^5	10.7	4.4766×10^6	4	1.7906×10^5	3.87
臭氧耗竭(用SO ₂ 当量表示)	1.107×10^{10}	0.091	1.2165×10^9	168	2.0437×10^7	0.04
光化学烟雾形成(用C ₂ H ₄ 当量表示)	4.6716×10^5	16.84	2.7741×10^6	39.6	1.0985×10^4	23.73
淡水水体毒性(用1,4-DCB当量表示)	9.1452×10^4	350.88	2.6064×10^6	13.89	3.6203×10^5	7.82
海水水体毒性(用1,4-DCB当量表示)	83.732	89 473.68	9.3583×10^4	0.045	4.2112×10^5	9.10
陆生生态毒性(用1,4-DCB当量表示)	9.6405×10^5	4 736.84	2.0352×10^8	24.74	5.0351×10^7	0.11
人体健康(用1,4-DCB当量表示)	1.951×10^2	10 000	1.951×10^6	0.23	4.4873×10^7	0.10
总环境影响指数	—	—	—	—	4.63×10^4	100

2.2 微藻生物柴油生命周期环境影响成因分析

各生产、使用阶段分别对微藻生物柴油生命周期各环境影响类型指数以及总环境影响指数的贡献见表6。

生物柴油制取与微藻培养是微藻生物柴油生命周期产生环境影响的主要阶段。生物柴油制取阶段对不可更新资源消耗与光化学烟雾形成潜在影响的贡献分别为

46.14%、42.07%,对生命周期总环境影响指数的贡献为46.24%。微藻培养阶段对不可更新资源消耗与光化学烟雾形成潜在影响的贡献分别为37.01%、14.37%,对生命周期总环境影响指数的贡献为27.95%。植物油脂提取、预处理与生物柴油燃烧对微藻生物柴油生命周期总环境影响指数的贡献分别为11.42%、4.47%、9.92%。

表6 不同阶段对微藻生物柴油生命周期环境影响的贡献

Table 6 Contributions of different factors in different stages to life cycle environmental impacts of microalgae biodiesel

环境影响类型	阶段					%
	微藻培养	植物油脂提取	植物油脂预处理	生物柴油制取	生物柴油燃烧	
不可更新资源消耗	37.01	12.12	4.74	46.14	0.00	
全球变暖	29.14	15.87	6.14	46.07	2.78	
酸化	20.42	12.24	4.60	47.32	15.41	
富营养化	20.39	6.85	2.57	29.28	40.91	
臭氧耗竭	0.24	1.03	4.36	94.38	0.00	
光化学烟雾形成	14.37	9.42	3.54	42.07	30.60	
淡水水体毒性	25.32	3.74	1.61	69.24	0.09	
海水水体毒性	29.25	17.32	6.57	46.86	0.00	
陆生生态毒性	17.22	19.44	7.11	56.13	0.10	
人体健康	22.69	15.34	5.74	55.30	0.93	
总环境影响指数	27.95	11.42	4.47	46.24	9.92	

各种物资、能源生产和使用分别对微藻生物柴油生命周期各环境影响类型指数以及总环境影响指数的贡献见表 7。

蒸汽与电力生产引起的资源消耗与环境污染排放对微藻生物柴油生命周期环境影响的贡献较为显著。蒸汽生产对微藻生物柴油生命周期不可更新资源消耗与光化学烟雾形成潜在影响的贡献分别为 38.51%、34.94%，对生命周期总环境影响指数的贡献为 37.31%。电力生产对微藻生物柴油生命周期不可更新资源消耗与光化学烟

雾形成潜在影响的贡献分别为 42.42%、16.32%，对总环境影响指数的贡献为 31.17%。

中国电力、蒸汽生产过程中的能源利用效率分别为 33%、80%。中国能源结构中，煤炭所占比例在 70% 左右。电力、蒸汽生产过程中煤炭燃烧排放的 CO、SO_x 在光照作用下发生化学反应生成光化学烟雾。消耗较多电力与蒸汽，导致微藻培养与生物柴油制取阶段的非可再生资源消耗与光化学烟雾形成潜在影响较大，对生命周期总环境影响的贡献较为显著。

表 7 微藻生物柴油生命周期环境影响成因贡献组成

Table 7 Contributions of different causes to the life cycle environmental impacts of microalgae biodiesel											%
技术因子		蒸汽	电力	柴油	氢氧化钠	盐酸	磷酸	营养物质	甲醇	生物柴油燃烧	
环境影响类型											
不可更新资源消耗		38.51	42.42	0.04	0.84	1.04	0.06	1.89	15.20	0.00	
全球变暖		56.14	33.48	0.05	1.12	1.16	0.06	1.38	3.83	2.78	
酸化		44.51	22.95	0.01	0.15	8.79	0.17	1.25	6.77	15.40	
富营养化		25.26	11.79	0.00	0.24	0.23	0.08	10.60	10.90	40.90	
臭氧耗竭		4.52	0.13	0.04	44.50	50.70	0.01	0.08	0.01	0.02	
光化学烟雾形成		34.94	16.32	0.00	0.18	0.20	0.14	0.73	16.89	30.60	
淡水水体毒性		7.45	20.54	0.00	0.05	0.08	0.95	7.37	63.47	0.09	
海水水体毒性		61.99	34.92	0.00	0.03	0.04	0.03	0.33	2.67	0.00	
陆生生态毒性		78.04	20.67	0.01	0.26	0.53	0.04	0.07	0.27	0.10	
人体健康		57.45	25.25	0.00	0.05	0.06	0.07	1.70	14.44	0.97	
总环境影响指数		37.31	31.17	0.02	0.49	1.18	0.16	2.19	17.50	9.98	

2.3 与石化柴油以及其他原料的生物柴油生命周期环境影响比较与分析

微藻生物柴油与石化柴油、油菜籽生产的生物柴油生命周期潜在环境影响评价结果比较见图 3。

微藻生物柴油生命周期不可更新资源消耗较石化柴油降低 51.5%，光化学烟雾形成潜在影响升高 89.66%，

生命周期总环境影响指数较石化柴油降低 19.34%。

以油菜籽为原料的生物柴油生命周期产生的各种类型环境影响均大于微藻生物柴油，其中淡水生态毒性、水体富营养化分别为微藻生物柴油的 40.61 倍与 76.54 倍。油菜籽生产的生物柴油生命周期总环境影响指数是微藻生物柴油的 7.19 倍。肥料与农药使用引起的 NH₃、

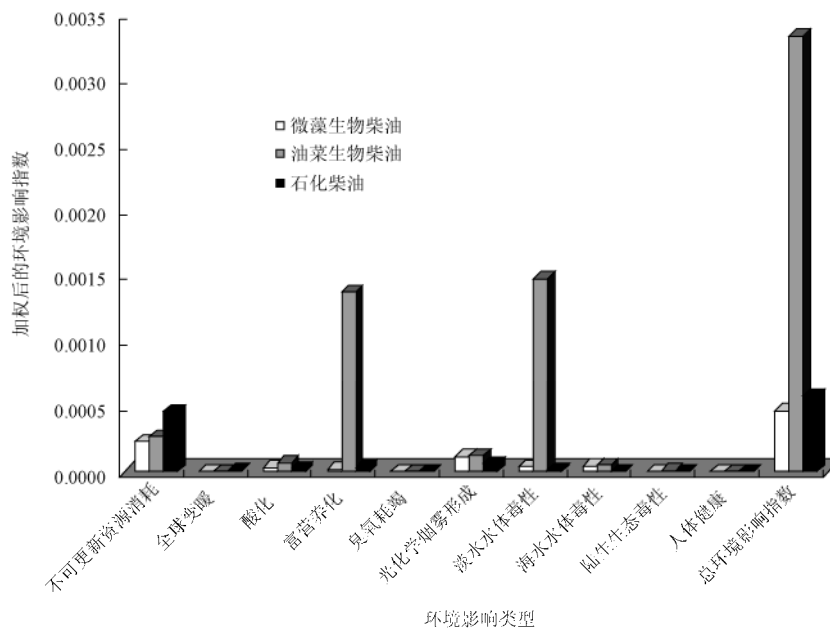


图 3 微藻生物柴油与石化柴油以及油菜为原料的生物柴油生命周期环境影响评价结果比较

Fig.3 Comparison of life cycle assessment results of microalgae biodiesel, fossil diesel and rape seed biodiesel

NO_3^- 、 N_2O 、 NO_x 、 PO_4^{3-} 与毒性物质排放是导致富营养化与生态毒性的重要因素。微藻培养不需消耗农药,以及对培养液进行回流控制N、P化合物排放,有效降低了微藻生物柴油生命周期富营养化与生态毒性潜在影响,使微藻生物柴油生命周期总环境影响指数显著低于以油菜为原料的生物柴油。

3 结 论

1) 基于开放式培养的微藻生物柴油生命周期较为显著的环境影响类型为不可再生资源消耗与光化学烟雾形成,对生命周期总环境影响指数的贡献分别为48.50%与23.73%。

2) 提高微藻培养、收获与生物柴油制取工艺技术,减少微藻培养与生物柴油制取阶段的电力、蒸汽等动力消耗是控制微藻生物柴油生命周期环境影响的关键,蒸汽、电力生产对微藻生物柴油生命周期总环境影响指数的贡献分别为37.31%、31.17%。

3) 综合各类型环境影响评价结果,基于开放式培养的微藻生物柴油生命周期环境影响低于石化柴油以及以油菜籽为原料的生物柴油,微藻生物柴油生命周期总环境影响指数较石化柴油降低19.34%,以油菜籽为原料的生物柴油生命周期总环境影响指数是微藻生物柴油的7.19倍。

利用微藻生产生物柴油仍处于研究阶段,本文结合理论设计的微藻生物柴油生产体系对其生命周期系统产生的潜在环境影响进行了评价,可为初步判断微藻生物柴油发展的可行性提供参考依据。随着微藻生产生物柴油技术逐步实现产业化,应进一步对实际生产、使用过程进行生命周期环境影响评价,分析产生环境影响的主要步骤和原因,提出相应的改进建议,促进微藻生物柴油的可持续发展。

致谢:感谢宁波海笑环保科技有限公司在数据计算过程中提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] Afgan N H, Gobaisi D A, Carvalho M G, et al. Sustainable energy development[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1998, 2(3): 235—286.
- [2] Demirbas M F, Balat M, Balat H. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development[J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(7): 1746—1760.
- [3] 张百良, 王吉庆, 徐桂转, 等. 中国生物能源利用的思考[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 226—231.
Zhang Bailiang, Wang Jiqing, Xu Guizhuan, et al. Thinking about bio-energy utilization in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(9): 226—231.
- [4] Hu Q, Sommerfeld M, Jarvis E, et al. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances[J]. *Plant Journal*, 2008, 54(4): 621—639.
- [5] 刘振强, 陆向红, 晏荣军, 等. 高密度高含油率微藻培养研究进展[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 210—217.
- [6] Liu Zhenqiang, Lu Xianghong, Yan Rongjun, et al. Advance on technology of high density and high lipid microalgae culture[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 210—217.
- [7] Huntley M E, Redalje D G. CO_2 mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12(4): 573—608.
- [8] Li Yanqun, Horsman M, Wu N, et al. Biofuels from microalgae[J]. *Biotechnology Progress*, 2008, 24(4): 815—820.
- [9] Regan D L, Gartside G. Liquid fuels from micro-algae in Australia[M]. South Melbourne: CSIRO, 1983.
- [10] Benemann J R, Oswald W J. Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO_2 to biomass[R]. Berkeley: Department of Civil Engineering, University of California, 1996.
- [11] ISO 14040, Environmental management-life cycle assessment- principles and framework[S].
- [12] ISO 14044, Environmental management -life cycle assessment - requirements and guidelines[S].
- [13] Stephenson A L, Kazamia E, Dennis J S, et al. Life-Cycle assessment of potential algal biodiesel production in the united kingdom: A comparison of raceways and air-lift tubular bioreactors[J]. *Energy and Fuels*, 2010, 24(7): 4062—4077.
- [14] Miller S A, Landis A E, Theis T L. Environmental trade-offs of biobased production[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(15): 5176—5182.
- [15] PE International. GaBi 4.3 Software[Z]. Leinfelden-Echterdingen, Germany: PE International, 2006.
- [16] 宋先锋, 余建新. 对油脂加工企业生产成本的分析与探讨[J]. *中国油脂*, 2003, 28(2): 62—64.
Song Xianfeng, Yu Jianxin. Study on cost of oil processing [J]. *China Oils and Fats*, 2003, 28(2): 62—64. (in Chinese with English abstract)
- [17] Harding K G, Dennis J S, von Blottnitz H, et al. A life-cycle comparison between inorganic and biological catalysis for the production of biodiesel. *Journal of Cleaner Production*, 2008, 16(13): 1368—1378.
- [18] United States Environmental Protection Agency (EPA). Annual certification test results and data [EB/OL]. <http://www.epa.gov/otaq/crttst.htm>, 2005-07-21.
- [19] 狄向华, 聂祚仁, 左铁镛. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(5): 632—635.
Di Xianghua, Nie Zuoren, Zuo Tiejong. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China [J]. *Chinese Environmental Sciences*, 2005, 25(5): 632—635. (in Chinese with English abstract)
- [20] 袁宝荣, 聂祚仁, 狄向华, 等. 中国化石能源生产的生命周期清单(II)——生命周期清单的编制结果[J]. *现代化工*, 2006, 26(4): 5—7.
Yuan Baorong, Nie Zuorong, Di Xianghua, et al. Life cycle inventories of fossil fuels in China (II): Final life cycle inventories[J]. *Modern Chemical Industry*, 2006, 26(4): 5—7. (in Chinese with English abstract)

- [20] Ou Xunmin, Zhang Xiliang, Chang Shiyan, et al. Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in (the) People's Republic of China[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(Supplement 1): 197–208.
- [21] Iriarte A, Rieradevall J, Gabarrell X. Life cycle assessment of sunflower and rapeseed as energy crops under Chilean conditions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(4): 336–345.
- [22] 刘圣, 孙东林, 万树文, 等. 一种生物柴油生产体系的能值分析及新能值指标的构建[J]. *南京大学学报*, 2007, 43(2): 111–118.
Liu Sheng, Sun Donglin, Wan Shuwen, et al. Energy evaluation of a kind of biodiesel production system and construction of new energy indices[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2007, 43(2): 111–118. (in Chinese with English abstract)
- [23] Whitaker M, Heath G. Life cycle assessment of the use of jatropha biodiesel in Indian locomotives[R]. Washington DC: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [24] 刘竞, 马晓茜. 微藻气化发电生命周期评价及碳循环分析[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(11): 1415–1418.
Liu Jing, Ma Xiaoqian. LCA and carbon recycle analysis on electricity production from microalgae by gasification[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2008, 29(11): 1415–1418. (in Chinese with English abstract)
- [25] Udo de Haes H A. Weighting in life cycle assessment: is there a coherent perspective?[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 3(2): 3–7.
- [26] Michela N, Michaela S, Andrea S, et al. Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide[M]. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2005.
- [27] Guinée J B, Gorée M. Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards (Data Spreadsheet Version 3.0) [R]. Leiden: Centre for Environmental Science-Leiden University (CML), 2007.
- [28] Pennington D W, Potting J, Finnveden G, et al. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice[J]. *Environment International*, 2004, 30(5): 721–739.
- [29] Yang Jianxin, Nielsen P H. Chinese life cycle impact assessments factors[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2001, 13(2): 205–209.
- [30] Jolliet O, Margni M, Charles R, et al. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8(6): 324–330.
- [31] Huijbregts M A J, Breedveld L, Huppes G, et al. Normalisation figures for environmental life-cycle assessment: The Netherlands (1997/1998), Western Europe (1995) and the world (1990 and 1995) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2003, 11(7): 737–748.
- [32] Finnveden G, Eldh P, Johansson J. Weighting in LCA based on ecotaxes - Development of a mid-point method and experiences from case studies[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006, 11(1): 81–88.
- [33] Finnveden G, Hauschild M Z, Ekvall T, et al. Recent developments in life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91(1): 1–21.

Life cycle environmental impact assessment of biodiesel from microalgae in open ponds

Hou Jian^{1,2}, Zhang Peidong^{1*}, Yuan Xianzheng^{1,2}, Zheng Yonghong¹

(1. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper assessed the potential environmental impacts generated in the life cycle of biodiesel which was made from microalgae cultivated in open ponds. The functional unit was 1 MJ diesel product. The results showed that the most prominent impact category in the life cycle of microalgae biodiesel was non-renewable resources depletion potential, and the second one was photochemical ozone creation potential. The total environmental impact indicator in the life cycle of microalgae biodiesel was 4.63×10^{-4} equivalent persons, decreased by 19.34% than that of fossil diesel, and the life cycle total environmental impact indicator of rapeseed biodiesel was 7.19 times of that of microalgae based biodiesel. The contributions of stages of microalgae cultivation and biodiesel conversion to the life cycle total environmental impact indicator of microalgae biodiesel were 28.23% and 46.61% respectively. Biodiesel made from microalgae cultivated in open ponds has better environmental performance than fossil diesel and biodiesel made from rapeseed. The essential measure to control the environmental impacts in the life cycle of microalgae biodiesel is to reduce the power consumption in the stages of microalgae cultivation and biodiesel conversion.

Key words: biodiesel, life cycle, environmental impact assessments, cultivation in open ponds, microalgae