

能源微藻培养及厌氧发酵产甲烷过程的生命周期评价

刘翠霞¹ 郭雪白² 郝元锋² 陈俊华¹ 胡智泉³

(1.中原工学院能源与环境学院,河南 郑州 450007;2.河南水利与环境职业学院,河南 郑州 450008;3.华中科技大学环境科学与工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:【目的】对微藻培养及厌氧发酵耦合过程进行生命周期评价,筛选最佳的能源微藻培养环境。【方法】估算从BG-11培养基、奶牛场废水和葡萄酒厂废水中分别收获的藻类生物质(即Algae M、Algae D和Algae W)经厌氧发酵产出1 m³ CH₄过程的能源消耗和环境影响潜力。【结果】三种藻类生物质在培养收获阶段的能源消耗均高于厌氧发酵阶段,同时,Algae W不仅能源消耗最低,且该微藻生物质在产出1 m³ CH₄过程中的生命周期环境影响潜值也最低。【结论】通过葡萄酒厂废水培养的藻类生物质在产甲烷方面具有明显的优势。另外,藻类生长量和产甲烷量的增加有利于产甲烷过程能源消耗量的减少和环境影响潜力的降低。

关键词:微藻;废水;甲烷;生命周期评价

中图分类号:TK6

文献标志码:A

文章编号:1003-5168(2023)10-0075-08

DOI:10.19968/j.cnki.hnkj.1003-5168.2023.010.016

Life Cycle Assessment for the Processing of Energy Algae Cultivation and Methane Production Via Anaerobic Fermentation

LIU Cuixia¹ GUO Xuebai² HAO Yuanfeng² CHEN Junhua¹ HU Zhiqian³

(1.School of Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2.Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou 450008, China; 3.School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Purposes] In order to screen the optimal cultivated environment for energy algae, the life cycle assessment of the coupled process of microalgal cultivation and anaerobic fermentation was conducted. [Methods] Based on the identification and quantification of the energy requirement and environmental impact loading, 1 m³ CH₄ produced by algal biomass from BG-11 medium, dairy wastewater and winery wastewater (Algae M, Algae D and Algae W, respectively) via anaerobic digestion was evaluated. [Findings] The investigation results showed that the energy requirement of biomass in the process of cultivating and harvesting was higher than that in the process of anaerobic digesting. Meantime, the energy requirement for Algae W was lowest than others. Besides, for the whole process of methane production, the environmental impact potentials of that microalgal biomass also was the lowest. [Conclusions] Thus, the studied algae cultivated in winery wastewater showed obvious advantage in methane production. Moreover, the increases of algal biomass production and methane production were conducive to reduce the en-

收稿日期:2023-03-16

基金项目:河南省科技厅科技攻关项目(232102320099);河南省科技厅科技攻关项目(212102310070)。

作者简介:刘翠霞(1987—),女,博士,研究方向:微藻废水处理及生物质能源化。

ergy requirement and environmental impact loading.

Keywords: algae; wastewater; methane; life cycle assessment

0 引言

近年来,藻类生物质能源逐渐成为全球范围内备受关注的第三代生物质能源^[1-2],同时,大量的研究结果也证实废水培养可以作为降低藻类生物质能源生产成本的主要途径之一^[3-4]。然而,在来源、基础建设、天气情况和预处理方法等方面的不同,使得废水的浊度、污染物浓度等物化指标也表现出明显的差异,进而对藻类的培养产生显著的影响。例如,较低的污染物浓度可能降低藻类的生长量^[5-6];不同物化性质的废水中获得的藻类生物质生化特性也会不同^[7]。上述这些不同也会进一步影响藻类生物质能源的转化效率,如笔者前期的研究中使用三种不同培养液(BG-11培养基、稀释奶牛场废水和稀释葡萄酒厂废水)分别培养一株绿藻,最终这株绿藻不仅在生长量和生化组成上表现出明显差异,而且在其厌氧发酵产甲烷效率上也差异显著^[8-9]。通常,在试验研究中会以藻类生物量、藻类生物质能源转化效率为择优依据,选择最佳的废水类型和微藻种类。在藻类生物质能源进行大规模商业化的过程中,需要综合考虑其经济、社会和环境效益,并不能单纯地选择高的生物量或高的能源转化效率。

生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)被认为是评价环境影响的重要手段之一,LCA是一个量化、系统化评价与产品、工艺或者活动相关的环境负荷潜在影响的过程,包含原材料的开采或采购,中间的运输与加工,以及产品的使用、回收等全过程,可以认为是对一个产品或一个过程“从摇篮到坟墓”的分析^[10-11]。国际标准化组织认为LCA的技术框架可分为四部分,即目标与系统边界的确定、清单分析、环境影响评价和结果解释。相关研究学者已通过生命周期评价对藻类废水培养及藻类生物质能源化这一耦合过程的能耗、环保性、经济性和社会性进行综合评价,论证基于废水培养的藻类生物质在能源转化方面极具优势。例如,Clarens等^[10]通过对比藻类与陆生能源植物(包括玉米、柳枝稷和油菜)获取过程中的资源消耗和污染气体排放,发现利用废水替换传统的营养源可以提高藻类培养的环境效益。Mu等人^[11]对16种藻类生物燃料生产途径进行生命

周期评价分析,其中通过污泥浸出液培养藻类与湿式脂类提取或直接燃烧相结合的途径,在能源消耗、温室气体排放、富营养化及水消耗量方面产生较低的影响。

因此,本研究将尝试利用生命周期评价方法,建立微藻废水培养、收获及厌氧发酵产甲烷过程的污染物排放清单,全面对比分析不同废水培养途径获得生物甲烷的资源利用、能源消耗及环境影响,得出最佳的废水类型,提出合理的藻类生物质能源化改进方法,为微藻在能源化方面的发展提供科学的参考依据。

1 目标与系统边界的确定

为在清单分析过程中使收集的数据标准化,本研究以培养收获的藻类生物质均通过厌氧发酵产出 $1\text{ m}^3\text{ CH}_4$ 为功能单位,结合前期研究分别从BG-11培养基、稀释奶牛场废水和稀释葡萄酒厂废水中培养收获的Algae M、Algae D和Algae W的厌氧发酵产甲烷的试验结果^[8-9],对上述三种藻类生物质产甲烷过程进行生命周期评价,得出最佳的试验藻株培养废水环境,同时找出产能过程中对环境带来较大影响的步骤,依此提出改进方法。

在生命周期评价过程中,需要对评价的范围进行界定。而根据本研究的实际情况,确定评价范围,包括试验藻株的培养及收获过程、厌氧发酵过程和上游资源与能源准备过程,如图1所示。根据以上过程的具体操作方式,分析其对环境产生的直接和间接影响,建立清单目录,计算上述过程中的能源消耗量和各污染气体排放量。

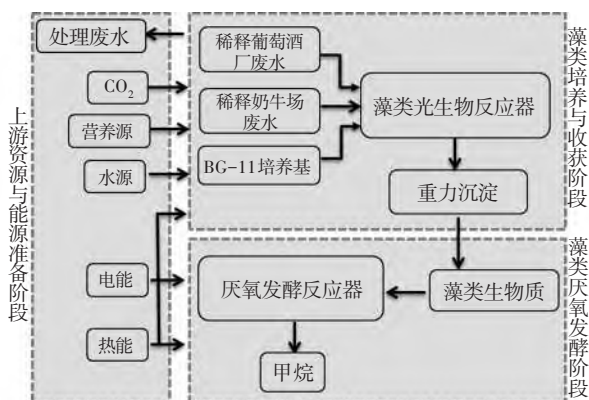


图1 试验藻株的生命周期评价系统边界

同时对生命周期评价系统做了如下假设和简化。

①BG-11培养基中消耗的氮源(硝酸钠 1.5 kg/m^3)及磷源(磷酸氢二钾 0.04 kg/m^3)分别转化为同等质量的尿素(2.12 kg/m^3)和磷酸二胺(0.023 kg/m^3),其他微量元素的消耗忽略不计,其中肥料生产过程中消耗能源及主要污染气体排放数据参考文献[12]。

②系统中消耗的能源均由电能提供,电网燃煤发电中所需能源及大气污染物排放量参考文献[13]。

③厌氧发酵过程中的电能消耗与热能消耗依据 Soda 等^[14]提出的经验公式进行计算,即电能为 0.11 kWh/kg-TS ,热能为 2.448 kWh/kg-TS ,而产生的沼渣和沼液的处理及对环境的影响并未计入。

④不考虑处理废水的回用及藻类培养和厌氧发酵过程中水分的蒸发。

2 清单分析

2.1 试验藻株培养及收获过程

在本研究中,利用三种不同培养液培养试验藻株的过程分为4个阶段:培养基的配制、废水的稀释、藻类培养及重力沉淀。根据每个阶段中使用的资源与设备,总结出该过程主要考虑的因子:培养基中投加营养源量(kg)、光源的电能消耗(kWh)、空气泵的电能消耗(kWh)、蠕动泵的电能消耗(kWh)和吸收空气中的 CO_2 量(kg)。

根据本研究前期得出的相关结果进行如下推论。

①从BG-11培养基中获得的藻类生物质 Algae M 的元素组成: $\text{C}_{3.60}\text{H}_{6.36}\text{N}_{0.64}\text{O}_{1.91}$,推断出其生长过程中需要的理论 CO_2 量为 1.78 kg/kg 干物质。而实际培养基中折算的纯 CO_2 投加量为 0.006 kg/kg 干物质。因此,本研究认为 Algae M 主要从环境中吸收 CO_2 作为其生长碳源。

②从稀释奶牛场废水中获得的藻类生物质 Algae D 的元素组成为 $\text{C}_{3.01}\text{H}_{5.42}\text{N}_{0.40}\text{O}_{1.39}$,其理论需 CO_2 量为 1.91 kg/kg 干物质。而在稀释奶牛场废水中,COD 的去除率为 0.83 kg/kg 干物质。COD 与 TOC 的比值通常为 $2.6\sim 3.3$,在本研究中取 3.0 ,因此,C 的去除率折算为 0.28 kg/kg 干物质,则相当于 CO_2 的去除率为 1.01 kg/kg 干物质。说明 Algae D 以有机碳为主要碳源,同时从环境中吸收 CO_2 作为补充碳源,吸收量至少为 0.80 kg/kg 干物质。

③从稀释葡萄酒厂废水中获得的藻类生物质 Algae W 的元素组成为 $\text{C}_{3.07}\text{H}_{6.36}\text{N}_{0.28}\text{O}_{1.58}$,其理论需

CO_2 量为 1.89 kg/kg 干物质。而在稀释葡萄酒厂废水中,COD 的去除率为 1.51 kg/kg 干物质,折算成 CO_2 的去除率为 1.85 kg/kg 干物质。说明 Algae W 仅需要从环境中吸收少量的 CO_2 (0.04 kg/kg 干物质)作为补充碳源。

本研究采用 3 L 的塑料袋(有效容积为 1.5 L)作为培养试验藻株的反应器,20个为一组,培养周期为 14 d ,配有1盏LED日光灯管(功率为 9 W),光暗比为 $14:10$,并使用1台空气泵(功率为 18 W)进行间断式曝气,达到补充 CO_2 和防止藻细胞沉淀的目的。培养结束后,将藻液置于 30 L 的塑料容器中静置沉淀 2 h ,并利用蠕动泵(40 W)在 $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流速下将上清液移出,收集浓缩藻泥。因此,一组藻类培养及收获过程的总耗电量约为 4.80 kWh 。

藻类生长量和沉淀效率的试验结果如图2所示,推算出每培养收获 1 kg 藻类干物质需要使用的培养液体积及在培养阶段获得的藻类生物量。将该结果与上述条件结合,计算出需要投入的资源,见表1,三种藻类生物质的生长量不同,Algae M 的培养过程表现出最高的耗电量,而 Algae D 的耗电量最低。由于奶牛场废水的稀释程度要大于葡萄酒厂废水,所以试验藻株对葡萄酒厂废水的处理量要高于奶牛场废水。在本系统中并未将淡水使用量和废水处理量计算在内,而在实际的藻类废水培养过程中,可以使用处理后的废水对原废水进行稀释,进而减少稀释过程带来的水资源消耗。

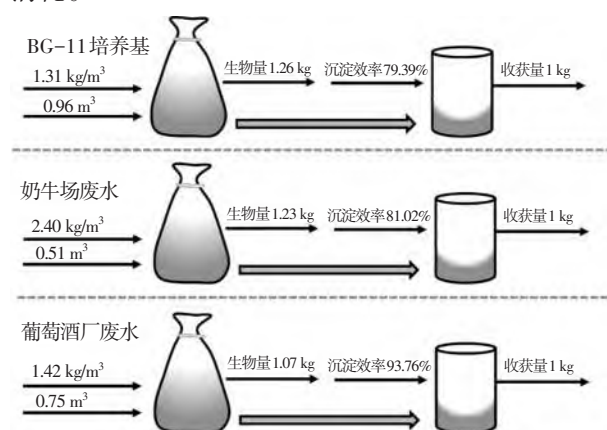


图2 试验藻株培养及收获

因此,可以得出培养收获 1 kg Algae M、Algae D 和 Algae W 需要消耗的能量和排放的大气污染物,见表2。其中, CO_2 排放量的最终值减去藻类在培养过程中吸收的 CO_2 量,Algae M 的能源消耗及污染气体排放量也包含尿素和磷酸二胺的生产过程。

表 1 生产每 kg 藻类干物质需要消耗的资源

项目	单位	Algae M	Algae D	Algae W
废水	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	0.00	0.17	0.38
水	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	0.96	0.34	0.38
电能	$\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	153.60	81.60	120.00
CO_2	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	1.78	0.80	0.04
尿素	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	2.12	0.00	0.00
磷酸二胺	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	0.02	0.00	0.00

注: Algae M、Algae D、Algae W 分别收获于 BG-11 培养基、奶牛场废水、葡萄酒厂废水。

表 2 每 kg 藻类干物质培养及收获过程的清单分析

项目	类别	单位	Algae M	Algae D	Algae W
能源消耗		$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	1 351.83	654.43	962.40
	CO_2	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	131 725.74	58 433.44	87 068.00
	CO	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	44.44	18.77	27.60
	CH_4	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	301.79	146.88	216.00
	NO_x	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	249.20	91.39	134.40
	PM_{10}	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	87.10	5.71	8.40
	SO_2	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	186.18	93.02	136.80
污染气体排放	VOC	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ biomass}$	6.14	3.26	4.80

2.2 藻类厌氧发酵过程

本研究将重力沉淀收获的藻类生物质 Algae M、Algae D 和 Algae W 直接用于厌氧发酵,根据前期研究结果中得出的三种藻类生物质的产甲烷潜力,可以推算出每产出 $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ 需要添加的 Algae M、Algae D 和 Algae W 分别为 5.00 kg VS 、 7.69 kg VS 和 4.55 kg VS ,依据每种藻类生物质的 VS 含量,得出需要的干物质质量分别为 5.60 kg 、 9.75 kg 和 6.34 kg 。在厌氧发酵过程中接种物与底物投加比值为 2,所以 Algae M、Algae D 和 Algae W 相对应的接种物量分别为 10.00 kg VS 、 15.38 kg VS 和 9.10 kg VS ,转化为干物质质量分别为 16.00 kg 、 24.61 kg 和 14.56 kg 。因此,根据上述的第三条假设可以计算出 Algae M 的电能消耗为 2.38 kWh ,热能消耗为 52.88 kWh 。同理,Algae D 的电能消耗为 3.78 kWh ,热能消耗为 84.11 kWh ;Algae W 的电能消耗为 2.30 kWh ,热能消耗为 51.16 kWh 。上述结果说明产甲烷潜力最小的 Algae D 需要较高的能耗生产 1 个功能单位的甲烷,相反,Algae W 的能耗则为最低。因此,可以得出每产出 1 个功能单位所需要消耗的能量及污染气体排放量,见表 3。

3 环境影响评价方法

为了区分各类环境影响的重要性及它们之间的关系,可以将上述清单分析中得出的数据进行定

表 3 厌氧发酵产 $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ 过程的清单分析

项目	类别	单位	Algae M	Algae D	Algae W
能源消耗		$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CH}_4$	443.19	704.88	428.75
	CO_2	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CH}_4$	40 113.23	63 799.35	38 806.61
	CO	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CH}_4$	12.71	20.21	12.30
污染气体排放	CH_4	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CH}_4$	99.47	158.20	96.23
	NO_x	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CH}_4$	61.89	98.44	59.88
	PM_{10}	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CH}_4$	3.87	6.15	3.74
	SO_2	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CH}_4$	63.00	100.19	60.94
	VOC	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CH}_4$	2.21	3.52	2.14

量和定性评价,根据国际标准 ISO14040 提供的《生命周期评价原则及框架》,将影响评价分为特征化、标准化和加权评估。

3.1 特征化

在藻类能源化过程中,主要考虑的环境影响包括全球变暖潜值(global warming potential, GWP)、环境酸化潜值(acidification potential, AP)、富营养化潜值(nutrient enrichment potential)、光化学臭氧合成(photochemical ozone formation)和烟尘(soot and ashes)^[13]。根据每种环境影响包括的气体排放物及它们各自对应的当量因子,结合上述清单分析中得出的污染气体排放量,分别计算出 Algae M、Algae D 和 Algae W 以 $\text{kg CO}_2 \text{ eq.}$ 表示的全球变暖潜值、以 $\text{kg SO}_2 \text{ eq.}$ 表示的环境酸化潜值、以 $\text{kg NO}_3^- \text{ eq.}$ 表示的富营养化潜值、以 $\text{kg C}_2\text{H}_4 \text{ eq.}$ 表示的光化学臭氧合成和以 kg 表示的烟尘总量。

3.2 标准化和加权评估

为了使上述各种环境影响的大小进行对比,本研究将 2010 年的全球人均环境影响潜力作为环境影响基准,根据生命周期评价中的标准化和加权评估的方法^[13,15],如公式(1)和公式(2),分别对 Algae M、Algae D 和 Algae W 产出 $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ 后,整个生命周期的五种环境影响结果进行标准化和加权评估,其中标准化参考值和权重因子采用 Liao 等^[13]的研究中报道的相关数据,用人当量(Person equivalents)表示标准化值,单位换算为毫克,简写为 mPE,以目标年 2010 年的人当量(Person equivalents, 2010 was targeted)表示加权值,单位换算为毫克,简写为 mPET₂₀₁₀。

$$\text{标准化值 (mPE)} = \frac{\text{等效量}/\text{m}^3 \text{ CH}_4}{\text{标准化参考值}/(\text{人} \cdot \text{年})} \quad (1)$$

$$\text{加权值 (mPET}_{2010}) = \text{标准化值 (mPE)} \times \text{权重因子} \quad (2)$$

4 结果与讨论

4.1 能源消耗

根据上述得出的藻类生物质培养收获过程和厌氧发酵过程的能源消耗,计算全生命周期能源总消耗量,见表 4。由表 4 可知,Algae M 的能源消耗总量最高,其次是 Algae D,Algae W 最低。对于三种藻类生物质,在本研究中它们主要的能源消耗在培养和收获阶段,这可能与选用人工光源和空气泵曝气的培养方式有关。藻类生物质在厌氧发酵阶段的能源消耗与它们各自的产甲烷潜力相关,而培养收获阶段的能源消耗不仅与它们各自的生物量有关,同时还综合了它们的沉淀效率、挥发性固体含量及产甲烷潜力,所以最终三种藻类生物质在培养收获阶段的能源消耗的大小关系为 Algae M > Algae D > Algae W。

表 4 Algae M、Algae D 和 Algae W 产甲烷生命周期的能量消耗

过程	Algae M		Algae D		Algae W	
	能源消耗/MJ	百分比/%	能源消耗/MJ	百分比/%	能源消耗/MJ	百分比/%
培养收获	7 570.27	94.47	6 380.71	90.05	6 101.62	93.43
厌氧发酵	443.19	5.53	704.88	9.95	428.75	6.57
合计	8 013.46	100.00	7 085.59	100.00	6 530.37	100.00

4.2 环境影响负荷

根据上述得出的微藻养猪废水处理与混凝沉淀过程和厌氧发酵过程的污染气体排放量计算全生命周期污染气体排放量,见表 5。然后根据每种环境影响包括的气体排放物及它们各自对应的当量因子,计算出小球藻生物质以等效量表示的各类环境影响潜值,见表 6。

表 5 Algae M、Algae D 和 Algae W 产甲烷生命周期的污染气体排放量

污染气体	单位	Algae M	Algae D	Algae W
CO ₂	g·m ⁻³ CH ₄	777.78	633.53	590.82
CO	g·m ⁻³ CH ₄	0.26	0.2	0.19
CH ₄	g·m ⁻³ CH ₄	1.79	1.59	1.47
NO _x	g·m ⁻³ CH ₄	1.46	0.99	0.91
PM ₁₀	g·m ⁻³ CH ₄	0.49	0.06	0.06
SO ₂	g·m ⁻³ CH ₄	1.11	1.01	0.93
VOC	g·m ⁻³ CH ₄	0.04	0.04	0.03

从表 6 中可以看出,三种藻类生物质产出 1 m³ CH₄后,整个生命周期的全球变暖潜值的大小顺序为 Algae M > Algae D > Algae W。其中,CO₂自身的排放是全球变暖的主要影响因素,在 Algae M、Algae D 和 Algae W 中均占到 60% 以上,而 NO_x的排

表 6 Algae M、Algae D 和 Algae W 产甲烷生命周期的环境影响潜值

环境影响	单位	单位:等效量/m ³ CH ₄		
		Algae M	Algae D	Algae W
全球变暖	kg CO ₂ eq.	1 274.83	980.43	910.55
环境酸化	kg SO ₂ eq.	2.13	1.7	1.57
富营养化	kg NO ₃ ⁻ eq.	1.97	1.34	1.23
光化学臭氧合成	kg C ₂ H ₄ eq.	0.04	0.04	0.04
烟尘	kg	0.49	0.06	0.06

放量虽然较低,但由于其效应当量因子较高,所以它的等效量成为全球变暖潜值的第二大因素,CO 和 CH₄的影响微乎其微。三种藻类生物质产出 1 m³ CH₄后,整个生命周期的环境酸化潜值和富营养化潜值的大小顺序仍为 Algae M > Algae D > Algae W。对于表 6 中列举的光化学臭氧合成的等效量总值,Algae M、Algae D 和 Algae W 均约等于 0.04 kg C₂H₄ eq.,且 VOC 均为它们的主要影响因素。另外,Algae M 的烟尘排放量为 0.49 kg,明显高于 Algae D 和 Algae W 的 0.06 kg。

根据公式(1)和公式(2)对五种环境影响结果进行标准化和加权评估,结果如图 3 至图 6 所示。图 3 至图 5 显示三种藻类生物质的产甲烷过程对全球变暖的影响较为显著,Algae M、Algae D 和 Algae W 的全球变暖潜值经标准化后分别占据总影响的 44.37%、46.12% 和 46.31%,即全球变暖潜值的大小顺序为 Algae W > Algae D > Algae M。然而最终 Algae M、Algae D 和 Algae W 标准化后的总值分别为 330.27 mPE、244.34 mPE 和 226.02 mPE,遵循 Algae M > Algae D > Algae W 的规律。这可能与藻类培养过程中 CO₂的吸收量有关,因为 CO₂是全球变暖潜值的主要贡献物质,在试验藻株的培养和收获过程的分析中得出,从 BG-11 培养基中收获的 Algae M 主要从空气中吸收 CO₂作为其碳源,从奶牛场废水中收获的 Algae D 只有部分碳源来自空气中的 CO₂,而葡萄酒厂废水几乎为 Algae W 提供了全部的碳源,所以最终全球变暖潜值中 Algae M 的 CO₂抵消量最高,其次为 Algae D,最低为 Algae W。环境酸化和光化学臭氧合成的影响比例较为接近,虽然光化学臭氧合成的等效量最低,但由于其每人每年的标准化参考值远低于其他四种影响类型,所以其标准化后的影响比例仅次于全球变暖。富营养化和烟尘的影响比例较低,尤其是 Algae D 和 Algae W 的烟尘影响比例,其标准化后均占据总影响的 1.40%。三种藻类生物质的五种环境影响类型表现出一致的规律,它们标准化后的比例顺序为全球变

暖>光化学臭氧合成>环境酸化>富营养化>烟尘,即全球变暖、光化学臭氧合成和环境酸化三类主要的环境影响类型。由图6可知,Algae M、Algae D和Algae W产甲烷生命周期的五种环境影响类型加权后的总值分别为238.15 mPET₂₀₁₀、176.22 mPET₂₀₁₀和163.09 mPET₂₀₁₀,说明利用葡萄酒厂废水培养的微藻进行能源化的环境影响最小。

4.3 敏感性分析

在分析藻类生物质培养、收获及产甲烷过程的能源消耗及环境影响评估中,不同的藻类生长量、沉淀效率和产甲烷量会改变最终的评价结果,因此本研究针对藻类生长量、沉淀效率和产甲烷量设置一定的变化率,分别为±25%、±5%和±25%,对界定系统的能源消耗及主要的环境影响(如全球变暖、环境酸化和光化学臭氧合成)进行敏感性分析,结果如图7所示。

从图7中可以看出,能源消耗、全球变暖、环境酸化和光化学臭氧合成在不同的藻类生长量、沉淀效率和产甲烷量下均有明显的变化,且它们的变化趋势基本一致。当Algae M的藻类生长量增加25%时,能源消耗、全球变暖、环境酸化和光化学臭氧合成分别降低18.71%、19.93%、20.07%和18.66%;相

反,当Algae M的藻类生长量减少25%时,能源消耗、全球变暖、环境酸化和光化学臭氧合成分别增加31.80%、30.74%、29.87%和31.78%,这说明Algae M生长量的减少比其增加对生命周期评价结果的影响程度要高,Algae D和Algae W也表现出类似的结果。当产甲烷量增加25%时,能源消耗、全球变暖、环境酸化和光化学臭氧合成的变化率基本相似,Algae M约为19.94%,Algae D约为20.02%,Algae W约为20.00%;相反,当产甲烷量减少25%时,能源消耗、全球变暖、环境酸化和光化学臭氧合成的变化率也相似,且高于产甲烷增加时的变化率,Algae M约为33.43%,Algae D约为33.30%,Algae W约为33.34%。当沉淀效率增加5%时,Algae M、Algae D和Algae W的能源消耗也随之降低4.28%、3.60%和4.31%;相反,当沉淀效率减少5%时,Algae M、Algae D和Algae W的能源消耗随之增加5.19%、5.50%和5.07%;同时,全球变暖、环境酸化和光化学臭氧合成的变化率与能源消耗也较为接近。

从上述敏感性分析的结果可以得出,较低的藻类生长量和产甲烷量对界定系统生命周期评价结果的影响最为显著,所以采取有效手段提高藻类生长量和产甲烷量十分必要。虽然沉淀效率对生命

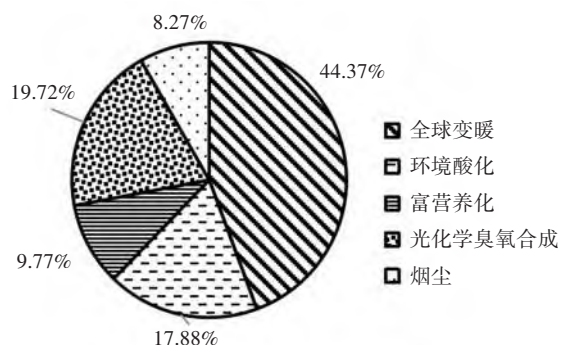


图3 Algae M的标准化环境影响潜值 (Algae M收获于BG-11培养基)

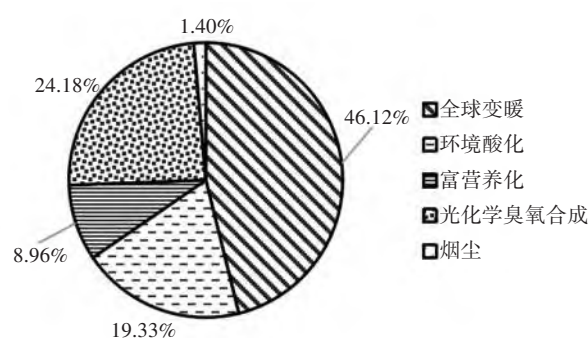


图4 Algae D的标准化环境影响潜值 (Algae D收获于奶牛场废水)

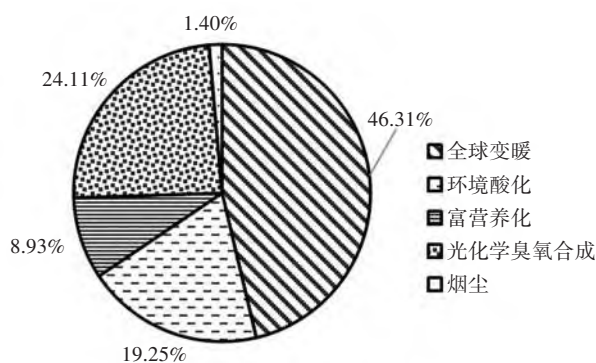


图5 Algae W的标准化环境影响潜值 (Algae W收获于葡萄酒厂废水)

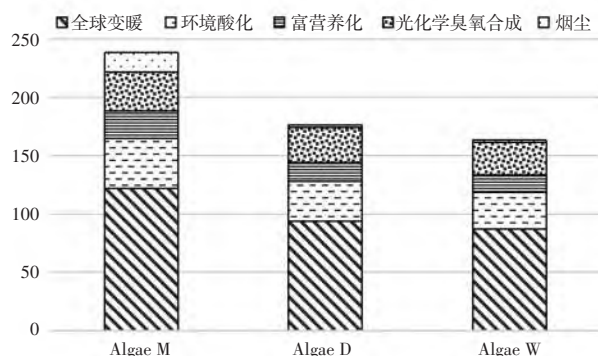


图6 Algae M、Algae D和Algae W加权后的环境影响潜值 (Algae M、Algae D、Algae W分别收获于BG-11培养基、奶牛场废水、葡萄酒厂废水)

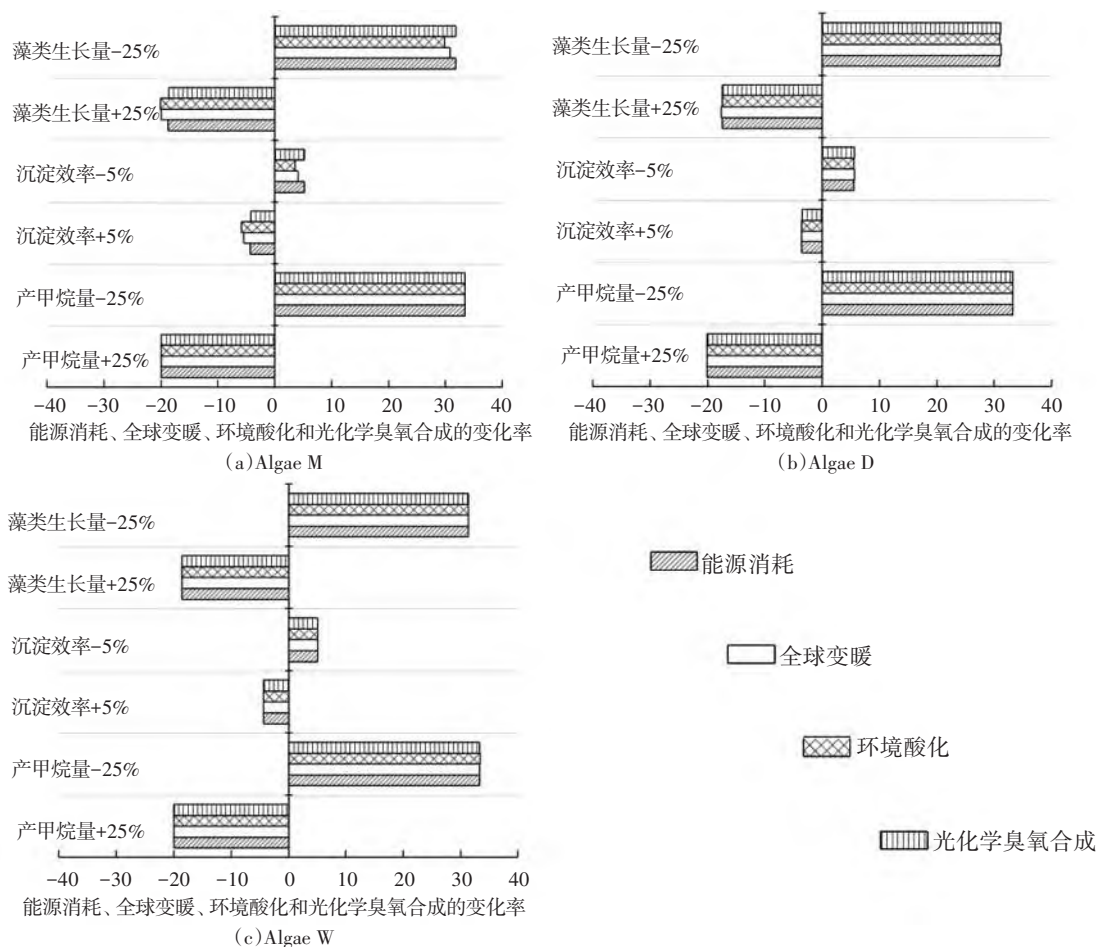


图7 Algae M、Algae D和Algae W产甲烷生命周期的敏感性分析
(Algae M、Algae D、Algae W分别收获于BG-11培养基、奶牛场废水、葡萄酒厂废水)

周期评价结果也有一定的影响,但是目前仅利用重力沉淀提高藻细胞的收获量是比较困难的。因此,为了能够使试验藻株在藻类能源化方面有一定的发展,在废水作为其培养液的同时,还需要优化藻细胞的生长条件,在较低的能源投入下达到较高的生长量,且更需要对藻细胞特性进行深入研究,寻找低能耗的方式提高藻细胞的生物降解率,增加其产甲烷量。

5 结论

以从BG-11培养基、奶牛场废水和葡萄酒厂废水中分别收获的Algae M、Algae D和Algae W均产出 $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ 为研究对象,在界定系统下进行清单分析,建立生命周期评价模型,得出以下结论。

①对比Algae M、Algae D和Algae W产出 $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ 过程的能源消耗,得出大小顺序为Algae M > Algae D > Algae W,且对于三种藻类生物质,其培养收获阶段的能耗均高于厌氧发酵阶段。

②Algae M、Algae D和Algae W产出 $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ 过程的全生命周期环境影响分别为 $238.15 \text{ mPET}_{2010}$ 、

$176.22 \text{ mPET}_{2010}$ 和 $163.09 \text{ mPET}_{2010}$,且三种藻类生物质的五种环境影响的主次顺序一致,依次为全球变暖、环境酸化、光化学臭氧合成、富营养化、烟尘。三种藻类生物质加权后的环境影响值的大小顺序仍为Algae M > Algae D > Algae W,说明通过稀释葡萄酒厂废水培养的试验藻株在产甲烷方面具有明显的优势。

③根据改变后的藻类生长量、沉淀效率和产甲烷量对界定系统生命周期评价结果的敏感性分析得出,藻类生长量和产甲烷量的变化会使系统的能源消耗量和环境影响结果产生明显的变化,且藻类生长量和产甲烷量减少时对能源消耗量和环境影响结果带来的变化幅度要明显高于藻类生长量和产甲烷量增加时。

参考文献:

- [1] MORENO-GARCIA L, ADJALLÉ K, BARNABÉ S, et al. Microalgae biomass production for a biorefinery system: Recent advances and the way towards sustainability [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 493-506.

- [2] 霍书豪,周卫征,朱顺妮,等.能源微藻类生物质培养技术及能源物质形态构成[J].可再生能源,2014,32(12): 1895-1901.
- [3] LU W D, WANG Z M, WANG X W, et al. Cultivation of *Chlorella* sp. using raw dairy wastewater for nutrient removal and biodiesel production: Characteristics comparison of indoor bench-scale and outdoor pilot-scale cultures[J]. Bioresource Technology, 2015, 192: 382-388.
- [4] 张华,沈英,俞涛.微藻生物膜去污技术应用研究进展[J].可再生能源,2022,40(3):299-306.
- [5] WANG Q C, CHERONES J, HIGGINS B. Acclimation of an algal consortium to sequester nutrients from anaerobic digestate[J]. Bioresource Technology, 2021, 342: 125921.
- [6] 江东,雒义凡,侯娟,等.不同碳源条件对集胞藻 PCC6803 和聚球藻 PCC7942 生长的影响研究[J].可再生能源,2018,36(3):317-324.
- [7] PITTMAN J K, DEAN A P, OSUNDEKO O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources[J]. Bioresource technology, 2011, 102(1): 17-25.
- [8] CUIXIA L, SURESH R S, MING H, et al. Phycoremediation of dairy and winery wastewater using *Diplosphaera* sp. MM1 [J]. Journal of Applied Phycology, 2016, 28: 3331-3341.
- [9] LIU C X, SURESH R S, MEGHARAJ M, et al. *Diplosphaera* sp. MM1-A microalga with phycoremediation and biomethane potential[J]. Bioresource Technology, 2016, 218: 1170-1177.
- [10] CLARENS A F, RESURRECCION E P, WHITE M A, et al. Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks [J]. Environmental science & technology, 2010, 44(5): 1813-1819.
- [11] MU D Y, MIN M, KROHN B, et al. Life cycle environmental impacts of wastewater-based algal biofuels[J]. Environmental science & technology, 2014, 48 (19) : 11696-11704.
- [12] 苏洁. 中国生物质乙醇燃料生命周期分析[D]. 上海:上海交通大学,2005.
- [13] LIAO Y F, HUANG Z H, MA X Q. Energy analysis and environmental impacts of microalgal biodiesel in China [J]. Energy Policy, 2012, 45: 142-151.
- [14] SODA S, IWAI Y, SEI K, et al. Model analysis of energy consumption and greenhouse gas emissions of sewage sludge treatment systems with different processes and scales [J]. Water Science & Technology, 2010, 61(2): 365-373.
- [15] 刘竞. 微藻热解特性分析及其资源化利用生命周期评价[D]. 广州:华南理工大学,2010.