

水葫芦能源利用的生命周期环境影响评价

叶小梅, 常志州, 杜 静, 严少华

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘要:水葫芦厌氧发酵能源化利用已成为水葫芦处理与资源化利用的一个重要途径,以江苏省农业科学院水葫芦中试基地与常州市武进区水葫芦综合利用示范工程为案例,利用生命周期评价的方法建立水葫芦厌氧发酵产沼气工程污染物排放的清单,并对系统生命周期环境影响进行评价,以水葫芦能源利用产生 1 MWh 电能为功能单位,评价其对环境产生的影响。研究过程将整个生命周期分成 3 个阶段:水葫芦厌氧发酵预处理、水葫芦厌氧发酵产沼气发电和沼液沼渣农田应用,重点考虑了 3 种环境影响类型:全球变暖、环境酸化和富营养化。评价结果为:各类型环境影响指数分别为 2.1×10^{-3} 、 4.89×10^{-2} 和 1.98×10^{-1} ,与能源作物发电及传统火力发电相比较,水葫芦厌氧发酵能源化利用中的 CO_2 、 SO_x 、 NO_x 等污染物排放量均较低,对环境的负面影响最小,但水葫芦能源利用的生命周期效率仅为 0.09,低于能源作物热电联用的技术途径(0.119)。降低水葫芦厌氧发酵能源化利用中的石化能源消耗、控制堆肥及沼液沼渣有机肥施用过程中氨挥发损失,对于提高水葫芦能源转化效率与降低环境影响指数至关重要。

关键词:水葫芦;厌氧发酵;生命周期评价;环境影响

中图分类号:X820.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)12-2450-07

Life Cycle Assessment of Electricity Production from Water Hyacinth

YE Xiao-mei, CHANG Zhi-zhou, DU Jing, YAN Shao-hua

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract:The electricity production from anaerobic digestion of water hyacinth is an important technology. According to a case study in the experimental station of Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, located in Changzhou, Jiangsu, the methodology of life cycle assessment (LCA) was used to establish inventory of emission, and assess life cycle environmental impacts of electricity generation from water hyacinth based on production of 1 MWh as a functional unit. In this study, three sections were included in life cycle: (1) pretreatment of water hyacinth (including broken to pieces and solid-liquid separation), (2) anaerobic digestion of liquid and solid residue from water hyacinth and electricity production from biogas, (3) compost of anaerobic digestion residue and utilization of digestate and compost. The impact indices of global warming, acidification and eutrophication were 2.1×10^{-3} 、 4.89×10^{-2} 、 1.98×10^{-1} respectively. Compared with the electricity production from the conventional fossil fuels and energy crop, fewer pollutants such as CO_2 、 SO_x 、 NO_x were released from this alternative technology. However, life-cycle efficiency (0.09) of water hyacinth for producing 1 MWh power was lower than that (0.119) of the energy crop. The results suggested that the decrease of consumption of fossil energy in the processes of anaerobic digestion, and reduction of ammonia volatilization in composting and field utilization of anaerobic digestate could significantly increase the life-cycle efficiency and decrease the environmental impact indices.

Keywords: water hyacinth; anaerobic digestion; life cycle assessment; environmental impact

水葫芦,又名凤眼莲,由于它适应性强,繁殖快,被世界各国公认为最重要的生物入侵物种之一^[1]。在

我国南方许多省市,每年因为水葫芦过度繁殖或疯长而造成河道堵塞影响泄洪与航运的事件屡见不鲜。据报道,仅上海的黄浦江、苏州河干流每年需要打捞的水葫芦就达百万吨。

然而,水葫芦对不同污染水质具有较强的耐受能力,对水体氮磷、重金属富集能力极强,水葫芦作为一种水体修复植物而受到广泛的重视^[2],目前已被世界

收稿日期:2010-06-05

基金项目:国家支撑计划(2009BAC63B02)

作者简介:叶小梅,副研究员,在读博士,主要从事农业废弃物能源化利用技术研究工作。

E-mail: yexiaomei610@126.com

通讯作者:常志州 E-mail: Czhezhou@hotmail.com

许多国家用于净水生活、养殖污水以及重金属、有机污染物消减等水体修复的工程实践^[1,3-4]。

无论是为了防止水葫芦堵塞航道而打捞还是为污染水体修复种养水葫芦后的采收,均涉及到水葫芦处置与资源化利用问题。归纳目前已有的水葫芦处置与利用方式,主要有饲料化与肥料化利用^[5]。此外,可将水葫芦作为原料,用于造纸,制作木板、手工艺品和家具、生产饮料与食品、生防制剂、食用菌基质等^[6]。近年来,随着生物质能利用越来越变得重要,将水葫芦能源化利用,显现出巨大的市场潜力。

针对水葫芦的能源化利用,国内外已开展了众多的研究工作并已有工程实践^[7],但采用生命周期评价方法,对水葫芦能源化利用的环境影响以及能源回收年限等进行分析,未见报道。

生命周期评价(LCA)被国际标准化组织(ISO)定义为:“对一个产品或某个过程或某个活动生命周期中物质与能量流以及潜在环境影响的汇编与评价”,是产品从“摇篮”到“坟墓”的评价^[8],该标准自 1996 年颁发以来,已在国内外广泛应用,被誉为 21 世纪最具有潜力的评价方法。

Rafaschieri 等^[9]应用 LCA 方法,以 1 MWh 为评价功能单位,比较了能源作物与传统煤、油两种原料发电的环境影响,表明采用能源作物发电仅仅水体富营养化指数较传统煤、油发电高,而其他环境污染指数,如温室气体(碳单位)、酸雨、人类健康等均显著低于后者,其中温室气体排放指数不到后者的 1/8。Martin^[10]对可再生能源进行了动态的 LCA 评价,认为开发利用可再生能源无论是环境影响还是对稀缺资源的消耗均显著低于传统的石化能源。但也有研究表明,用生物柴油替代石化燃料可能增加环境的污染负荷^[11-12]。Ishikaw 等^[13]对以畜禽粪便为底物的大型沼气工程进行了 LCA 评价,结果表明,如果厌氧消化残留物不作为肥料进一步施用,则需要 16 a 才能平衡沼气工程建设所投入的能源,如果能将厌氧消化残留物作肥料施用,则能源平衡时间会缩短至 9 a。Varun^[14]综述了可再生能源发电系统的 LCA 评价,认为可再生能源发电系统并非是碳零排放。我国学者刘黎娜等(2008)^[15]认为沼气系统整个生物周期排放污染总量仅占所替代煤燃烧所产生污染物总量的 20%,沼气系统具有显著的生态环境效益。

水葫芦厌氧发酵能源化利用,涉及到水葫芦打捞以及厌氧发酵所需要的预处理以及产气发电等诸多环节,合理评价水葫芦能源化利用的物质、能量流动

效率与环境影响,有助于正确选择水葫芦资源化利用的技术途径。

1 材料与方 法

根据国际标准 ISO14040 《生命周期评价原则与框架》^[8],将 LCA 的实施步骤分为目标和范围的界定、清单分析、影响评价和结果解析等 4 个部分。

本文以江苏省农业科学院(南京)水葫芦中试基地为研究案例,同时结合江苏省农业科学院武进太湖水污染治理中试基地的水葫芦能源化利用产业化中试工程运行数据进行分析与评价。南京水葫芦中试基地日处理水葫芦能力 2 t,武进水葫芦利用产业化中试基地日处理水葫芦 360 t,建设有:水葫芦酸化池 2 000 m²、水葫芦固液分离机 4 台、水葫芦挤压汁调节池 1 500 m³、CSTR 厌氧反应器 1 000 m³、贮液贮气一体化罐 800 m³、沼液贮存池 600 m³,另配套农田沼液贮存池 3 000 m³ 以及沼液运输车 2 辆。打捞上岸的水葫芦经二次粉碎后,进行固液分离,分离后的挤压汁进入 CSTR 反应器进行厌氧发酵,挤压渣进行固态厌氧发酵,产生的沼气进行发电,沼液进入农田作为肥料施用,沼渣经高温堆制后,作有机肥施用。

以生产 1 MWh 的电力为功能单位,采用 LCA 方法和情景分析法相结合的方法,对水葫芦能源化利用的环境影响进行评价,计算系统环境影响潜力,分析各单元过程的环境影响,找到对环境影响最大或较大的阶段,确定重要的影响因子,为降低水葫芦能源化利用的环境影响,进一步提高系统的环境效益提供依据。同时,将水葫芦厌氧发酵产沼气发电与能源作物发电、传统煤油发电相比较,评价水葫芦能源化能量转换效率与环境潜势。

水葫芦厌氧发酵产沼气发电的生命周期大致可以划分为 3 个环节,具体见图 1。

2 结果与分析

2.1 清单分析

按照水葫芦厌氧发酵发电生命周期的 3 个主要环节,分别进行清单分析。

2.1.1 水葫芦预处理

水葫芦预处理的生产过程又大致可以分成 2 个小的环节,即二次粉碎与固液分离。

本文以打捞上岸后的水葫芦处理为系统边界,不考虑水葫芦打捞、减容粉碎、运输以及水岸转驳等环节,所以水葫芦预处理过程主要涉及电力消耗,依据

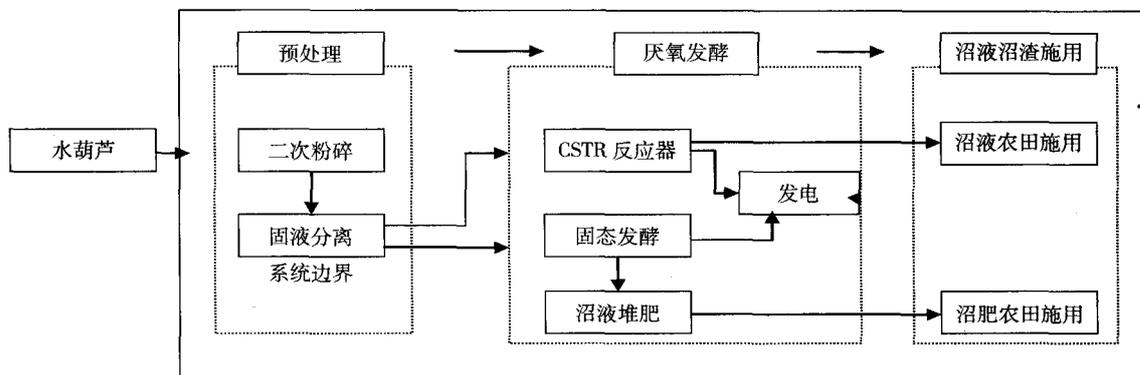


图1 水葫芦厌氧发酵产沼气发电生命周期范围

Figure 1 Life cycle assessment boundaries of electricity from water hyacinth

中试与产业化中试实际运行数据,折算出一个功能单位产品,需要处理 33.29 t 新鲜水葫芦量,平均耗电为 235.69 kWh,电力生产过程中污染物的排放见表 1。

表 1 电力生产过程污染物排放^[16]

Table 1 Pollutant emission of electrical production

污染物类别	排放量/kg·kWh ⁻¹	污染物类别	排放量/kg·kWh ⁻¹
CO ₂	1.07	CH ₄	2.60×10 ⁻³
SO ₂	9.93×10 ⁻³	NM VOC	4.87×10 ⁻⁴
NO _x	6.46×10 ⁻³	烟尘	2.02×10 ⁻²
CO	1.55×10 ⁻³		

2.1.2 厌氧发酵阶段

(1) 水葫芦挤压汁厌氧发酵

水葫芦含水量为 94.5%, 每吨新鲜水葫芦经固液分离后获得 800 kg 挤压汁, 挤压汁 COD、SCOD、MLSS 分别为: 11~13.7、5.2~5.7、8.3~10.1 kg·m⁻³, 同时获得 200 kg 含水量 80% 的挤压渣, 脱水率为 84%, 挤压汁经调节池酸化进入 CSTR 反应器, HTR 为 3 d, 负荷为 5.0 kgCOD·m⁻³·d⁻¹[17]。从 CSTR 反应器流出的沼液进入贮液贮气一体化罐, 在贮液罐中, 未彻底降解的底物进一步被降解产生甲烷。

挤压汁的产气量为 0.34 m³·L⁻¹, 甲烷含量为 60%。

水葫芦挤压汁厌氧发酵过程中, 进料提升以及反应器内搅拌需要消耗动力, 依据中试与产业化中试实际运行数据, 折算出一个功能单位平均耗电为 96 kWh, 约为发电量的 9.6%, 沼气工程运行过程中沼气泄漏按产气量的 1% 计算^[18]。

(2) 水葫芦挤压渣厌氧发酵

水葫芦挤压渣采用渗滤液回流的间歇式固态厌氧发酵工艺, 底物 TS 含量为 6.6%, 接种量 30%, 反应器中 TS 浓度为 6.4%, SHT 为 38 d, 回流比为 10:1, 回

流频次为每 2 d 回流 1 次。

水葫芦挤压渣产气量为 0.363 m³·kg⁻¹, 甲烷含量为 60%, 水葫芦挤压渣厌氧发酵过程中, 渗滤液回流需要消耗动力, 依据中试实际运行数据, 折算出一个功能单位平均耗电为 67 kWh, 泄漏沼气量仍按产气量的 1% 计。

(3) 水葫芦挤压渣高温堆肥

经厌氧发酵后的沼渣, 晾晒 1~2 d 后采用高温有氧堆肥方法直接堆肥处理, 实验测得堆肥过程 CH₄、NO_x、NH₃ 排放量分别为 107.52、335.44、2.20 kg·t⁻¹。此外, 堆肥物料翻堆还需要消耗动力, 依据产业化中试实际运行数据^[19], 折算出一个功能单位产品平均耗电为 5.77 kWh。

(4) 沼气发电

按沼气实际发电量得出: 每立方米沼气可发电 2.0 kWh, 获得 1 MWh 的电力, 约需要沼气 500 m³, 由此推算出需要消耗的新鲜水葫芦量为 33.29 t。

利用沼气能源时, 沼气中 H₂S 的含量不得超过 20 mg·m⁻³[20]。沼气经过净化能满足发电的要求, 则生产 1 个功能单位的电力沼气燃烧所产生 SO₂ 量为 18.82 g。

2.1.3 沼液与沼渣有机肥农田施用

沼液与沼渣有机肥农田施用产生的环境影响主要来自两个方面。一是用沼液与沼渣有机肥替代化学肥料的作用, 这主要是对环境产生的正面影响, 一个 1 MWh 功能单位所替代的化学氮、磷、钾等养分分别为 50.40、15.40、136.21 kg, 参照胡志远等^[21]资料(表 2), 计算出减排的污染物清单见表 3。另一方面由于沼液与沼渣有机肥贮存、运输以及施用过程中存在着氨的挥发损失, 其损失量按氮量的 10% 计, 约为 4.68 kgNH₃。沼液施入农田后, 因沼液呈还原性以及 COD

含量较高,与化学肥料相比,会增加农田中 CH_4 、 NO_x 排放,根据两年四季沼液水稻与小麦作物上施用后监测数据,计算出一个功能单位产品所产沼液替代化肥后,所增加的农田污染物排放清单为 CH_4 10.25 g、 NO_2 42.48 g。污染物排放汇总见表 4。

表 2 化肥生产数据

Table 2 Life cycle data of fertilizer production

项目	能源消耗/ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	排放系数/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$					
		HC	CO	PM_{10}	NO_x	SO_x	CO_2
N	95.8	0.58	4.29	5.20	36.01	32.32	10 366
P_2O_5	21.85	0.08	0.83	0.39	4.75	2.81	1 585
K_2O	9.65	0.04	0.35	0.16	1.99	1.17	662

表 3 沼液沼渣有机肥替代化学肥料减排清单

Table 3 The inventory of anaerobic digester utilization as chemical fertilizer

项目	减少能耗/ MJ	减排量/kg					
		HC	CO	PM_{10}	NO_x	SO_x	CO_2
N	4.83	0.03	0.22	0.26	1.81	1.63	522.46
P_2O_5	0.77	-	0.03	0.01	0.17	0.10	55.90
K_2O	1.58	-	0.06	0.03	0.33	0.19	108.67

表 4 水葫芦厌氧发酵生命周期污染物排放清单($\text{kg}\cdot\text{MWh}^{-1}$)Table 4 Life cycle discharge inventory of water hyacinth for electricity generation($\text{kg}\cdot\text{MWh}^{-1}$)

	预处理	厌氧发酵发电、堆肥	沼液沼渣农田应用
CO	0.37	0.26	-0.31
NO_x	1.52	1.70	-2.31
SO_2	2.34	1.68	-1.92
CH_4	0.61	3.64	0.01
CO_2^*	252.19	180.58	-687.03
NH_3		4.03	4.68

注:* 对水葫芦渣堆肥与沼气发电燃烧过程释放的 CO_2 ,按 IPCC 定义,它来自水葫芦的光合作用,应算作零(Carbon neutral)^[23]。

2.2 影响评价

影响评价包括特征化、标准化和加权评估 3 个步骤。

2.2.1 特征化

本文中水葫芦来自富营养化水体,水葫芦的生长不涉及对资源的消耗,也无外来危险化学品投入,对采收后的水葫芦作重金属分析,其含量均符合国家有机肥质量标准^[23],所以主要考虑全球变暖(Global Warming Potential, GWP)、环境酸化(Acidification Po-

tential, AP)与富营养化 3 种环境影响类型。全球变暖以 CO_2 为参照当量, CO 、 CH_4 、 NO_x 的当量系数分别为 2、21、310^[10]。环境酸化以 SO_2 为参照物, NO_x 和 NH_3 的当量系数分别为 0.7 和 1.88^[10];富营养化以 PO_4^{3-} 为参照物, NO_x 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 NH_3 的当量系数分别为 0.1、0.42 和 0.35^[24]。

2.2.2 标准化(normalisation)及权重(weighting)分析

标准化过程主要是建立标准化基准,目的是对各种环境影响类型的相对大小提供一个可比较的标准。选择的基准量一般可为全球、全国或某个地区的资源消耗或环境排放的总量或均量数据,均量数据有人均占/排放量、地均占有量、单位产值量等,本文采用 2000 年全球人均环境影响潜力作为环境影响基准^[25],具体见表 5。

生命周期影响评价需要对各类环境影响指数进行综合,得到环境影响综合指数,从而提供一个各种环境影响类型间可比较的评价结果,这就需要确定各种影响类型对自然资源可持续利用、生态系统和人类健康影响的相对重要性,即确定各种环境影响类型的权重。常见的权重确定方法有 3 种,即专家组评议、目标距离法与环境成本评估法。本文采用专家组评议确定的权重(表 5)^[26]进行环境影响综合指数比较分析。

表 5 环境影响潜力及权重

Table 5 The world's environmental impact potentials per person and weighting

环境影响类型	单位	人均当量	权重
全球变暖	$\text{kgCO}_2\text{-eqv}\cdot\text{a}^{-1}$	6 869	0.12
环境酸化	$\text{kgSO}_2\text{-eqv}\cdot\text{a}^{-1}$	56.26	0.14
富营养化	$\text{kgPO}_4^{3-}\text{eqv}\cdot\text{a}^{-1}$	1.9	0.12

2.3 影响评价

2.3.1 全球变暖潜力

全球变暖潜力见表 6。水葫芦资源化利用的一个功能单位产品的生命周期中共产生了 117.94 $\text{kg}\cdot\text{CO}_2\text{eqv}$,全球变暖潜力为 0.017 2,即利用水葫芦生产 1 MWh 电力产生的全球变暖潜力相当于 2000 年全球人均全球变暖潜力的 1.72%,其中,在水葫芦预处理与厌氧发酵产沼气发电与堆肥过程中产生的全球变暖污染物为正排放,这主要是由于在此两个阶段中需要消耗电力所致,在沼液沼渣农田应用阶段,由于替代了部分化学肥料,减少了全球变暖污染物排放。

表6 水葫芦能源化利用生命周期全球变暖潜力

Table 6 Life cycle global warming potential of water hyacinth for electricity generation

	预处理	厌氧发酵 发电、堆肥	沼液沼渣 农田施用	合计
CO ₂ 当量/kgCO ₂ e _{qv} .	736.94	784.54	-1 403.54	117.94
全球变暖潜力	0.107 3	0.114 2	-0.204 3	0.017 2

2.3.2 环境酸化潜力

环境酸化潜力见表7。水葫芦能源化利用的一个功能单位其生命周期中共产生了19.66 kgSO₂e_{qv}., 生命周期环境酸化的潜力为0.349 4, 比较3个不同阶段环境酸化潜力, 可以看出厌氧发酵发电与堆肥阶段最高, 分析引起环境酸化的主要因素, 是由于堆肥过程中存在着氮的氨挥发损失, 同样, 在沼液沼渣农田环节产生的环境酸化也是由于沼液运输与施用过程中氨挥发损失。因此, 减少氮的氨挥发损失对于减少环境酸化潜力极其重要。

表7 水葫芦能源化利用生命周期环境酸化潜力

Table 7 Life cycle acidification potential of water hyacinth for electricity generation

	预处理	厌氧发酵 发电、堆肥	沼液沼渣 农田施用	合计
SO ₂ 当量/kgSO ₂ e _{qv} .	3.87	10.49	5.30	19.66
环境酸化潜力	0.068 8	0.186 4	0.094 2	0.349 4

2.3.3 富营养化潜力

富营养化潜力见表8。水葫芦能源化利用的一个功能单位其生命周期中共产生3.14 kgPO₄³⁻e_{qv}., 富营养化潜力为1.652 6, 分析富营养化潜力主要是由氮的氨挥发, 但如果沼液沼渣不能有效进行农田应用, 可能会引发极高的富营养化潜力。

表8 水葫芦生命周期富营养化潜力

Table 8 Life cycle eutrophication potential of water hyacinth for electricity generation

	预处理	厌氧发酵 发电、堆肥	沼液沼渣 农田施用	合计
PO ₄ ³⁻ 当量/kgPO ₄ ³⁻ e _{qv} .	0.15	1.58	1.41	3.14
富营养化潜力	0.078 9	0.831 6	0.742 1	1.652 6

2.3.4 加权评估

水葫芦能源化利用生命周期环境影响指数见表9。生产一个功能单位电力的环境影响综合指数为0.249 3, 其中环境影响较大的类型是富营养化, 这主

要是由于在水葫芦堆肥以及沼液施用过程中存在着氨的挥发损失, 此外由于富营养化全球基准值较低(表5), 在比较不同环境影响潜力时, 较低的全局基准值放大了富营养化环境影响指数。

表9 水葫芦能源化利用生命周期环境影响指数

Table 9 Life cycle environmental impact indexes of water hyacinth for electricity generation

影响类型	全球变暖	酸化	富营养化
影响潜力	0.017 2	0.349 4	1.652 6
权重	0.12	0.14	0.12
分类指数	0.002 1	0.048 9	0.198 3
综合指数	0.249 3		

2.4 水葫芦厌氧发酵能源化与能源作物以及传统煤、油发电比较

水葫芦厌氧发酵产沼气发电项目, 其能量最初原料来自水葫芦的光合作用, 水葫芦在生长中吸收二氧化碳, 由于水葫芦在分解过程中产生的二氧化碳与它从大气中吸收的二氧化碳相等, 按IPCC定义, 不考虑水葫芦自身排放的二氧化碳。因此, 利用水葫芦生产1 MWh电力中, 排放的二氧化碳主要是水葫芦预处理与厌氧发酵及堆肥过程中消耗电力产生的(表4), 但因为水葫芦生长过程中吸收富集了来自水体中大量氮、磷、钾等养分, 将水葫芦中养分使用到农田, 替代化学肥料可以减少因为化肥生产、运输以及原料开采等活动中排放的二氧化碳, 两相相抵, 在水葫芦厌氧发酵能源利用中, 二氧化碳排放值为-254.26 kg(表10), 表明为净固碳。对照采用煤、油混合发电(煤、油各50%)与能源作物发电产生的二氧化碳量(表10), 水葫芦发电显著减少了二氧化碳的排放, 比较硫化物与氮氧化物的排放量, 水葫芦发电也明显低于传统煤油发电, 与能源作物发电相比, 仅硫化物排放水葫芦发电略高。结果表明, 相比传统火电与能源作物发电, 采用水葫芦厌氧发酵能源化利用对环境产生的负面影响最小。

2.5 生命周期效率

水葫芦转化生产一个功能单位电能(1 MWh)需要消耗1.83 t水葫芦(干), 测得的水葫芦热值为

表10 不同原料发电污染物排放量比较(kg·MWh⁻¹)Table 10 The inventory of electricity production from fossil fuels, energy crop and water hyacinth(kg·MWh⁻¹)

发电原料	CO ₂	SO _x	NO _x
煤、油	930	6.7	2.2
能源作物	110	0.6	1.4
水葫芦	-254	2.1	0.9

13.473 MJ·kg⁻¹, 计算出水葫芦厌氧发酵产沼气发电的生命周期效率为:

$$\eta = 3600 / (13.47 \times 1830) = 0.147$$

与能源作物热电联用相比较($\eta=0.321$), 水葫芦厌氧发酵能源化利用的能量转化效率较低, 说明现有能源转化技术或技术途径效率不高, 反之也说明水葫芦能源利用还存在着较大潜力。

为更准确表征生物质生命周期转换效率, 按照 Mann and Spath^[27]定义:

$$\eta_{LC} = (E_g - E_u) / E_b$$

式中: E_g 为生物质产生的电能, E_u 为在生物质转换电能中消耗的石化电能, E_b 为生物质热能。计算水葫芦厌氧发酵发电生命周期效率为:

$$\begin{aligned} \eta_{LC} &= (E_g - E_u) / E_b \\ &= (3600 - 1456) / (13.47 \times 1830) = 0.09 \end{aligned}$$

这表明水葫芦能源转化效率还较低, 如将水葫芦作为能源作物利用, 还需要在能源转换技术革新上付出更多的努力。

3 讨论与结论

采用生命周期法对水葫芦能源化利用的全球变暖、环境酸化和富营养化等环境影响指数进行分析, 各类型环境影响指数分别为 2.1×10^{-3} 、 4.89×10^{-2} 和 1.98×10^{-1} , 水葫芦厌氧发酵沼气发电与传统火力发电与能源作物发电相比较, 水葫芦厌氧发酵能源化利用中的 CO₂、SO_x、NO_x 等污染物排放量均较低, 对环境的负面影响最少。

结合水葫芦能源化利用的环境影响指数与水葫芦能源利用生命周期转化效率数据分析可以看出, 水葫芦能源利用中, 石化能源消耗较高, 这不仅增加了污染物排放, 同时显著降低了生命周期的效率。进一步降低水葫芦能源化利用中石化能源的消耗是提高水葫芦能源转换效率的关键。从表4所列排放清单中可见, 影响水葫芦污染物排放清单的最重要因素是沼液与沼渣的农田施用, 如果沼液与沼渣不能有效使用, 无疑将会显著增加水葫芦能源利用的环境影响指数。此外, 控制堆肥与沼液沼渣农田使用过程中氨的挥发损失, 对降低水葫芦能源化利用过程中的富营养化环境指数十分重要。

参考文献:

[1] Malik A. Environmental challenge vis a opportunity: The case of water hyacinth[J]. *Environment International*, 2007, 33(1): 122-138.

- [2] Tehobanoglous G, Maitiski F, Thompson K, et al. Evolution and performance of city of San-Diego pilot-scale aquatic wastewater treatment system using Water Hyacinth [J]. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1989, 61: 1625-1635.
- [3] 张文明, 王晓燕. 水葫芦在水生态修复中的研究进展[J]. *江苏环境科技*, 2007, 20(1): 55-58.
- ZHANG Wen-ming, WANG Xiao-yan. Researches of hyacinth in water ecological restoration[J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2007, 20(1): 55-58.
- [4] 娄敏, 廖柏寒, 刘红玉, 等. 3种水生漂浮植物处理富营养化水体的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 194-195.
- LOU Min, LIAO Bo-han, LIU Hong-yu, et al. Study of three aquatic floating plants to treat the water eutrophication[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 194-195.
- [5] 洪春来, 魏幼璋, 贾彦博, 等. 水葫芦防治及综合利用的研究进展[J]. *科技通报*, 2005, 21(4): 491-496.
- HONG Chun-lai, WEI You-zhang, JIA Yan-bo, et al. The advances of water hyacinth for control and overall utilization studies[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2005, 21(4): 491-496.
- [6] 彭青林. 水葫芦的开发利用[J]. *资源开发与市场*, 2003, 19(1): 32-33.
- PENG Qing-lin. Utilization and development of eichorinia crassipes solms[J]. *Resource Development & Market*, 2003, 19(1): 32-33.
- [7] 何加骏, 严少华, 叶小梅, 等. 水葫芦厌氧发酵产沼气技术研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2008, 24(3): 359-362.
- HE Jia-jun, YAN Shao-hua, YE Xiao-mei, et al. Progress in anaerobic digestion of water hyacinths[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 24(3): 359-362.
- [8] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, et al. Life cycle assessment Part I: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications[J]. *Environment International*, 2004, 30(5): 701-720.
- [9] Rafaschieri A, Rapaccini M, Manfreda G. Life cycle assessment of electricity production from poplar energy crops compared with conventional fossil fuels[J]. *Energy Conversion and Management*, 1999, 40(14): 1477-1493.
- [10] Peht M. Dynamic life cycle assessment(LCA) of renewable energy technologies[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(1): 55-71.
- [11] Larson E. A review of LCA studies on liquid biofuels for the transport sector [J]. *Energy for Sustainable Development*, 2006, 2: 109-126.
- [12] Zah R, Faist M, Reinhard J, et al. Standardized and simplified life-cycle assessment (LCA) as a driver for more sustainable biofuels[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(1): S102-S105.
- [13] Ishikawa S, Hoshiya S, Hinata T, et al. Evaluation of a biogas plant from life cycle assessment(LCA)[J]. *International Congress Series*, 2006, 1293: 230-233.
- [14] Varun I K Bhat, Ravi Prakash. LCA of renewable energy for electricity generation systems: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(5): 1067-1073.
- [15] 刘黎娜, 王效华. 沼气生态农业模式的生命周期评价[J]. *中国沼气*, 2008, 26(2): 17-20, 24.
- LIU Li-na, WANG Xiao-hua. Life cycle assessment of biogas eco-a-

- gricultural mode[J]. *China Biogas*, 2008, 26(2):17-20, 24.
- [16] 金晶. 脱硫石膏综合利用途径及环境影响评价[D]. 北京:北京科技大学, 硕士论文, 2007.
JIN Jing. The approach for comprehensive utilization of desulphurized gypsum and environment Impact assessment [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, . 2007.
- [17] 叶小梅, 周立祥, 严少华, 等. 厌氧 CSTR 反应器处理水葫芦挤压汁研究[J]. *福建农业学报*, 2010, 25(1):100-103.
YE Xiao-mei, ZHOU Li-xian, YAN Shao-hua, et al. Study on anaerobic digestion of juice of water hyacinth in CSTR reactor[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 25(1):100-103.
- [18] Colin J, Enrico B, Daniel K, et al. Life cycle assessment of biogas production by monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34(1):54-56.
- [19] 黄红英, 常志州, 马艳, 等. 两种翻料方式对禽畜粪便槽式发酵效率的影响[J]. *江苏农业科学*, 2006(2):135-138.
HUANG Hong-ying, CHANG Zhi-zhou, MA Yan, et al. Efficiency of two stirring methods on livestock manure trough fermentation[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2006(2):135-138.
- [20] 林聪, 王久臣, 周长吉. 沼气技术理论与工程[M]. 北京:化学工业出版社, 2007:202.
LIN Cong, WANG Jiu-chen, ZHOU Chang-ji. Biogas technology and engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007:202.
- [21] 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):141-145.
HU Zhi-yuan, TAN Pi-qiang, LOU Di-ming, et al. Assessment of life cycle energy consumption and emissions for several kinds of feedstock based biodiesel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(11):141-145.
- [22] Cherubini F, Bird N D, Cowie A, et al. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009, 53(8):434-447.
- [23] 郑建初, 常志州, 陈留根, 等. 水葫芦治理太湖流域水体氮磷污染的可行性研究[J]. *江苏农业科学*, 2008(3):247-250.
ZHENG Jian-chu, CHANG Zhi-zhou, CHEN Liu-gen, et al. Study feasibility on using water hyacinth for removing surplus nitrogen and phosphorus in Taihu Lake Basin Water[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2008(3):247-250.
- [24] Brentrup F, Küsters J, Lammel J, et al. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology: I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production[J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20:247-264.
- [25] Huijbregts M A J, Thissen U, Guinee J B, et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(4):541-573.
- [26] 王明新, 包永红, 吴文良, 等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5):1127-1132.
WANG Ming-xin, BAO Yong-hong, WU Wen-liang, et al. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in North China Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1127-1132.
- [27] Mann M K, Spath P L. Life cycle assessment of biomass-based electricity production[R]. USA, National Renewable Energy Laboratory, 1997, NREL/TP-430-23076.