

生物天然气全生命周期能耗和温室气体排放分析

刘华财¹, 刘辰宇², 林子豪³, 潘子逸⁴

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州, 510640; 2. 广州市铁一中学, 广州, 511447; 3. 广州市七十五中学, 广州, 510510; 4. 广州市广外附设外语学校, 广州, 510440)

摘要: 生物天然气系统在冬季由生物质热电系统向生物天然气系统供热、保持发酵罐温度的联合系统。为探究生物天然气系统与传统获取天然气方法所带来的环境影响差异, 文章运用生命周期评价方法(Life cycle assessment, LCA)其中包括边界划分、清单分析、各生产阶段的能耗、环境排放计算, 结果与分析, 对生物天然气系统进行环境影响评价并比较两者的环境影响及敏感性因素分析。根据计算结果显示, 从进行能源替代减少环境排放影响的角度来看, 生物天然气系统要优于传统获取天然气方法。

关键词: 生物质, 生命周期, 能耗, 温室气体

Life cycle energy consumption and greenhouse gas emission analysis of bio-natural gas

Liu Huacai¹, LIU Chenyu², Lin Zihao³, PAN Ziyi⁴

(1. Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Resources, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Tieyi Middle School, Guangzhou 511447, China; 3. Guangzhou No. 75 Middle School, Guangzhou 510510, China; 4. Guangzhou Guangwai Foreign Language School, Guangzhou 510440, China)

Abstract: Biogas system is a combined system for heating and maintaining fermentation tank temperature from biomass thermoelectric system to biogas system in winter. In order to explore the difference of environmental impact between bio-natural gas system and traditional natural gas acquisition method, this paper applies Life Cycle assessment (LCA), including boundary division, inventory analysis, energy consumption and environmental emission calculation at each production stage, results and analysis. The environmental impact assessment of bio-gas system was carried out and the environmental impact and sensitivity factor analysis were compared. According to the calculation results, the bio-natural gas system is superior to the traditional natural gas acquisition method in terms of energy substitution and environmental emission reduction.

Key words: biomass, life cycle, energy consumption, greenhouse gas

0 引言

气候变暖, 温室效应, 导致的极端天气等生态问题, 以及日渐枯竭能源导致的能源危机使各国政府越加注重和节约能源, 降低能耗和温室气体的排放。大力发展绿色的可再生能源, 解决能源供需矛盾和减少温室气体排放, 成为了各国政府生态文明建设和绿色可持续发展的

主要目标, 其中采用生物质发电部分替代燃煤发电, 生物天然气部分代替传统天然气是能有效解决这些问题重要途径之一

我国 2021 上半年中国天然气产量为 1044.6 亿立方米, 同比增长 10.9%。2021 上半年中国气态天然气进口数量为 1655 万吨; 中国液化天然气进口数量为 3978 万吨。占总气态天然气进口数量的 59.1%; 进口金额为 2433730936 美元, 占总气态天然气进口金额的 59.7%。从上述数据可以得出, 对于我国面临着天然气过度依赖进口的问题, 我国政府大力促进生物天然气的研究, 将其纳入国家能源系统。然而, 在秸秆, 粪污等生物质能源化利用的过程中, 原料的收储运、发酵、净化以及沼气利用等过程都会直接或者间接排放污染物, 对环境产生一定的影响。

目前我国在生物天然气建设体系方面尚未完善, 生物天然气相关方面的研究存在巨大空缺, 关于生物天然气的生命周期评价更是几乎空白; 文章中的气肥系统是真实存在的工程项目, 于已有的根据其他文献而建立的理想模型不同, 文章更具有真实性和实用性, 对生物天然气的建设发展存在重大意义

因此, 文章基于传统 LCA 方法对气肥系统进行生命周期环境评价, 于开采传统天然气所造成的能耗和大气排放进行对比, 为该系统及生物天然气的建设提供参考。

1 系统介绍

生物天然气项目工程项目主要建设内容包括厌氧发酵罐 8 个、原料预处理间、沼渣沼液池、调节池、沼气净化提纯车间、肥料生产车间、肥料成品库、配套加气子站 2 座及配套公用设施等。项目完成后, 天然气厂年运行时间 7920 个小时, 年处理粪污 9.9 万吨, 农作物秸秆及有机物 11.55 万吨。年产沼气 1980 万 Nm^3 (沼气 CH_4 浓度 54%)。提纯后年产生物天然气 1080 万 Nm^3 (天然气 CH_4 浓度 97%), 年产固体有机肥 5.49 万吨, 年产液态有机肥 6.6 千吨, 年产沼液 80.784 千吨。天然气用于供应 CNG、LNG 配套加气子站及居民日常使用, 有机肥、沼液可用于通辽市有机农业生产。

生物天然气系统中包括制取天然气和制取固液肥两个板块

生物天然气项目工程主要产品包括年产 1080 万立方米生物天然气; 年产 5.49 万吨固态有机肥和 6.6 千吨液体有机肥的肥料。以畜禽粪污和秸秆及有机物质为原料, 采用厌氧发酵、生物脱硫 (碱法) 和压力水洗等工艺生产生物天然气, 厌氧发酵制气后的出料经固液分离系统副产沼渣、沼液, 以沼渣为原料, 采用挤压造粒法工艺生产固态有机肥, 并利以沼液为原料, 采用精滤络合法工艺生产液态有机肥。其中发酵过程供暖由建设于系统旁的热电联产工程中高温高压高速凝汽式汽发电机组的中档温压中产生的部分蒸气送往生物天然气发酵罐供暖。

2 目标与范围定义

生命周期评价方法在目标与范围定义过程中要确定研究的目的、范围及定义相应的功能单元, 即确定需要计入本沼气工程环境评价系统的参数。根据生物天然气系统工程各工艺流程的特点, 划定生命周期起始边界为秸秆和畜禽粪污分别由种植区和养殖场收集至生物天然气系统, 终止边界为生物天然气及沼渣沼液副产品的出厂, 系统边界内的能量流动说明如下:

(1) 秸秆是农作物种植过程中所产生的副产品, 作物生长过程中的能耗以及环境排放不计入系统。(2) 厂房基建所需材料种类多, 不同工程建设建材差异性较大, 建设阶段所产生的排放占系统整体排放比重高, 对于最终评价结果影响的不确定性较大, 不将其计入系统。

综上所述, 具体边界划分见图 1

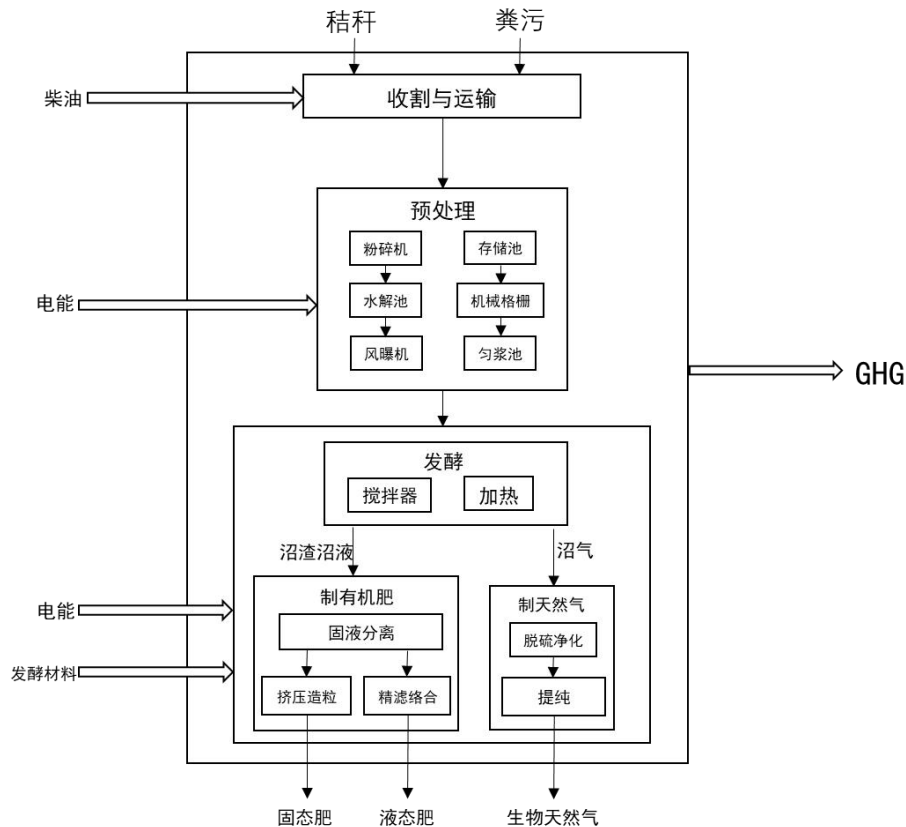


图 1 生物天然气系统生命周期边界划定流程图

3 研究对象

3.1 生物质运输

秸秆和粪污称量过程中需要使用地磅 1 台（0.1kw），主要运输工具为柴油拖拉机，主要消耗能源为柴油，原料运输油耗为 0.03 kg 柴油/（t*km），单车平均运量为 15 t，柴油的热值为 44 MJ/kg。秸秆原料分为干料和湿料两种，干料用于热电联产的燃烧热力发电，湿料用于生物天然气的发酵。秸秆运输平均距离为 70 km，则每年运输所消耗的柴油为 39.46635 万 L，所消耗能量为 1827.822512 万 MJ。在运输阶段，认为污染物排放为柴油在生产和燃烧的过程中的排放。根据柴油生产和燃烧的排放系数，可以计算出运输过程中的污温室气体排放量"GHG 排放(CO2eq)" 为 1440.22 t

表 1 运输阶段主要参数

Table 1 Major parameters and inputs during agricultural phase

项目	单位	数值
粪污原料运输平均距离	Km	30
粪污原料运输车辆数目	辆	4
粪污原料运输车辆成本	万元/辆	33
粪污原料运输单车载量	t/辆	15
粪污原料运输油耗	kg/(t×km)	0.03
粪污含水量	%	90

秸秆原料运输平均距离	km	70
秸秆原料运输车辆数目	辆	50
秸秆含水量	%	65

3.2 生物质预处理

3.2.1 秸秆预处理

采集秸秆为湿料，含水量为 65%，预处理阶段需要秸秆进料箱皮带，均料器，振荡器，传送带，秸秆 BHS 在线粉碎机等设备，将秸秆进行预处理，消耗的电量计入总电力耗能。将处理后的秸秆和回流的沼液放入水解池中，水解池中设立水解池斜搅拌器和水解池立轴搅拌器。水解完毕后经曝气风机，管道切碎机进入进料系统。

3.2.2 粪污预处理

- (1) 存储阶段：直接产生的温室气体排放系数参照文献，CO₂ 为 25 mg/kg，CH₄ 为 0.65 mg/kg。计算可得全年储存逸散 11484"GHG 排放(t CO₂eq)"。
- (2) 粪污含水量为 90%，将收集的猪粪投入化粪池中利用电厂热水提供的热量进行除砂。再将除砂后的猪粪放入机械格栅进行除杂，最后再放入匀浆池中搅拌稀释，随后进入进料系统。

表 2 预处理阶段主要参数及能耗

		用电设备	台数	设备容量	(kx)	(cosφ)	有功功率	设备用电量 (kw.h)
		(kW)		(kW)			(kW)	
1	秸秆进料箱皮带	0.75	4	3	0.8	0.75	2.4	14400
2	秸秆进料箱均料器	7.5	2	15	0.8	0.75	12	72000
3	秸秆进料箱振荡器	1.05	2	2.1	0.8	0.75	1.68	10080
4	进料传送带	5.5	2	11	0.8	0.75	8.8	52800
	秸秆 BHS 在线粉							
5	碎机	90	2	180	0.8	0.75	144	864000
6	BHS 进料传送带	11	2	22	0.8	0.75	17.6	105600
7	水解池斜搅拌器	18.5	2	37	0.8	0.75	29.6	177600
8	水解池立轴搅拌器	30	2	60	0.8	0.75	48	288000
9	曝气风机	37	2	74	0.8	0.75	59.2	355200
10	管道切碎机	12.1	2	24.2	0.8	0.75	19.36	116160
11	机械格栅	0.75	1	0.75	0.8	0.75	0.6	3600
12	匀浆池立轴搅拌器	15	1	15	0.8	0.75	12	72000
合计								2131920

3.3 生物质发酵

3.3.1 发酵罐搅拌

厌氧发酵罐中设立一级罐斜，侧搅拌器，二级罐斜搅拌器，使发酵原材料充分混匀，均匀受热，提高发酵效率。一级罐斜，侧搅拌器，二级罐斜搅拌器功率均为 15kw

3.3.2、发酵罐加热

发酵罐加热时由高温高压高速凝汽式汽轮发电机组的中档温压中产生的部分蒸气供暖，因此过程中不额外产生污染物，发酵罐保温加热热水消耗量为 1743000 吨每年，锅炉供发酵罐保温热水温度为 62°，回水温度为 55°

发酵过程中有温室气体逸出，GHG 排放为 2871.00 (t CO₂eq)"

3.3.3 发酵循环系统

为保证发酵稳定持续运转，因此需要各种泵带动循环。发酵罐循环系统中主要能耗设施包含热储罐热水循环泵，采暖循环泵，预处理循环泵，发酵罐循环泵。保证发酵罐供热，原料供应等问题。

表 3 发酵生产设备用电负荷

	用电设备	台数	设备容量	(kx)	(cosφ)	有功功率
	(kW)		(kW)			(kW)
匀浆池立轴搅拌器	15	1	15	0.8	0.75	12
一级罐斜搅拌器	15	18	270	0.8	0.75	216
一级罐侧搅拌器	15	12	180	0.8	0.75	144
二级罐斜搅拌器	15	6	90	0.8	0.75	72
一级厌氧罐出料泵	22	2	44	0.8	0.75	35.2
二级厌氧罐出料泵	22	2	44	0.8	0.75	35.2
总功率						514.4

3.3.4 固液分离

厌氧发酵罐中的沼液渣混合物通过一二级厌氧罐出料泵送往固液分级机

目前所使用液态的动物粪便的固液分离机一般是采用筛分式固液分离，固液分离后沼液进入沼液暂存池，沼渣通过沼渣传送带前往冷干机，暂存池设置搅拌机防止凝固，一部分沼液通过回流泵回流到水解池，另外一部分进入到沼液池。

发酵结束后得到的沼渣经过冷干机将出料沉淀中的水分脱除得到绝干沼渣。

3.4 沼气制备天然气

3.4.1、沼气脱硫除杂

沼气脱硫可脱去沼气中含有的硫元素防止所制备的天然气在使用时产生有害气体造成不良影响

脱硫除杂时脱硫所用设备归为脱硫系统。

3.4.2、沼气提纯与净化

沼气 CH₄ 浓度为 54%，未达到天然气浓度 CH₄ 要求，不便于运输与使用，故此需要对沼气进行提纯与净化

沼气制备生物天然气提纯净化阶段选用设备归为沼气提纯系统

提纯后的沼气转换为天然气，CH₄ 浓度为 97%。

3.5 沼渣沼液制有机肥

3.5.1 挤压造粒

固液分离后，将得到沼渣利用自然风干，通过挤压造粒制成颗粒状的有机肥料，，制备固肥生产过程中所消耗能量归为“固肥”一项，制固肥过程中需要消耗材料，主要为添加剂（秸秆粉）29160t/a，腐殖酸钠 132t/a 和磷酸一铵 1386t/a

由文献[x]“混凝法制备渗滤液腐殖酸肥料及其评价”可得，1t 腐殖酸钠生产过程中需消耗 24.15kwh，产生 CO2 41.76kg,

参考 N 肥生产过程，粗略估算出 1t 磷酸一铵产生 CO2 522kg，消耗 121300kwh，

3.5.2 精滤络合

固液分离后，将得到沼液通过精滤络合装置，包含液体泵，过滤网。运用沼液浓缩做液体肥设备进行自动泵送，制备液态肥生产过程中所消耗能量归为“液肥”一项。

制生产液肥过程中需要消耗材料，主要为微量元素 66t/a，硫酸钾 660t/a，脱盐水 1386t/a 和新鲜水 54252t/a

由参考 K 肥生产过程，粗略估算出 1t 硫酸钾产生 262kgCO2，消耗 1378000kwh

表 4 制肥过程能耗及排放换算

设备名称	380V	工作	380V	需用系数	功率因数	计算负荷	设备用电 量 (kwh)
	用电设备	台数	设备容量	(kx)	(cosφ)	有功功率	
	(kW)		(kW)			(kW)	
固液分离机	5.5	8	44	0.8	0.75	35.2	281600
沼液暂存池搅拌机	15	2	30	0.8	0.75	24	192000
沼渣传送带	15	1	15	0.8	0.75	12	96000
沼液回流泵	22	2	44	0.8	0.75	35.2	281600
沼液泵	4	2	8	0.8	0.75	6.4	51200
脱硫系统	100	1	100	0.8	0.75	80	640000
沼气提纯系统	1000	1	1000	0.8	0.75	800	6400000
有机肥除臭	610	1	610	0.8	0.75	488	3904000
固肥	750	1	750	0.8	0.75	600	4800000
液肥	130	1	130	0.8	0.75	104	832000
合计							17478400

表 5 全厂照明负荷能耗及排放换算

序号	建筑物名称	计算负荷	平均日照明	年照明时间	年 耗 电
		(kw)	时间(h)	(d)	(kwh)
1	原料预处理	12.48	12	330	49420.8
2	厌氧发酵	7.78	12	330	30808.8
3	沼气脱硫	1.9	12	330	7524
4	固液分离	1.41	12	330	5583.6
5	沼气提纯压缩	12.29	12	330	48668.4
6	有机肥生产厂房	74.37	12	330	294505.2
7	包装及成品库房	13.44	12	330	53222.4
	合计				489733.2

4 结果与分析

4.1 生命周期不可再生一次能源消耗

生物天然气系统全生命周期不可再生一次能源消耗及各类资源能耗 见表 6 和图 1。见表 8 与传统天然气系统 40.6 MJ/m³ 的能耗相比,生物天然气系统能耗为 29.3 MJ/m³。使用替代传统天然气,可节约 27%的化石能源消耗,表明生物天然气系统具有较高的可再生性和良好的可持续性。若考虑生物天然气生产过程中产生的有机肥,将其计为收益的一部分,则可节约化石能源消耗 58.5%。

由表 7 可得,生物天然气系统全年总排放为 38645t CO₂,能耗为 251403726.20MJ,将收益归为所生产生物天然气折合为化石天然气生产过程中的能耗和温室气体排放及沼肥折合为化肥生产过程中的能耗和产生的排放,计算得每年可收益 41118.84 tGHG 温室气体排放,606632400MJ 能耗,可得每年净节约(净收益)355228674MJ 能耗,2473 tGHG 温室气体排放

表 6 全生命周期能耗及 GHG 排放细目

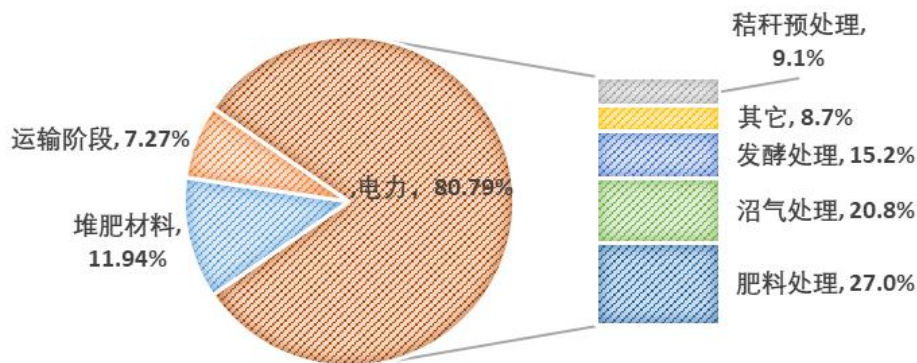
项目	单位	数值	能 耗 强 度 (GJ/ 万 元 、 MJ/kg 肥 料、MJ/L 柴 油 、 MJ/MJ 电力)	GHG 强 度 (t CO ₂ -eq/ 万 元、kg/kg、 kg/L 、 kg/kWh)	能耗(MJ)	GHG 排放 (t CO ₂ eq)	能耗占比	GHG 排放 占比
堆肥材料	kg	838203.9				2247.76	11.94%	5.50%
运输阶段	L/年	394663.5	46.31	3.65	18278225.12	1440.22	7.27%	3.52%
电力	kWh	21403708	9.49	0.96	203112635.03	20602.53	80.79%	50.38%
发酵逸散排放						2871.00		7.02%
堆肥逸散排放						11484		28.08%
合计					251403726.20	38645		

表 7 生物天然气系统排放与收益对比

总量	能耗(MJ)	GHG 排放 (t CO ₂ eq)
排放(生物天然气及沼肥) 煤电	251403726.20	38645
排放(生物天然气及沼肥) 生物质电	50760000	18964.8
收益(对应化石天然气及化肥)	606632400.00	41118.84

表 8 生物天然气与传统天然气每立方米对比

	MJ/m ³ 天然气	co ₂ g/m ³ 天然气
生物质天然气（煤碳发电）	23.3	3578
生物天然气（生物质发电）	4.7	23.3
替代化石天然气	40.6	2552
替代化肥收益	15.5	1457
总收益	56.2	4008



图一 一次化石能源消耗各阶段占比图

在生产过程各环节中，肥料处理的能耗最高，其次是沼气提纯制天然气阶段，发酵阶段，堆肥材料所需，预处理阶段，其他（照明及系统的配套设施等）和运输阶段。

制有机肥阶段的能耗占比最大，制有机肥阶段包括肥料处理的电力消耗和堆肥材料两个部分的能耗，共占比系统生命周期能耗的 38.94%。肥料处理所需的能耗在各细目中最多。肥料作为生产环节中的副产品，制造目的是为了充分利用原材料，节约能源减少能耗，通过计算与统计可得生产肥料的能耗为 97896610MJ，收益为 167774400MJ，净收益为 69877790MJ，相当于减少了系统 27.79% 的能耗，故此推断制有机肥阶段对生物天然气的节能性起重要作用。

运输阶段占总能耗的 7.27%，主要能耗为柴油能耗 46.31 MJ/柴油。运输阶段的柴油是运输消耗，为柴油拖拉机供能。柴油年消耗 394663.5L，折合为 331.64t 柴油。柴油的消耗主要由运输距离和运输重量决定，运输重量为定值难以改变，而玉米秸秆的运输距离长达 70 km，而粪污原料运输平均距离为 30km，考虑能否降低原料运输的距离是降低运输能耗的关键。除运输外还有地磅称量秸秆，所消耗能源不大但不容忽视，但在过程式 LCA 研究中容易被忽略。

提纯制天然气阶段的能耗来自设施的运行和保养，占总能耗的比例高达 20.8%，在各细目中占比第二，占电力部分能耗的 25.74%。提制天然气主要是将发酵产生的沼气中的硫化物去除并提高其 CH₄ 浓度，本文统一归为沼气提纯装置，设备容量为 1000kw。

预处理阶段的能耗占比 9.1%，主要分为预处理过程中的生物质传送和处理，处理阶段由于原料种类的不同，其对应装置也会改变，该阶段中占主要能耗的是秸秆预处理的粉碎装置年用电量 864000kwh 和粪污的搅拌曝风装置，年用电量 820200kwh。

发酵阶段的能耗分为搅拌和加热两部分，所产生能耗主要由搅拌产生，加热部分由配套的热电联产系统中产生的中档蒸汽提供，可以看作不产生污染。

生物天然气系统以为生产设备供电为主，除运输阶段外都需要大量电能消耗，电力消耗在生产过程中占比巨大，占比总能耗的 84.75% 其次是堆肥材料生产过程中产生的能耗 9.48% 和运输阶段的柴油的能耗。

堆肥材料主要分为 N 肥和 P 肥，因为缺乏细致数据，部分化合物生产过程中所造成的排

放和能耗折合成对应肥料进行计算，大部分国家以天然气为原料生产氮肥，而中国的主要原料是无烟煤，生产过程中所需要的电力和蒸汽也主要由燃煤提供，且合成氨-氮肥的生产企业仍有大部分是中小企业^[17]，技术水平相对较低，以上原因造成中国 N 肥生产能耗居高不下，随着 N 肥企业的大型化和产业技术水平提升，N 肥的生产能耗有望快速降低

3.2 生命周期 GHG 排放

生物天然气系统全生命周期 GHG 排放见表 6 和图 2。与传统天然气 2552 CO₂ g/m³ 的 GHG 排放^[8]相比，生物天然气 GHG 排放为 3578 CO₂ g/m³。在不计入沼肥收益的情况下，生物天然气排放较传统天然气更高。

见图 2 可得，生物天然气在 GHG 排放方面电力部分占比依旧最多，其次是堆肥逸散，发酵逸散，堆肥材料和运输阶段。占总排放的比例分别为 53.31%,29.72%,7.43%,5.82%和 3.73%。

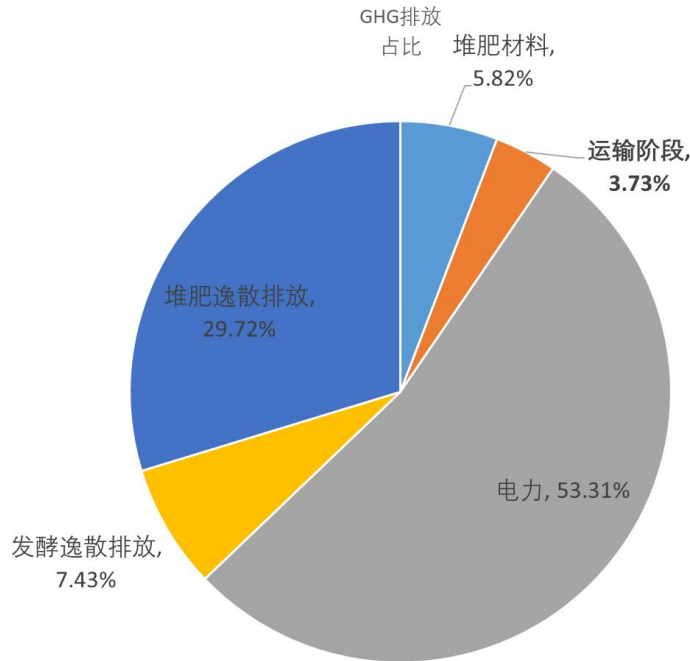


图 2 GHG 排放各阶段占比图

电力部分内各环节的电能占比同一次化石能源消耗。电力消耗在系统中占据主要部分，为减少能耗和 GHG 排放，我们应当尽可能减少电力的消耗，在目前系统中用电设备繁多，用电需求大，故可以尝试降低用电成本，将传统煤炭发电转为生物质秸秆发电，减少其电力来源的 GHG 排放。通过[13][14]可得出秸秆发电与煤炭发电能耗及 GHG 排放强度，归纳为表 9，由表 9 可计算出表 7 表 8 数据。

表 9 秸秆发电与煤炭发电能耗及 GHG 排放强度对比

	能耗强度 MJ/MJ 电力	GHG 强度 kg/kg
煤电发电	9.49	0.96
秸秆发电	0.12	0.043

由表 7 表 8 可以看到秸秆发电相较于传统煤炭发电节能减排效益巨大，净收益从 355228674MJ 能耗，2473 tGHG 温室气体排放增加到 555872400MJ 能耗，22154.04tGHG 温室气体排放。节约化石能源约 91.63%，减少 GHG 排放约 99.4%。证明生物天然气系统与生物

质发电结合具有巨大的前景,对节能减排方面有重大价值与意义。

因此可以在生物天然气系统周边建立秸秆发电工程,为生物天然气系统提供电力,同时将秸秆燃烧发电中产生的多余热能通过水汽形式为生物天然气的发酵提供热能,达到节能减排目的,实现合理利用。

其次,可以缩小产业规模,使产业集中化,缩小各环节间的距离,可减少传送材料而导致的电力消耗。同时减少不必要的环节与配套措施,尝试将耗能大的设备进行替换,在效率功能不改变的情况下,减少其电力消耗以减小其能耗和排放。

堆肥逸散排放占比 29.72%,在全生命周期中排第二,堆肥逸散指发酵结束后将得到的沼渣进行堆积期间,其内逸散出的温室气体所产生的排放。发酵过程中也会产生温室气体,发酵罐非全密封,有部分温室气体逸散到大气中。堆肥逸散排放同发酵逸散排放一样,温室气体总量较小且难以收集,无法进行有效的改进和处理,故此在改进方面通常不考虑逸散所导致的排放。

堆肥材料中相关的排放包括 N,P,K 肥生产排放导致的排放,其排放占总排放的 5.82%。本文章通过将发酵材料转化折合为对应的元素肥料,计算肥料生产过程中产生的能耗和排放。对于 N,P,K 肥生产,中国的主要原料是无烟煤,生产过程中所需要的电力和蒸汽也主要由燃煤提供,且合成氨-氮肥的生产企业仍有大部分是中小企业[17],技术水平相对较低,导致生产过程中 GHG 排放大。

运输阶段在全生命周期中占比最小,但不可忽视,通过缩短原材料和工厂的距离可以减少道路上柴油的消耗。也可以改进运输方式,将温室气体排放较大的柴油拖拉机改为更加环保的新能源载具,保证新能源产生的排放比柴油低,就可以达到减排目的。

与传统天然气相比,生物天然气项目每年可节约一次化石能源 355228674MJ, 2473 tGHG 温室气体排放。若将煤炭发电改为生物质发电,净收益将从 355228674MJ 能耗, 2473 tGHG 温室气体排放增加到 555872400MJ 能耗, 22154.04tGHG 温室气体排放。证明生物天然气和生物质发电是处理农林废弃物的最佳方式之一,将在实现节约/替代化石能源、降低 GHG 排放和发展绿色循环经济中发挥更重要的作用。

5 结论

基于对生物天然气系统的 LCA 分析,得出以下结论:

- (1) 与传统天然气系统 40.6 MJ/m³ 的能耗相比,生物天然气系统能耗为 29.3 MJ/m³。使用替代传统天然气,可节约 27% 的化石能源消耗,表明生物天然气系统具有较高的可再生性和良好的可持续性。若考虑生物天然气生产过程中产生的有机肥,将其计为收益的一部分,则可节约化石能源消耗 58.5%。
- (2) 每年可收益 41118.84 tGHG 温室气体排放, 606632400MJ 能耗,可得每年净节约(净收益) 355228674MJ 能耗, 2473 tGHG 温室气体排放
- (3) 生产肥料的能耗为 97896610MJ, 收益为 167774400MJ, 净收益为 69877790MJ, 相当于减少了系统 27.79% 的能耗,故此推断制有机肥阶段对生物天然气的节能性起重要作用
- (4) 发酵阶段的能耗分为搅拌和加热两部分,所产生能耗主要由搅拌产生,加热部分由配套的热电联产系统中产生的中档蒸汽提供,可以看作不产生污染。
- (5) 可以尝试降低用电成本,将传统煤炭发电转为生物质秸秆发电,减少其电力来源的 GHG 排放。秸秆发电节能减排效益巨大,因此可以在生物天然气系统周边建立秸秆发电工程,为生物天然气系统提供电力,同时将秸秆燃烧发电中产生的多余热能通过水汽形

式为生物天然气的发酵提供热能，达到节能减排目的，实现合理利用。

- (6) 缩小产业规模，使产业集中化，缩小各环节间的距离，可减少传送材料而导致的电力消耗。同时减少不必要的环节与配套措施，尝试将耗能大的设备进行替换，在效率功能不改变的情况下，减少其电力消耗以减小其能耗和排放。
- (7) 堆肥逸散排放同发酵逸散排放一样，温室气体总量较小且难以收集，无法进行有效的改进和处理，故此在改进方面通常不考虑逸散所导致的排放。
- (8) 缩短原材料和工厂的距离可以减少道路上柴油的消耗。也可以改进运输方式，将温室气体排放较大的柴油拖拉机改为更加环保的新能源载具，保证新能源产生的排放比柴油低，就可以达到减排目的。

参考文献

- [1] 刘华财, 吴创之, 谢建军, 黄艳琴, 郎林, 阴秀丽, et al. 生物质气化技术及产业发展分析.
- [2] 童韩杨, 沙小斌, 孟芳, 来世鹏, et al. 生物天然气生产技术与商业化模式可行性探讨. 能源与节能, 2021, 193 (10): 55-57
- [3] 吴媛媛, 常旭宁, 张佳维, et al. 基于 LCA 方法的秸秆沼气发电和制备生物天然气的环境排放评价. 中国沼气, 2020, 38 (1): 59-65
- [4] 李丹阳, 胡洁, 董颐玮, 靳红梅, et al. 规模奶牛场 2 种粪便处理模式的生命周期评价, 生态与农村环境学报, 2021, 37 (2): 257-264
- [5] 刘俊伟, 田秉晖, 张培栋, 李秀金, et al. 秸秆直燃发电系统的生命周期评价, 可再生能源, 2009, 27 (5): 102-106
- [6] 党乐, 佟敏, 崔亚茹, 刘华财, 邱泽晶, 胡文博, et al. 中国农业沼气生命周期评价
- [7] 王培刚, 秸秆直燃发电供应链气体及颗粒污染物排放的生命周期评价, et al. 农业工程学报, 2017, 33 (14): 229-237
- [8] 黄先玉, 刘沛然, 生命周期评价, et al. 广州环境科学, 1999, 14(3): 1-3
- [9] 孙柏铭, 严瑞, et al. 生命周期评价方法及在汽车代用燃料中的应用, 技术, 经济, 1998(7): 34-39
- [10] 田亚峥, 郑泽根, 生命周期影响评价权重系数的确定方法探讨, 重庆建筑大学学报, 2003, 25 (5): 61-64
- [11] 林琳, 赵黛青, 魏国平, 刘尚余, 生物质直燃发电系统的生命周期评价, 水利电力机械, 2006, 28[12]: 18-23
- [12] 杨建新, 王如松, 刘晶茹, 中国产品生命周期影响评价方法研究, 环境科学学报, 2001, 21 (2): 234-237
- [13] 刘俊伟, 田秉晖, 张培栋, 李秀金. 秸秆直燃发电系统的生命周期评价[J]. 可再生能源, 2009, 27(05): 102-106.
- [14] 王培刚, 秸秆直燃发电供应链气体及颗粒污染物排放的生命周期评价