

# 湖州市餐厨垃圾产沼气发电能值分析

赵荣哲<sup>1\*</sup>, 贾如月<sup>2</sup>, 胡术刚<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

<sup>2</sup>德州市黄河流域生态保护和高质量发展促进中心, 山东 德州

收稿日期: 2022年11月10日; 录用日期: 2022年12月9日; 发布日期: 2022年12月26日

## 摘要

为实现餐厨垃圾资源化利用, 依托湖州市餐厨垃圾产气试点项目, 采用能值分析方法分析了湖州市餐厨垃圾产沼气发电和火力发电的环境影响。结果表明: 基于能值分析方法, 列出两种发电模式的能值输入输出表, 并选取了五个能值指标进行计算分析, 其中, 餐厨垃圾生产沼气进行发电的能值转换率约占到传统火力发电的十分之一, 环境负载率(ELR)低于火力发电的81.52%, 可再生指数(PR)高于火力发电的75%, 能值产出率(EYR)和环境可持续性指数(ESI)也都高于火力发电。

## 关键词

餐厨垃圾, 产沼气发电, 火力发电, 能值转化率

# Energy Value Analysis of Biogas Generation from Kitchen Waste in Huzhou City

Rongzhe Zhao<sup>1\*</sup>, Ruyue Jia<sup>2</sup>, Shugang Hu<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Dezhou Yellow River Basin Ecological Protection and High Quality Development Promotion Center, Dezhou Shandong

Received: Nov. 10<sup>th</sup>, 2022; accepted: Dec. 9<sup>th</sup>, 2022; published: Dec. 26<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to realize the resource utilization of kitchen waste, based on the pilot project of kitchen

\*第一作者。

#通讯作者。

waste gas production in Huzhou City, the energy analysis method was used to analyze the environmental impact of biogas and thermal power generation from kitchen waste in Huzhou city. The results showed that: Based on the energy analysis method, the energy input and output tables of the two power generation modes are listed, and five energy indexes are selected for calculation and analysis. Among them, the energy conversion rate of biogas produced by kitchen waste for power generation accounts for about one-tenth of that of traditional thermal power generation, and the environmental load rate (ELR) is lower than 81.52% of that of thermal power generation. The renewable index (PR) is higher than 75% of thermal power generation, and the energy rate (EYR) and environmental sustainability index (ESI) are also higher than thermal power generation.

## Keywords

Kitchen Waste, Biogas Generation and Power Generation, Thermal Power Generation, Energy Value Conversion Rate

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

伴随我国经济以及技术的迅速发展、城市居民生活水平和消费水平的日益提升，餐饮行业的发展也被带动起来，然而以餐厨垃圾为主的生活垃圾产生量也随之增加。据我国统计局调查数据显示，2019年中国城市垃圾总清运量达到24,206万吨。在城市生活垃圾中，餐厨垃圾就占到60%左右[1]。迄今为止，国内外餐厨废弃物的处理工艺大致含有填埋技术[2]、焚烧[3]、厌氧发酵技术[4][5]、好氧堆肥工艺[6]、饲料化[7]、湿解[8]、生物法[9]等技术，其中焚烧、填埋、堆肥等传统处理方式无论在环境效益还是经济效益上都已经无法适应时代以及现实背景的要求，对餐厨垃圾的资源化进一步探究便尤为重要[10][11]。所以，中国仍需在处理餐厨垃圾方面继续探索，以找寻出适合我国的餐厨垃圾处理之路。

浙江省湖州市餐厨垃圾处理项目是浙江省第一批餐厨垃圾试点项目，也是浙江省第一批试点项目中第一个率先投入运营的项目。该项目实现了厨余工艺生产线的创新，具有非常高的示范性，另外，项目通过智能生产控制系统(MES)、智能安防系统、大数据分析系统等诸多高新型技术的投入，满足了餐厨废弃物从排放、收运、处理全周期的监控管理与运行。

建厂地址位于现湖州市南太湖垃圾焚烧发电厂内，该厂址距市区和织里镇约15 km，距南浔区约30 km。所建场地位于湖州市和孚镇长超村境内。本项目供水系统主要有生活用水和生产用水，距厂址北侧300 m远处有九里长塘河流过，根据湖州市水利局水资源办公室对湖州垃圾焚烧发电工程在九里长塘取水意见，本工程拟在九里长塘叶家漾段取水。九里长塘属杭嘉湖水网众多河流之一，上接和孚漾、东泊漾，下接嶂塘，中间与菱湖塘沟通，并通过入湖港与太湖相连。场地存储的雨水主要通过厂区内的相应排放设施进行排放。本项目产生的污水输送到厂内的污水系统进行处理后，集中排入市政污水管网。餐厨垃圾运输采用公路运输，餐饮垃圾由专用餐厨收运车运至电厂、厨余垃圾运输车由环卫部门负责配备。综合有关资料分析，湖州市餐厨垃圾的现状：伴随湖州市环境监管力度的加强以及环境保护设施的完善，湖州市主要城区的垃圾处置已经形成控制源头、中间运输以及末端处置一体化体系。但截至目前，湖州市餐饮业网点已发展到一万余家，大量的餐厨垃圾通常被忽视，并没有被及时有效的处理。本文从能值

角度对潮州市餐厨垃圾产沼气发电项目进行投入 - 产出分析。

## 2. 餐厨垃圾产沼气发电能值分析

### 2.1. 能值分析方法的概念及步骤

能值分析最早诞生于二十世纪七十年代,是由奥德姆(H. T. Odum)研究的一种把能量作为研究中心的分析评价方法,到二十世纪八十年代末,Odum 发现不同物质间由于等级差异即能质,导致低能级的能质较低,高能级的能质较高。因此,能值的概念就是建立在能质基础上的。能值分析是一种基于热力学理论的环境核算方法,它可以通过跟踪资源、产品或服务的能量热力学转换路径来实现系统的可持续评估[12] [13]。基于能值分析特定的代数规则,将消耗的一次性资源、劳动力、生产力、设备建设、资金投入等各种因素统一转换成单一的能值单位: sej。这样,能值分析可以完成不同因素的时空整合。它适用于分析由人类经济活动和自然环境演变交替形成的复杂生态系统能值分析方法的提出极大解决了困扰研究者们长期以来的不同性质、不同类型物质不可简单加减相比较的问题。能值(Emergy)的英文名称是由能量(Energy)英文拼写字母演变而来的,能值就是将一种流动的不稳定的能量转化成另外一种统一的能量,它实际上是一种包含能(Embodied energy) [14] [15],由于地球上所有的类型的能量都会不同程度的起源于太阳能,因此 Odum 就把太阳能为基准来评价不同类型能量的能值,进一步对整个生态系统中的不同类型的能量输入输出做出比较。

能值转换率是每单位某种类型的能量(单位为 J)或物质(单位为 g)所拥有的能值量。运用能值转换率可以将不同类型的、不同阶段的能量转换成相同标准下的值进行定量分析比较[16]。除此之外,能值分析方法中还涉及多个概念及功能单位,如表 1 所示。

**Table 1.** Concepts involved in energy analysis

**表 1.** 能值分析涉及的概念

概念名称	定义	单位
太阳能值	产品或劳务在形成过程中投入的太阳能	sej
太阳能值转化率	单位物质或能量所含太阳能数量	sej/g 或 sej/J
有效能	具有做功能力的潜能(数值随做功进行而减小)	J
太阳能值功率	单位能值的太阳能值流量	sej/a
能值货币比率	单位货币相当的能值数量	sej/\$
能值货币价值	能值相当的市场货币价值	\$

实际上,能值的计算结果就是各种能的物流量与能值转换率的乘积,其基本表达式为:

$$M = T \times E \quad (1)$$

式中:  $M$  代表太阳能值,单位是 sej;  $T$  代表了能值转化率;  $E$  代表了其他可用能[17]。

能值分析目标体系有四个阶段。包括:资料收集过程、能值系统图的绘制过程、能值分析表的编制过程、能值指标的确定过程、能值综合结构图的构建过程、系统动态的模拟以及系统发展评价过程。其中,常规的能值分析框架由前四部分组成[15]。

#### 1) 资料收集

通过实地调查、网上搜集等渠道进行信息资料的采集,本文主要是在生命周期评价方法确定的系统边界内进行调研,研究的范围与生命周期评价方法的范围一致。然后对收集到的材料进行分类整理。

#### 2) 能值系统图的绘制

运用 H T Odum 的“能量系统语言”图例来画能值系统图, 确定主要组件、组件之间的相互关系以及物质流和能量流[18]。本文以餐厨垃圾产沼气发电为线路, 对该周期的能量及物质输入输出情况进行分析。

### 3) 能值分析表的构建

建立一个能值分析表目的是确定研究系统范围内的主要能量及资源的输入情况、自然生态系统的输出情况。

### 4) 能值指标体系的确定

建立能值指标体系, 在该指标的基础上, 对所选指标进行计算归纳。因实际案例中的干扰因素不同, 指标的倾向性也会有所偏差, 导致最终的评价指标也不尽相同。完成上述工作后, 对所有的测量结果进行汇总归纳, 充分考虑系统的可持续性, 并提出相应的优化方案。

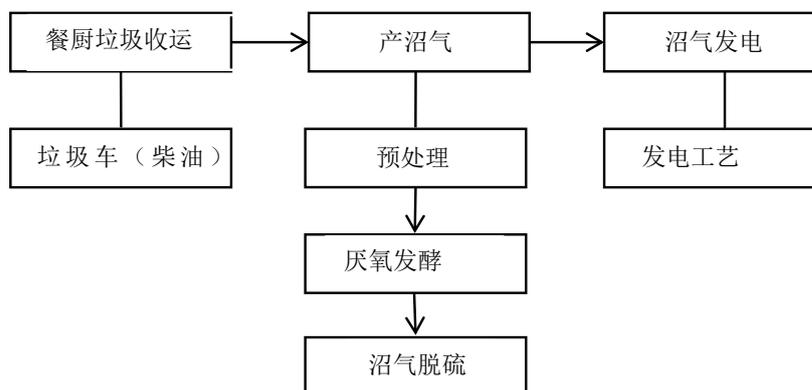
## 2.2. 能值分析方法的应用

能值理论分析方法目前已经应用于工农业、经济系统、旅游等领域, 用以评价生态经济系统中的经济、环境、资源消耗等情况[19]。Ajun, Wan [20]应用能值分析方法对农村环境附加值评价体系进行构建并实证研究。Ali, Mustafa [21]借助能值分析方法对巴基斯坦某医院的医疗废物进行了能值潜值分析, 并对现有的废物回收利用方法进行了比较。Shima Yazdani 等人[22]运用能值分析方法对天然气发电厂与燃烧城市固体废弃物发电厂进行比较, 得出后者更为有效, 对环境的影响更小。Mustafa Ali 等人[23]评估了布尔萨水电站项目的可持续性, 能值分析方法被用来从整体上确定大坝建设前后的生态系统变化, 结果表明大坝的建设会对生物量、沉积物等带来负面影响。Sherwin Amini 等人[24]利用能值分析和模糊逻辑结合的方法对伊朗某省的水稻生产进行生态可持续性评价, 得出水稻生产的总能为  $5.34 \times 10^{16}$  sej ha<sup>-1</sup>。在国内, 能值分析方法应用在农业、能源等方面。朱君[25]运用能值分析理论分析广河县农田生态系统的产入及产出情况, 得出可持续发展系数几乎都小于 1, 表明该县能值产出低而环境负荷高。杨慧[26]基于能值分析对木薯资源化制备燃料乙醇系统进行了分析, 肯定了能值分析方法在植物型生物质能可持续评价方面的价值。钟颖等人[27]采用生命能值分析方法对稻蛙生态种养模式生产系统进行评价分析, 选取 5 项指标评价其能值效率, 与其他系统相比, 稻蛙生态种养模式生产系统环境负荷小, 能值可持续指标较为可观, 可持续发展性高。因此, 能值分析方法在餐厨垃圾资源化领域具有很大的拓展空间。

## 3. 项目分析

### 3.1. 范围界定及数据来源

该能值分析研究系统是从湖州市餐厨垃圾的收运开始, 经破碎除杂等一系列预处理后进入厌氧发酵系统产出沼气, 然后对产生的沼气脱硫除杂进一步净化, 最终将净化的沼气进行发电。本文就是围绕这一全周期, 对全过程的消耗排放做出评价。本文主要采用能值分析方法对沼气发电与火力发电两种发电模式进行比较分析。其中沼气发电整个周期的数据来源于湖州市餐厨垃圾资源化工程项目, 传统的火力发电数据主要通过查阅相关文献, 综合整理得知。项目工程中基建用到的材料种类复杂, 不同阶段的工程建设建材也参差不齐, 这导致最终的评价结果有很大的不确定性, 因此不将其计入评价系统。考虑到后续要把餐厨垃圾厌氧产沼气发电与传统的火力发电进行对比, 所以厌氧发酵后的沼液、沼渣暂时不作为本次研究的内容。整个餐厨垃圾资源化生产沼气发电系统的生命周期范围, 是以湖州市各个场所产生的餐厨垃圾为起点, 将这些餐厨垃圾经过一系列处理过程: 餐厨垃圾收运、预处理、厌氧发酵生产沼气、沼气脱硫净化到最终的沼气发电所产生的排放为终点。湖州市餐厨垃圾资源化处理项目的生命周期评价的系统边界划分如图 1 所示。



**Figure 1.** System boundary diagram  
**图 1.** 系统边界图

湖州餐厨废弃物资源化利用项目日处理量为 400 t/d, 日产沼气  $2.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 沼气发电效率为 1.8 KW·h。该研究以发电量 1000 KW·h 为功能单位, 来计算后期两种发电模式造成的环境影响排放情况。

项目中餐厨垃圾的收运环节采用两班倒的制度, 每个班次工作 8 小时。生产周期为 365 天, 执行国家法定的假期。根据《城市环境卫生专用车辆管理规定》湖州市餐厨垃圾收运过程中的人员配置情况如下:

- 1) 驾驶工作人员以每辆车 1.3 人进行计算, 需要 43 人;
- 2) 运行工作人员以每辆车 1.3 人进行计算, 需要 43 人;
- 3) 维修工作人员(不考虑车辆大修以及三级保养的责任)以每辆车 0.7 人进行计算, 需要 23 人;
- 4) 管理人员: 以 2 人进行计算。

具体的人员配置表见表 2。

**Table 2.** Personnel configuration table  
**表 2.** 人员配置表

职务	人数
管理人员	2
司机	43
维修人员	23
作业人员	43
合计	111

收运系统的操作系统较为复杂, 其主要的投资项目主要包括: 收运车、垃圾收集桶、维修及工具费用, 具体额度见表 3。

**Table 3.** Estimation of major equipment investment in receiving and transporting system  
**表 3.** 收运系统主要设备投资估算

名称	经济指标			
	单位	数量	单价(万元)	合计(万元)
3 t 餐厨垃圾收运车	辆	14	35.00	490.00
5 t 餐厨垃圾收运车	辆	19	48.00	912.00

Continued

班车	辆	1	60.00	60.00
工程车	辆	4	20.00	80.00
120 L 餐厨垃圾收集桶	个	12000	0.03	360.00
维修设备与工具	套	1	60.00	60.00
合计				1962.00

利用沼气发电的各方面投资情况如表 4 所示。

**Table 4.** Biogas power generation list (10,000 m<sup>3</sup>/d)

**表 4.** 沼气发电清单(10,000 m<sup>3</sup>/d)

沼气用途	发电
设备投资(万元)	500.00
土建投资(万元)	30.00
全部投资(万元)	530.00
项目产能(万元/a)	438
直接成本(万元/a)	10
设备折旧(万元/a)	30
设备维修(万元/a)	9
净收益(万元/a)	389

收运系统结束后，净化后的沼气进入厌氧发酵系统，该系统是沼气发电的核心部分，所需要的设备要求以及环境要求都比较高，其中厌氧发酵过程的投资清单如表 5 所示。

**Table 5.** Anaerobic fermentation unit equipment

**表 5.** 厌氧发酵单元设备

设备名称	型号	参数	功率 (KW)	数量	单位
厌氧反应罐	TR-4000	4000 m <sup>3</sup> 拼装罐，ATOM 防腐	—	4	套
CSTR 顶搅拌装置	DJ-22	14 r/min，输出主轴、罐内主轴、桨叶、下轴承座、紧固件等均为不锈钢	30	4	台
CSTR 加热系统	—	DN50，5 组(每组 3 圈)不锈钢，950 米	—	4	套
保温系统	—	岩棉：罐壁 200 mm，罐顶 200 mm 厚、容重 70 kg/m <sup>3</sup> ，彩钢 0.5 mm，现场安装	—	4	套
正负压保护器	—	DN150 不锈钢	—	4	套
阻火器	DN150	主体碳钢，内芯不锈钢，DN150，介质沼气	—	4	套
出料泵	M40THS-B	Q = 80 m <sup>3</sup> /h，P = 0.3 MPa	7.5	4	台

餐厨垃圾收运开始，直至研究的边界即沼气发电，各种设备的运行与维护、每个阶段的实施都需要水来供应，该项目的用水来源以及每天的用水量见表 6。

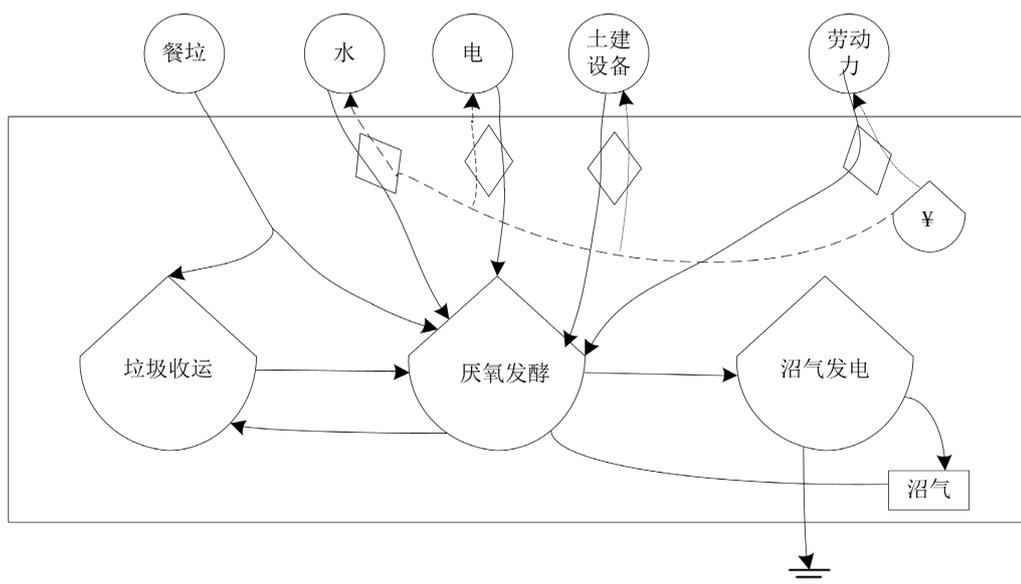
**Table 6.** Industrial water use  
**表 6.** 工业用水情况

用水项目	日用水量/m <sup>3</sup>
生活用水	7
地面冲洗水	3
洗车用水	6.5
设备冲洗水	2
沼气预处理用水	0.1

一般而言，沼气发电以及火力发电的能值输入包含两部分：一部分是获取于自然界中已存在的自然环境资源即无偿能值，比如，可更新自然资源 R 和不可更新自然资源 NR，另外一部分则是需要购买的经济能值，包括购买的可再生有机能 RP 以及购买的不可更新资源 NP，能值输出以电为主进行分析[28]。

### 3.2. 能值系统图

在研究边界范围内，两种发电模式的输入输出情况可以用 Odum 研究的能量系统语言形象地描绘出来，详见图 2。



**Figure 2.** System diagram of biogas generation energy value from kitchen waste  
**图 2.** 餐厨垃圾产沼气发电能值系统图

### 3.3. 能值分析表

能值分析表是根据两种发电模式的输入输出原始数据，应用能值转换率，统一转化为太阳能能值，以初步评判它们在整个系统中的作用。湖州市餐厨垃圾资源化项目对厌氧发酵产生的沼气进行发电处理，其输入的主要可再生资源即为餐厨垃圾，其它输入端还包括年用水量、年设备投资、年维修费用等。输出主要为沼气生产的电(除去过程中消耗的部分)。能值转换率可从相关文献中查得，能值基线目前有六种不同标准，本文采用的是采用的是最新的能值基线[29]： $(12.0 \times 10^{24} \text{ sej/year})$ 。所研究的能值转换率都以基线为准，转换公式为：

$$Tr_{new} = Tr_{old} \times \frac{\text{新能值基线}}{\text{旧能值基线}} \quad (1)$$

式中,  $Tr_{new}$  为新能值转换率;

$Tr_{old}$  为旧转换率

输入的能值计算为:

$$E_{mi} = E_i \times T_{ri} \quad (2)$$

式中,  $E_{mi}$  是第  $i$  种物质或能量的能值, sej;

$E_i$  是第  $i$  种物质或能量的数量, J, g 或¥;

$T_{ri}$  是第  $i$  种物质或能量的转换率, sej/J, sej/g, sej/¥

输出物质的能值转换率为:

$$Tr_{out} = \frac{\sum_i E_{mi}}{Em_{out}} \quad (3)$$

式中,  $Tr_{out}$  为输出物质即电的转换率;

$\sum_i E_{mi}$  为总输入能值, sej;

$Em_{out}$  为电的输出量, J

依据已经细分好的可再生资源 R、购买可更新有机能 RP、不可再生资源 NR、购买不可更新资源 NP、输出 Y, 结合上述公式计算出能值流, 如表 7 所示。

**Table 7.** Biogas power generation energy input and output analysis table

**表 7.** 沼气发电能值输入输出分析表

分类	项目	原始数据	单位	能值转换率 (sej/unit)	能值(sej)
投入可再生资源(R)	餐厨垃圾	$1.46 \times 10^{11}$	g	$3.89 \times 10^7$	$5.68 \times 10^{18}$
购买可更新有机能(RP)	劳动力	$3.02 \times 10^6$	¥	$1.62 \times 10^{12}$	$4.89 \times 10^{18}$
不可再生资源(NR)	水	$1.47 \times 10^{10}$	g	$8.44 \times 10^5$	$1.24 \times 10^{16}$
	土建投资	$7.20 \times 10^5$	¥	$1.62 \times 10^{12}$	$1.67 \times 10^{18}$
购买不可更新资源(NP)	设备投资	$1.20 \times 10^7$	¥	$1.62 \times 10^{12}$	$1.94 \times 10^{19}$
	维修与运行	$2.16 \times 10^5$	¥	$1.62 \times 10^{12}$	$3.50 \times 10^{17}$
小计				$2.14 \times 10^{19}$	
输出(Y)	电	$4.54 \times 10^{13}$	J	$7.05 \times 10^5$	$3.20 \times 10^{19}$

火力发电的数据主要来自文献[30]中的发电厂, 其计算过程与上述沼气发电类似, 计算结果如表 8。

**Table 8.** Input and output analysis of thermal power generation energy value

**表 8.** 火力发电能值输入输出分析

分类	项目	原始数据	单位	能值转换率 (sej/unit)	能值(sej)
购买可更新有机能(RP)	劳动力	$9.87 \times 10^6$	¥	$1.62 \times 10^{12}$	$1.60 \times 10^{19}$
不可再生资源(NR)	水	$2.41 \times 10^{11}$	g	$8.44 \times 10^5$	$2.03 \times 10^{17}$
购买不可更新资源(NP)	投资成本	$6.54 \times 10^7$	¥	$1.62 \times 10^{12}$	$1.06 \times 10^{20}$

Continued

	维修与运行	$6.84 \times 10^4$	¥	$1.62 \times 10^{12}$	$1.11 \times 10^{17}$
	燃料	$8.24 \times 10^{14}$	¥	$8.39 \times 10^4$	$6.91 \times 10^{19}$
	小计			$1.75 \times 10^{20}$	
输出(Y)	电	$2.83 \times 10^{13}$	J	$6.75 \times 10^6$	$1.91 \times 10^{20}$

由于两种发电方式的输出量有所差异, 为了方便进行比较, 将火力发电的输出电量统一为  $4.54 \times 10^{13}$  J, 假设之后的沼气发电能值输入输出分析表 9 如下所示。

Table 9. Input and output analysis of thermal power generation energy values

表 9. 火力发电能值输入输出分析

分类	项目	原始数据	单位	能值转换率 (sej/unit)	能值(sej)
购买可更新有机能(RP)	劳动力	$1.58 \times 10^7$	¥	$1.62 \times 10^{12}$	$2.56 \times 10^{19}$
不可再生资源(NR)	水	$5.78 \times 10^{11}$	g	$8.44 \times 10^5$	$4.88 \times 10^{17}$
	投资成本	$1.05 \times 10^8$	¥	$1.62 \times 10^{12}$	$1.70 \times 10^{20}$
购买不可更新资源(NP)	维修与运行	$1.09 \times 10^5$	¥	$1.62 \times 10^{12}$	$1.77 \times 10^{17}$
	燃料	$1.32 \times 10^{15}$	¥	$8.39 \times 10^4$	$1.11 \times 10^{20}$
	小计			$2.81 \times 10^{20}$	
输出(Y)	电	$4.54 \times 10^{13}$	J	$6.26 \times 10^6$	$2.84 \times 10^{20}$

### 3.4. 能值评价指标

本节采用餐厨垃圾产沼气发电的生命周期能值转化率、生命周期环境负载率、生命周期可再生指数、生命周期环境可持续性指数、生命周期能值产出率五个指标进行环境、经济、可持续性等方面的分析。计算结果如表 10。

Table 10. Energy index of two power generation systems

表 10. 两种发电系统的能值指标

指标	公式	指标涵义	沼气发电	火力发电
转换率(Tr)	$Tr_{out} = \frac{\sum_i Em_i}{Em_{out}}$	以评价单位产品量所需能值投入情况, 数值越大, 说明该系统的效率较低	$7.05 \times 10^5$	$6.26 \times 10^6$
环境负载率(ELR)	$ELR = \frac{NR + NP}{R + RP}$	是对环境承压程度的一个指标, 数值越小, 对环境系统的压力就越小	2.02	10.93
可再生指数(PR)	$PR = \frac{R + RP}{Y}$	与环境负载率相反, 用于评价系统的再生性, 数值越高, 表明再生性越高	0.32	0.08
能值产出率(EYR)	$EYR = \frac{Y}{NP + RP}$	权衡系统产出对经济贡献的大小, 数值越高, 系统经济效益和生产效率越高	1.19	1.00
环境可持续性指数(ESI)	$ESI = \frac{EYR}{ELR}$	较高的可持续性指数表明可持续性高, 该指数越高越好	0.59	0.09

## 4. 能值分析结果与分析

### 4.1. 能值投入分析

由以上对沼气发电和火力发电两种发电模式的投入情况进行分析，做出图 3。

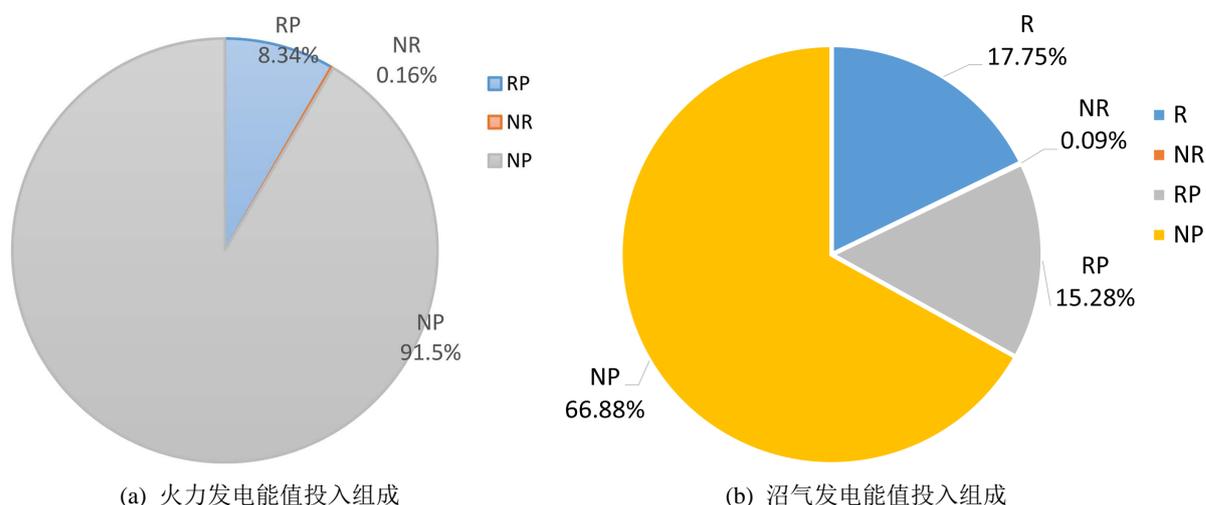


Figure 3. Composition of energy value input

图 3. 能值投入组成

从图 3 中可以看出，两种发电系统中，占比最大的投入是购买的不可更新资源，分别占总投入的 66.88% 和 98.94%。其中，在沼气发电系统中，购买的不可再生资源主要是设备的投资，占到 90.65%，其次分别为土建投资和维修与运行费用。沼气发电的可再生资源投入主要来自于餐厨垃圾，占到总投入的 17.75%，极大地促进了餐厨垃圾的资源化利用。就总体而言，购买型能值投入高于自然资源投入，说明沼气发电系统是一种工厂化经济再生产，但是利用餐厨垃圾进行沼气发电的可再生资源投入占比整体上仍然低于购买的不可再生资源投入，为了进一步实现可再生能源利用目标，餐厨垃圾厌氧消化工艺需要得到进一步的优化，以更低的成本解决更多的餐厨垃圾，产生更多的电力，得到更好的环境效益与经济效益。

### 4.2. 能值指标分析

本文选取了五个能值分析指标进行计算，通过能值指标表格可以看出可再生指数、能值产出率、环境可持续性指数在沼气发电模式下比较高，说明相比于火力发电，沼气发电的经济和环境潜力比较高。

#### 1) 能值转换率(Tr)

定义为输出产品的能值总量与产品或服务量的比值，在特定的生产系统中，Tr 值越高说明生产该产品需要更多的能值投入，同时也表明生产同一产品的不同生产系统的效率高低水平。餐厨垃圾生产沼气进行发电的能值转换率约占到传统火力发电的十分之一，这说明生产同单位的电量，火力发电所需要的投入更高，生产效率更低。

#### 2) 环境负载率(ELR)

环境负载率是不可再生资源除以可再生资源，沼气发电的环境负载率为 2.02，表明该发电方式对当地的环境影响较低，而火力发电的环境负载率为 10.93，不可再生能值占比较高，对环境产生的压力较大。

#### 3) 可再生指数(PR)

可再生指数是可再生资源投入与能值总量的比值，它与环境负载率的含义相反，可再生指数越高表明系统的可再生性良好。火力发电的可再生指数为 0.08，比沼气发电低 75%。

#### 4) 能值产出率(EYR)

能值产出率是指系统的输出总值比购买的资源值，反映系统的竞争力与经济性。沼气发电的能值产出率较高，为 19，比火力发电更具竞争力，且经济性较高。

#### 5) 环境可持续性指数(ESI)

环境可持续性指数是能值产出率除以环境的负载率，该值越大，表明系统的可持续性越高，火力发电的环境可持续性指数仅为 0.09，说明传统的火力发电属于消费型经济系统，不具有可持续发展的能力。

## 5. 结论

本文结合传统能量产投比分析方法，将能值分析方法应用于餐厨垃圾产沼气发电的研究中，并建立了一系列符合餐厨垃圾产沼气的能值评价指标，将餐厨垃圾资源投入量化，综合分析餐厨垃圾产沼气的生态效益和经济效益，使得对整个系统的真实发展状况有更全面的分析和评估。

本文对餐厨垃圾产沼气发电与传统的火力发电两种发电方式所产生的经济影响通过能值分析方法进行了分析评价，得出以下结果：餐厨垃圾生产沼气进行发电的能值转换率约占到传统火力发电的十分之一，环境负载率(ELR)低于火力发电的 81.52%，可再生指数(PR)高于火力发电的 75%，能值产出率(EYR)和环境可持续性指数(ESI)也都高于火力发电。餐厨垃圾产沼气发电在环境、经济可持续方面具有良好的潜力优势，是一种可以值得广泛推广并不断发展的资源化发电模式。

基于能值分析方法，本文得出在环境、经济方面，餐厨垃圾厌氧产沼气的发电模式具有替代传统火力发电的可行性，但在研究中还有许多需要改进和完善的方面：餐厨垃圾作为一种常见的有机固体废物，垃圾的分类、收集仍然是一个问题，需要政府相关部门以及广大人民群众积极配合，确保前期工作的顺利开展；能值分析方法中采用的能值转换率需要在具体的情况具体分析，本文的能值转换率是参考大量文献并转换为最新能值基线的，实际应用上会有差异。

## 基金项目

山东省重大科技创新工程项目：城镇有机固废高效制备生物燃气技术与装备及产业示范资助(2019JZZY020208)。

## 参考文献

- [1] 2020 中国统计年鉴[J]. 统计理论与实践, 2021(1): 2.
- [2] Zhou, H., *et al.* (2014) An Overview of Characteristics of Municipal Solid Waste Fuel in China: Physical, Chemical Composition and Heating Value. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **36**, 107-122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.024>
- [3] 孙晓钟. 我国垃圾焚烧发电的现状与发展趋势研究[J]. 通讯世界, 2020, 27(4): 137-138.
- [4] 王炯科, 汤晓玉, 王文国. 餐厨垃圾干式厌氧发酵研究进展[J]. 中国沼气, 2021, 39(3): 35-41.
- [5] Pera, A.L., Sellaro, M., Bianco, M., *et al.* (2021) Effects of Temporary Increase in OLR and Simultaneous Decrease in HRT on Dry Anaerobic Digestion of OFMSW. *Environmental Technology*, **43**, 4463-4471. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1952312>
- [6] Liu, T., Awasthi, M.K., Wang, X., *et al.* (2022) Effects of Further Composting Black Soldier Fly Larvae Manure on Toxic Metals and Resistant Bacteria Communities by Cornstalk Amendment. *Science of the Total Environment*, **806**, Article ID: 150699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150699>
- [7] 赵鑫. 腐熟污泥与生活垃圾堆肥产品质量评价与植物毒性研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
- [8] 曲艺源, 张景新. 零价铁耦合热预处理技术强化餐厨厌氧消化[J]. 应用化工, 2021, 50(11): 2919-2924.

- [9] 张天益, 王琬, 吕沿霖, 邓洪川, 陆文旭. 餐厨垃圾厌氧消化性能提高研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(4): 1087-1093.
- [10] Dong, Q.Z., Soon, K.T., Richard, M.G. (2010) Municipal Solid Waste Management in China: Status, Problems and Challenges. *Journal of Environmental Management*, **91**, 1623-1633. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.012>
- [11] Zhang, C., et al. (2014) Reviewing the Anaerobic Digestion of Food Waste for Biogas Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **38**, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>
- [12] Lan, K. and Ran, Q.H. (2020) Sustainable Utilization of Agricultural Land in Chengdu Metropolitan Area Based on Emery Analysis. *Asian Agricultural Research*, **12**, 23-28.
- [13] Cho, C. (2013) An Exploration of Reliable Methods of Estimating Emery Requirements at the Regional Scale: Traditional Emery Analysis, Regional Thermodynamic Input-Output Analysis, or the Conservation Rule-Implicit Method. *Ecological Modelling*, **251**, 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.12.025>
- [14] Yang, Q., Liu, G., Hao, Y., et al. (2019) Donor-Side Evaluation of Coastal and Marine Ecosystem Services. *Water Research*, **166**, Article ID: 115028. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115028>
- [15] 蓝盛芳, 等. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [16] 黄瑾. 基于能值分析的广东省生态经济系统状况及可持续发展能力研究[J]. 中国市场, 2010(23): 64-66.
- [17] 杨新荣. 湿地生态补偿及其运行机制研究——以洞庭湖区为例[J]. 农业技术经济, 2014(2): 103-113.
- [18] 潘恒宇. 基于能值的四川某工业园区可持续性研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [19] 沈晶. 基于能值分析法的环境信息计量与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
- [20] Wan, A., et al. (2020) Construction and Case Study of Rural Environmental Value-Added Evaluation System Based on Emery Theory. *Environment, Development and Sustainability*, **23**, 4715-4734. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00729-7>
- [21] Ali, M. and Geng, Y. (2018) Accounting Embodied Economic Potential of Healthcare Waste Recycling—A Case Study from Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, **190**, 678. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7063-y>
- [22] Shima, Y., Erfan, S., Mojtaba, S.M. (2020) A Comparison between a Natural Gas Power Plant and a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant Based on an Emery Analysis. *Journal of Cleaner Production*, **274**, Article ID: 123158. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123158>
- [23] Mustafa, A., et al. (2020) Emery Based Sustainability Evaluation of a Hydroelectric Dam Proposal in South Asia. *Journal of Cleaner Production*, **264**, Article ID: 121496. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121496>
- [24] Sherwin, A., Abbas, R., Mohammad, H.A., et al. (2020) Sustainability Assessment of Rice Production Systems in Mazandaran Province, Iran with Emery Analysis and Fuzzy Logic. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **40**, Article ID: 100744. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100744>
- [25] 朱君. 基于能值分析的广河县农田生态系统可持续发展评价[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [26] 杨慧. 基于能值分析的植物生物质能评价的研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [27] 钟颖, 沙之敏, 顾麦云, 等. 基于能值分析的稻蛙生态种养模式效益评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(3): 572-580.
- [28] 文小兵, 郭精韬, 李金平, 等. 基于沼肥不同利用情景的禽畜养殖场沼气工程能值分析[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(8): 37-43.
- [29] Yazdani, S., Salimpour, E. and Moghaddam, M.S. (2020) A Comparison between a Natural Gas Power Plant and a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant Based on an Emery Analysis. *Journal of Cleaner Production*, **274**, Article ID: 123158. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123158>
- [30] 肖汉雄, 杨丹辉. 基于产品生命周期的环境影响评价方法及应用[J]. 城市与环境研究, 2018(1): 88-105.