

快速城镇化区域生活垃圾处置的生态效率评价

张 军*, 王 锐, 杨 晨, 杜红霞, 王 丽, 葛碧洲

陕西省环境工程重点实验室, 环境类国家级实验教学示范中心, 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安

Email: *zhangjun@xauat.edu.cn

收稿日期: 2021年4月12日; 录用日期: 2021年4月28日; 发布日期: 2021年5月17日

摘 要

生活垃圾和农业固体废物处理已成为制约城镇化进程的重大问题之一。本研究以西安市长安区、临潼区、蓝田县三个快速城镇化区域为例, 通过垃圾物理组成及热值数据分别计算了卫生填埋-沼气发电、焚烧发电、生物质燃料混烧发电等三种垃圾处理方法的能值投入和产出结果, 利用能值产出率、环境负载率、能值投资率、可更新资源投入率和能值可持续指数等5项基本能值指标从能量利用的角度对三种生活垃圾处理方法的环境可持续性与生态效率进行了比较分析。结果表明, 采用生活垃圾焚烧和生物质燃料混烧发电处理方法在能量转化效率和环境影响方面具有显著优势, 有利于提高快速城镇化区域生活垃圾减量化水平和促进再生资源的社会化循环。

关键词

城镇化, 生活垃圾, 循环经济, 能值分析, 生态效率

Ecological Efficiency Evaluation of the Disposal of Domestic Waste in the Rapid Urbanization Area

Jun Zhang*, Rui Wang, Chen Yang, Hongxia Du, Li Wang, Bizhou Ge

Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, National Demonstration Center for Experimental Environment Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi

Email: *zhangjun@xauat.edu.cn

Received: Apr. 12th, 2021; accepted: Apr. 28th, 2021; published: May 17th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 张军, 王锐, 杨晨, 杜红霞, 王丽, 葛碧洲. 快速城镇化区域生活垃圾处置的生态效率评价[J]. 低碳经济, 2021, 10(2): 27-35. DOI: 10.12677/jlce.2021.102004

Abstract

Domestic waste and agricultural solid waste treatment have become one of the important problems restricting the urbanization process. In this study, three fast urbanization areas of Chang'an District, Lintong District and Lantian County in Xi'an City, are taken as examples. The energy input and output results of three waste treatment methods, including sanitary landfill biogas power generation, incineration power generation and biomass fuel mixed burning power generation are calculated respectively by physical composition and heat value data. Based on five basic emergy indexes including energy yield rate, environmental load rate, emergy investment rate, renewable resource input rate and emergy sustainability index, the environmental sustainability and ecological efficiency of three kinds of domestic waste treatment methods are compared and analyzed from the perspective of energy utilization. The results show that the method of domestic waste incineration and biomass fuel mixed combustion has significant advantages in energy conversion efficiency and environmental impact, which is conducive to improve the reduction treatment of domestic waste and the socialization cycle of renewable resources in the rapid urbanization area.

Keywords

Urbanization, Domestic Waste, Circular Economy, Emergy Analysis, Ecological Efficiency

Copyright © 2021 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

随着经济的快速发展,农村城镇化进程逐渐加快,城镇化区域面临的生态问题也逐渐严峻。其中,垃圾处理问题一直十分棘手。快速城镇化的人口快速增长,使得生活垃圾总量呈现增长趋势,传统的垃圾处理模式对现有垃圾量的承载能力明显不足;同时,随着城镇化进程加快,统一的垃圾处理模式已不适应多元城镇化发展模式的需要,需进行垃圾分类回收处理[1] [2] [3]。2019年9月1日,陕西省正式开始实施垃圾分类政策,并通过对垃圾分类宣传、推广和实践,提升居民垃圾分类的意识并引导居民将垃圾分类落到实处。然而,对我省快速城镇化区域而言,推行垃圾分类仍要面临居民的分类回收意识不强、缺乏集中清运处理机制和规划、“邻避效应”等多重困境。从垃圾分类处理效果来看,“资源化、减量化、无害化”的垃圾处理目标远未实现。目前我省农村生活垃圾处理仍以传统的填埋为主。垃圾的收集方式仍为混合收集,一些有害物质如干电池等未经分类直接进入垃圾,增加了无害化处理难度,而高热值废弃物直接填埋也造成了资源的浪费[4]。

在国际上,生物质能发电、太阳能发电、风力发电,是公认的三大清洁能源发电形式。在生物质能发电中,垃圾焚烧发电的综合效应突出。焚烧发电是目前世界范围内较为先进的垃圾处理方法,可实现垃圾的资源化、无害化、减量化。垃圾焚烧是高温分解和深度氧化的过程,处理量大,减容性好,无害化彻底,并且放出的热量可以再回收。节约了大量土地资源和能源损失,杜绝了填埋、堆肥带来的土地污染,空气污染和水域污染,促进了循环经济的发展。在我国,由于普遍缺乏垃圾分类收集体系,垃圾热值低、水分大、成分复杂且分布不均匀,在焚烧过程中会发生众多不同的化学变化,因此产生的烟气污染物种类较多,对人体和环境有着直接和间接的危害[5]。农业废弃物(主要是作物秸秆)作为一种优质

燃料,热值高,N、S含量低,在生物质的再生利用过程中,在碳排放协议中享受CO₂零排放的政策,特别适合燃烧转化。通过生物质成型燃料和垃圾衍生燃料的混合燃烧,既可以节省焚烧过程中为保证燃烧稳定性而使用的煤的用量,又可以使PCDD/PCDF在烟气中的含量低于环保标准,并且减少有机氯化物等污染物的排放,还能够有效增加燃烧时的燃烧温度和燃烧速率,使燃烧更加彻底,减少焚烧炉最终的剩余结渣量,有利于生物质燃料能源的高效利用[6]。

本研究以中国西部中心城市——西安市近郊的典型快速城镇化区域作为生活垃圾和农业固废物的产生源,对垃圾和农业固废物的理化特性和发热值进行分类测试,以能值分析法估算不同垃圾处理方法的生态能值并比较其生态效率差异,从生态能量收支平衡的角度评价各种垃圾处理方法的可行性,为城市垃圾减量化和城镇化区域固体废物资源利用提供新思路。

2. 研究内容

2.1. 研究区域

本研究选取西安市临潼区斜口街道、长安区东大街道和蓝田县华胥镇作为典型的快速城镇化区域研究对象,所选区域的生活垃圾收运和末端处理已经纳入城市固废集中处理系统,设有大型生活垃圾填埋场和综合焚烧厂以及配套的废水废气处理设施,城镇化率分别为34.9%、47.7%和34.0%。区域内以现代商贸业、金融业、科技服务业、文化创意及文旅健康业等主导产业,民营经济活跃度较高,环境卫生条件和农业发展水平具有代表性等特征。

2.2. 样品采集与分析

按照我国现行垃圾分析采样方法标准[7],根据研究区域垃圾台收集清运规律,分别在2019年7月和12月各选择7个无降雨自然日作为夏季和冬季代表性采样周期,每日选取10时、13时和16时三个时段对区域生活垃圾集中转运站进行现场采样。每时段随机抽取5辆清运车卸下的垃圾,采用立体对角线法在3个等距点上同步采集获得一次样品,现场测定容重,然后按照塑料橡胶类、纸类、织物类、木竹类、玻璃、金属、有机物(弃置食品、绿化清扫物等)、无机物(灰土砖瓦等)等依次进行粗、细垃圾湿基分检,称量各组分的湿基重量。农业固体废物样品选取玉米秸秆,分别在2019年8~9月在各区域的玉米集中种植区田间以对角线采样法随机采集,秸秆样品密封带回实验室后切成3~5 cm小段,自然风干后置于干燥器中存储。最后将分类获得的生活垃圾和秸秆样品分别用破碎机(Harden TD1300型,广东斯瑞德环保设备公司)破碎至粒径小于25 mm的小块用于后续分析。

将湿基样品平铺于干燥盘内,在 $105 \pm 2^\circ\text{C}$ 的条件下烘干至恒重,用质量差法求得含水率[8][9]。各组分含水率 $C_{i,水}$ 、总含水率 $C_{总水}$ 和干基组分含量 $C_{i,干}$ 用质量分数按文献计算[10]。各组分样品的干基高位发热值 $H_{i,干}$ 采用氧弹量热仪(HWR-15D型,上海市检测技术所)测定,样品的干基高位发热值 $H_{H,干}$ 、湿基高位发热值 $H_{H,湿}$ 和湿基低位发热值 $H_{L,湿}$ 采用成都市节能技术服务中心报道的焚烧垃圾热值综合测定法计算[11]。

2.3. GHG 协同减排估算

本文基于IPCC清单法结合CDM项目的方法学核算各种垃圾处理方法的温室气体协同减排效应[12]。填埋气的主要成分是CH₄和CO₂,各占50%左右,其他气体如O₂、N₂、H₂S、烷烃和芳烃等含量极少。由于这部分的CO₂排放量是源自生物质的碳排放,不计入温室气体排放,基准线情景设定为填埋产生甲烷的量,采用IPCC指南提供的一阶衰减(first-order decay, FOD)方法进行减排量测算,并将其换算成全球变暖潜力(global warming potential, GWP) [13][14]。西安地区平均气温13.2℃,年降水量为650 mm,

而蒸发量为 900 mm, 属于北温带(温度 $\leq 20^{\circ}\text{C}$)的较干(年均降水量/蒸发量 < 1)地区。通过 IPCC 提供的该条件下的缺省半衰期值进行加权平均, 统一采用垃圾降解半衰期为 12 年, 换算甲烷产生率常数为 0.041, 并由此换算各区域垃圾固废物的平均减排当量。

3. 结果与讨论

3.1. 研究区域基础数据分析

研究区域的生活垃圾和玉米秸秆样品的理化分析数据见表 1。

Table 1. Physical and chemical analysis data of domestic waste and corn straw

表 1. 生活垃圾和玉米秸秆的理化分析数据

名称	年产出量(t/a)	含水率(%)	灰分率(%)	$H_{H,T}$ (J/g)	$H_{L,80}$ (J/g)	单位热值 Cl 析出量(mgHCl/kJ)
斜口街道生活垃圾	2.35×10^4	16.5	13.0	9068.9	7570.8	0.74
东大街道生活垃圾	1.44×10^4	13.3	18.2	6734.7	5539.1	0.91
华胥镇生活垃圾	1.08×10^4	27.9	9.5	11052.5	7332.7	0.59
玉米秸秆	1.61×10^4	6.70	16.32	14566.5	9715.4	0.43

从表中数据可知, 三个区域的生活垃圾含水率不超过 30%, 全组分热值均大于垃圾入炉低位热值限值 4180 J/g, 满足焚烧厂入炉垃圾标准[15]。但是由于垃圾中混合了大量塑料制品使得 Cl 单位热值析出量较高, 烟气对焚烧炉维护和大气环境影响均很大。同时为了确保炉渣热灼减率低于 5% 要求, 有必要进一步提高入炉垃圾的热值。而在上述区域产出的玉米秸秆在经过自然晾晒后, 属于高热值、低 Cl 单位热值析出量的良好辅助燃料, 当掺杂 10% 混合秸秆(质量比, 垃圾: 玉米秸秆 = 90:10)后的混合燃料热值分别提升至 8050.7 J/g (斜口街道)、6555.2 J/g (东大街道)和 8169.4 J/g (华胥镇), 提高到入炉垃圾热值设计上限 6380 J/g 以上, 且 Cl 析出量控制在 0.67 以下。说明采用生物质固废混合垃圾焚烧的模式可以很好地解决乡镇垃圾低热值和氯释放的问题, 也为垃圾分类后大量不易回收利用的橡胶、塑料、织物、木竹、纸等高热值废弃物找到了资源利用的途径, 降低此类垃圾组分填埋后厌氧分解过程产生的 CH_4 等温室气体对大气的污染。

3.2. 不同垃圾处理方法的能值比较

能值分析方法是美国著名生态学家 H. T. Odum 于 20 世纪 80 年代创立的以能量为核心的系统分析方法, 是评估系统可持续发展能力的有力工具[16]。能值分析是以能值为基准, 把不同种类、不同质量、不可比较的能量转换成统一标准来进行比较。能值分析常用太阳能值 solar energy 来衡量某一能量的能值大小, 任何流动的或贮存状态的能量所包含的太阳能的量, 即为该能量的太阳能值。能值分析方法目前已被引入城市生活垃圾及建筑垃圾的回收处理方案比选, 通过计算将生活垃圾在城市生态系统内不同类型的能量、物质资源、劳力服务以及费用等统一转化为太阳能值焦耳(sej), 从而对垃圾处理系统的结构、功能特征与生态经济效益进行比较分析, 为低碳循环过程的转化效率评价提供科学依据。以卫生填埋 - 沼气发电处理系统作为对照, 选择国内技术较为成熟的直燃焚烧发电和秸秆 - 垃圾混烧发电这两种系统作为推荐的垃圾减量化处理模式, 采用能值分析法对三种处理方法的系统能值投入产出情况进行对比, 以 η_{EYR} (能值产出率)、 η_{ELR} (环境负载率)、 η_{EIR} (能值投资率)、 η_{RIR} (可更新资源投入率)和 η_{ESI} (能值可持续指数)五类能值指标分别比较评价不同生活垃圾处置方式的生态化效率。

卫生填埋 - 沼气发电处理方法按西安市市容环卫局管理的卫生填埋场沼气回收及发电项目参数进行

折算(装机容量 12 MW) [17] [18], 垃圾产沼气率按 $6.42 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ 计(利用率 81%), 沼气的热值为 $35,874 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$, 发电效率为 30%, 每吨垃圾发电量为 $43.69 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1}$; 冷却水量按 $3.45 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 计, 发电耗气量按 $0.5 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 计, 燃烧空气用量可忽略不计; 发电运行成本按 $0.16 \text{ \$} \cdot \text{kWh}^{-1}$ 计, 垃圾收运和卫生填埋处理成本按 $44.34 \text{ \$} \cdot \text{t}^{-1}$; 核算的年减排当量为 $0.679 \text{ tCO}_2\text{e}$, 垃圾处理政府补贴按 $10.77 \text{ \$} \cdot \text{t}^{-1}$ 计, 此两项能值作为社会经济投入负能值计入。

焚烧发电处理方法以 $600 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 生活垃圾焚烧发电厂项目参数进行折算(装机容量 12 MW) [18] [19] [20], 发电效率按 20% 计, 输出电量按 90% 计; 冷却水量 $1.98 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 按计, 发电耗气量按 $0.5 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 计, 燃烧空气用量可忽略不计; 发电运行成本按 $0.11 \text{ \$} \cdot \text{kWh}^{-1}$ 计, 核算的年减排当量为 $0.853 \text{ tCO}_2\text{e}$, 垃圾处理政府补贴按 $10.77 \text{ \$} \cdot \text{t}^{-1}$ 计, 此两项能值作为社会经济投入负能值计入。

秸秆 - 垃圾混烧发电项目参照文献参数进行折算(装机容量 $2 \times 12 \text{ MW}$) [21] [22], 秸秆热值按 $14,566.5 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 计, 发电效率按 20% 计, 输出电量按 90% 计, 冷却水量按 $1.98 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 计, 发电耗气量按 $0.5 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 计, 冷却气量按 $1.13 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 计, 燃烧空气用量可忽略不计; 发电运行成本按 $0.10 \text{ \$} \cdot \text{kWh}^{-1}$ 计; 核算的年减排当量为 $0.893 \text{ tCO}_2\text{e}$, 垃圾处理政府补贴按 $10.77 \text{ \$} \cdot \text{t}^{-1}$ 计, 再生能源补贴按 $0.038 \text{ \$} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 计, 此三项能值作为社会经济投入负能值计入。

各个过程的能值转换率按文献选取[16] [23] [24], 中国碳交易市场价格统一按 $3.82 \text{ \$} \cdot \text{tCO}_2\text{e}^{-1}$ 计, 美元汇率统一按 6.5:1 计。分别计算出卫生填埋 - 沼气发电处理法、焚烧发电处理法和生物质混烧发电处理法相应的太阳能值(见表 2~4)。

Table 2. Emergy analysis of domestic waste landfill biogas power generation system

表 2. 生活垃圾卫生填埋 - 沼气发电系统能值分析

项目	能值转换率(sej·unit ⁻¹)	太阳能值(sej·a ⁻¹)		
		斜口街道	东大街道	华胥镇
输入: 生活垃圾 R_1	3.34×10^{11}	7.83×10^{18}	4.82×10^{18}	3.60×10^{18}
输入: 冷却用水耗能 R'_1	6.07×10^4	1.34×10^{18}	8.26×10^{17}	6.16×10^{17}
输入: 冷却用气耗能 R'_2	1.50×10^3	1.00×10^{14}	6.13×10^{13}	4.61×10^{13}
输入: 卫生填埋成本 F_1	4.0×10^{12}	4.16×10^{18}	2.56×10^{18}	1.91×10^{18}
输入: 运营成本 F_2	4.0×10^{12}	6.56×10^{17}	4.04×10^{17}	3.01×10^{17}
输入: 垃圾处理补贴 F_3	4.0×10^{12}	-1.01×10^{18}	-6.22×10^{17}	-4.64×10^{17}
输入: 减排温室气体 G	4.0×10^{12}	-8.95×10^{16}	-8.16×10^{16}	-1.37×10^{17}
输出: 电力产出 Y	1.59×10^5	5.87×10^{17}	3.61×10^{17}	2.70×10^{17}

Table 3. Emergy analysis of domestic waste incineration power generation system

表 3. 生活垃圾焚烧发电系统能值分析

项目	能值转换率(sej·unit ⁻¹)	太阳能值(sej·a ⁻¹)		
		斜口街道	东大街道	华胥镇
输入: 生活垃圾 R_1	3.34×10^{11}	7.83×10^{18}	4.82×10^{18}	3.60×10^{18}
输入: 冷却用水耗能 R'_1	6.07×10^4	7.08×10^{18}	4.36×10^{18}	3.25×10^{18}
输入: 冷却用气耗能 R'_2	1.50×10^3	3.17×10^{14}	1.95×10^{14}	1.46×10^{14}
输入: 运营成本 F_2	4.0×10^{12}	4.13×10^{18}	1.95×10^{18}	1.93×10^{18}

Continued

输入: 垃圾处理补贴 F_3	4.0×10^{12}	-1.01×10^{18}	-6.22×10^{17}	-4.64×10^{17}
输入: 减排温室气体 G	4.0×10^{12}	-2.92×10^{17}	-1.93×10^{17}	-2.42×10^{17}
输出: 电力产出 Y	1.59×10^5	5.37×10^{18}	2.54×10^{18}	2.51×10^{18}

Table 4. Emergy analysis of domestic waste-biomass co-fired power generation system

表 4. 生活垃圾 - 生物质混烧发电系统能值分析

项目	能值转换率(sej·unit ⁻¹)	太阳能值(sej·a ⁻¹)		
		斜口街道	东大街道	华胥镇
输入: 生活垃圾 R_1	3.34×10^{11}	7.83×10^{18}	4.82×10^{18}	3.60×10^{18}
输入: 玉米秸秆 R_2	4.24×10^{11}	9.95×10^{17}	6.12×10^{17}	4.57×10^{17}
输入: 冷却用水耗能 R'_1	6.07×10^4	7.08×10^{17}	4.36×10^{17}	3.25×10^{17}
输入: 冷却用气耗能 R'_2	1.50×10^3	3.17×10^{13}	1.95×10^{13}	1.46×10^{13}
输入: 运营成本 F_2	4.0×10^{12}	5.46×10^{18}	2.73×10^{18}	2.54×10^{18}
输入: 垃圾处理补贴 F_3	4.0×10^{12}	-1.01×10^{17}	-6.22×10^{16}	-4.64×10^{16}
输入: 再生能源补贴 F_4	4.0×10^{12}	-1.61×10^{18}	-9.93×10^{17}	-7.42×10^{17}
输入: 减排温室气体 G	4.0×10^{12}	-3.07×10^{17}	-2.02×10^{17}	-2.43×10^{17}
输出: 电力产出 Y	1.59×10^5	6.01×10^{18}	3.01×10^{18}	2.80×10^{18}

3.3. 生态效率评价

根据各区域生活垃圾处理能值分析表数据, 分别计算采用卫生填埋 - 沼气发电、焚烧发电和秸秆-垃圾混烧发电等三种处理方法时的各项能值评价指标, 如表 5 所示。

Table 5. Emergy evaluation indexes of different treatment methods

表 5. 不同处理方法的能值评价指标

评价指标	卫生填埋 - 沼气发电			焚烧发电			秸秆 - 垃圾混烧发电		
	斜口街道	东大街道	华胥镇	斜口街道	东大街道	华胥镇	斜口街道	东大街道	华胥镇
η_{EYR}	0.16	0.16	0.17	1.90	2.23	2.05	1.75	2.04	1.85
η_{ELR}	0.41	0.40	0.38	0.19	0.12	0.18	0.36	0.25	0.35
η_{EIR}	0.65	0.64	0.62	1.26	1.14	1.24	0.47	0.35	0.45
η_{RIR}	0.71	0.71	0.72	0.84	0.89	0.85	0.74	0.80	0.74
η_{ESI}	0.39	0.40	0.44	10.03	17.95	11.46	4.86	8.10	5.37

$$\eta_{EYR} = Y / \sum F_k; \eta_{ELR} = (\sum N_j + \sum F_k) / (\sum R_i + \sum R'_i); \eta_{EIR} = (\sum R'_i + \sum F_k) / (\sum N_j + \sum R_i);$$

$$\eta_{RIR} = (\sum R_i + \sum R'_i) / (\sum R_i + \sum R'_i + \sum N_j + \sum F_k); \eta_{ESI} = \eta_{EYR} / \eta_{ELR}$$

由表中数据可以看出:

- 1) 三种方法的 η_{EYR} 值与燃煤发电系统(η_{EYR} 值一般在 3~8 之间[25] [26])相比并没有优势, 这主要因

为这三类生物质发电的单位电量成本比燃煤发电成本大很多,使得投入的货币能值较大所致。其中卫生填埋-沼气发电的 η_{EVR} 值最小,仅约为焚烧发电法和混烧法的7%~9%。虽然焚烧发电法和垃圾混烧法在水、气能耗方面高于卫生填埋法3~5倍,但是其电力产出能力比后者高出近十倍,另外利用秸秆等生物质燃料的焚烧发电系统可以在现行政策下获得额外的电价补贴,因此利用垃圾焚烧热量的发电系统具有更高的盈利潜力和市场竞争能力。

2) 三种处理方法的 η_{ELR} 值均小于1,相比燃煤发电和燃油发电类高环境负荷系统来说,属于低环境负荷系统[27]。外界大量的货币能值输入以及使用过多的不可再生资源,都是引起环境系统恶化的主要原因。虽然在三种垃圾处理过程中均极少直接消耗不可再生能源,但是其中卫生填埋-沼气发电法占用大量的土地资源,因而其产生的环境压力较大, η_{ELR} 值也最高。而采用焚烧发电法对垃圾进行减量化处理仅需填埋少量飞灰和炉渣,可以大幅减小对土地环境功能退化的压力,因此 η_{ELR} 值相对较低。

3) 焚烧和混烧发电系统的 η_{EIR} 值相对较高,主要是因为焚烧设备运行的投资成本较高所致,其中生物质混烧发电法由于使用了秸秆这种廉价的可再生能源作为辅助燃料并获得了额外的电价补贴,因而相对于焚烧发电法降低了 η_{EIR} 值。

4) 三种方法的 η_{RRR} 值接近,而生物质混烧发电法的 η_{RRR} 值相对略高,主要是因为额外利用了秸秆类可更新资源,相对提高了对自然资源的持续利用性。

5) 三种方法的 η_{ESI} 值相差悬殊。焚烧发电法和生物质混烧发电法的 η_{ESI} 值远远超过卫生填埋-沼气发电系统,显示出更好的生态可持续性。但并非 η_{ESI} 值越高就越好。当 η_{ESI} 值在5~10之间时,表明该系统富有活力和发展潜力,可在较长时间内持续发展[27]。垃圾卫生填埋-沼气发电处理法的 η_{ESI} 值极低,表明依赖占用土地填埋处理垃圾的方式是难以长期持续的,而两种焚烧发电法的经济效益/环境负荷比值比较合理,因此可以作为重点发展的垃圾处理方法。焚烧发电法的 η_{ESI} 值相对生物质混烧发电法要高出近一倍,主要是对秸秆等自然资源利用率较低造成的,这需要进一步研发成本低、热值高及焚烧效率高的辅助生物质燃料,从而进一步发掘垃圾焚烧处理系统在提高经济效益和降低环境负荷方面的潜力。

4. 结论与建议

本研究的主要结论包括:1) 三个快速城镇化区域的生活垃圾热值达到焚烧厂入炉要求,通过样品分析和混合燃料测试发现,采用掺杂秸秆混烧的方式可以有效提高热值且氯释放系数有明显改善,为快速城镇化区域建立生活垃圾-农业固体废物混合收运焚烧处理模式提供了数据支持。2) 采用能值分析法发现,卫生填埋-沼气发电处理方法的能值产出最低且造成较大环境压力,而秸秆混烧发电处理方法在提高经济效益和降低环境负荷方面均具有优势,因而具有更高的生态化效率。

为了解解决好城镇化区域的垃圾处理问题,发挥废弃生物质能源化产业巨大的环境效益潜力,在考虑本地的城乡一体化收运体系建设及中长期环卫规划以及其他影响垃圾总量的前提下,建议从以下四个方面开展顶层设计:1) 应在城市总体规划和环境保护规划指导下,制订与垃圾处理相关的专业规划,以市域环境卫生控制性规划为切入点,全面进行城镇垃圾处理统筹,突破行政区域的制约,科学决策垃圾焚烧厂的建设规模和布局,全市建设若干个具有经济规模、便于统一管理和有效控制污染的联合处理基地。围绕这些处理基地建立“预处理和收集-中处理(中转)-终处理”的生活垃圾梯次处理模式,依据服务人口数量、垃圾和农业固体废物排放量、垃圾理化性质等参数的持续监测数据。2) 在乡镇固体废弃物的处理过程中,逐步实行分级处理的管理模式。在收集环节实现生活垃圾收集的分类化、容器化、密闭化和机械化,对垃圾和固体废物分为可回收和不可回收两大类并对其进行分类贮存;在处理环节加快生活垃圾资源化处理项目工程建设,特别是对不可回收的高热值废弃物进行分类收集和预处理并纳入城市综合焚烧处理厂的原料输入体系进行再利用,以城乡一体化方式降低垃圾处理的成本。3) 进一步落实我国《环境

资源保护法》对区域环境保护做出的相关规定，使其在城乡融合地区的固废处理中充分发挥指导监督作用，同时建立长久稳定的财税扶持制度，提高生物质能源产业在市场上的经济竞争力[28]。4) 有计划地调整城镇化区域产业结构，借鉴绿色生产和低碳生产的模式，使用新能源，从源头上减少固废物的产生，减少对环境的污染和破坏，实现城镇化区域经济的可持续发展。

基金项目

本研究受陕西省自然科学基金(2019JM-253)、陕西省教育厅专项科研计划项目(17JK0428, 20JT042)、西安建筑科技大学新型城镇化研究基金(X20190022)的资助。

参考文献

- [1] 杜静, 常志州, 钱玉婷, 靳红梅, 黄红英. 农村生活垃圾处理模式及技术发展趋势[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(6): 11-14.
- [2] 张颖, 张林楠, 李婉赢, 王辉琴, 武扬, 何冰. 中国农村生活垃圾处理现状分析[J]. 环境保护前沿, 2017, 7(5): 373-379.
- [3] Wang, A.Q., Zhang, L.X., Shi, Y.J., Rozelle, S., Osborn, A. and Yang, M. (2017) Rural Solid Waste Management in China: Status, Problems and Challenges. *Sustainability*, **9**, 506. <https://doi.org/10.3390/su9040506>
- [4] 贾亚娟, 赵敏娟, 夏显力, 姚柳杨. 农村生活垃圾分类处理模式与建议[J]. 资源科学, 2019, 41(2): 338-351.
- [5] 王晨颖. 垃圾混燃发电过程污染物排放优化控制研究[D]: [硕士学位论文]. 河北保定: 华北电力大学, 2012.
- [6] 田颖, 马泽宇, 徐期勇, 等. 生物质-垃圾混合燃烧特性及其环境分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(35): 193-198.
- [7] 中华人民共和国建设部. CJJ/T 102—2004《城市生活垃圾分类及其评价标准》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJ/T 313—2009 生活垃圾采样和物理分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [9] 赵爱华, 张益, 李国建. 城市垃圾处理工程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] 马铮铮. 沈阳市生活垃圾调查及处置方式研究[J]. 环境卫生工程, 2010, 18(2): 13-15.
- [11] 古吉群. 垃圾发热值的实用测定方法[J]. 节能与环保, 2006(12): 54.
- [12] 政府间气候变化专门委员会. 固体废弃物处理场所的甲烷排放. 《国家温室气体清单优良做法指南和不确定性管理》(第五章废弃物)[S]. 日本神奈川县: 全球环境战略研究所, 2008.
- [13] Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., et al. (2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa.
- [14] Astrup, T., Møller, J. and Fruergaard, T. (2009) Incineration and Co-Combustion of Waste: Accounting of Greenhouse Gases and Global Warming Contributions. *Waste Management and Research*, **27**, 789-799. <https://doi.org/10.1177/0734242X09343774>
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 《生活垃圾焚烧炉及余热锅炉》, GB/T 18750-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 陆宏芳, 蓝盛芳, 李雷, 彭少麟. 评价系统可持续发展能力的能值指标[J]. 中国环境科学 2002, 22(4): 380-384.
- [17] 沈一青. 武夷山市生活垃圾处理能值分析[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(3): 37-41.
- [18] 楼波. 垃圾处理的能值分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32(9): 63-71.
- [19] 曾祥耙. 垃圾焚烧发电项目成本分析[J]. 环境卫生工程, 2014, 22(3): 57-60.
- [20] Zhao, L., Chen, D.Z., Liu, G.Y., et al. (2010) Two Calculation Methods for Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Thermo-Chemical Conversion and Utilization Processes. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **30**, 1634-1641.
- [21] 秦建光, 余春江, 王勤辉, 等. 流化床秸秆燃烧技术研究及开发[J]. 水利电力机械, 2006, 28(12): 70-75.
- [22] 罗玉和, 丁力行. 基于能值理论的生物质发电系统评价[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(32): 112-117.
- [23] Uigiati, S. and Brown, M.T. (2002) Quantifying the Environmental Support for Dilution and Abatement of Process Emissions: The Case of Electricity Production. *Journal of Cleaner Production*, **10**, 335-348.

-
- [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00044-0](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00044-0)
- [24] Cao, K. and Feng, X. (2007) The Emergy Analysis of Multi-Product Systems. *Process Safety and Environmental Protection*, **85**, 494-500. <https://doi.org/10.1205/psep07007>
- [25] Ulgiati, S. and Brown, M.T. (2002) Quantifying the Environmental Support for Dilution and Abatement of Process Emissions: The Case of Electricity Production. *Journal of Cleaner Production*, **10**, 335-348. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00044-0](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00044-0)
- [26] Marchettini, N., Ridolfi, R. and Rustici, M. (2007) An Environmental Analysis for Comparing Waste Management Options and Strategies. *Waste Management*, **27**, 562-571. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.04.007>
- [27] Brown, M.T. and Ulgiati, S. (1997) Emergy Based Indices and Ratios to Evaluate Sustainability: Monitoring Economics and Technology toward Environmentally Sound Innovation. *Ecological Engineering*, **9**, 51-69. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(97\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)00033-5)
- [28] 张祎旋, 傅童成, 周方圆, 李蒙, 周圣坤, 谢光辉. 中国废弃生物质资源化利用经济效益评价[J]. 电力与能源进展, 2020, 8(2): 38-47.