

温宗国,张佳乐,费 凡,等.城市多源固废协同处置机制及园区化规划研究 [J]. 中国环境科学, 2023,43(9):5001-5010.

Wen Z G, Zhang J Y, Fei F, et al. Study of urban multi-source solid waste collaborative disposal mechanism and park planning method [J]. China Environmental Science, 2023,43(9):5001-5010.

城市多源固废协同处置机制及园区化规划研究

温宗国*,张佳乐,费 凡,杜昊焱,陈 燕,白卫南 (清华大学环境学院,清华大学工业节能与绿色发展评价中心,北京 100084)

摘要: 针对生活垃圾、餐厨垃圾、危险废物等城市固废理化特性和处置设施的物质代谢特征,提出了 3 项园区化协同处置机制,梳理了焚烧、填埋、厌氧等 8 种处置技术的协同共生点,开发了包括固废产排预测、流动模拟和需求分析、技术选择和规模匹配、园区处置效果定量评估的系统规划方法.在成都长安静脉产业园采用园区化协同处置的规划实证分析表明,2025 年固废处置量比规划前增加 61.3%,全年发电量 13.61 亿 kW·h,CO₂ 年减排量 63.98 万 t,固废减量化率达 67.8%,飞灰、炉渣 100%安全处置,废水回用率达 80.3%,园区总关联度达 0.33,成为集固废协同处置、能源供应、建材生产于一体的新型资源循环利用基地.

关键词: 多源固废; 协同处置; 园区规划; 资源循环利用

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)09-5001-10

Study of urban multi-source solid waste collaborative disposal mechanism and park planning method. WEN Zong-guo*, ZHANG Jia-yue, FEI Fan, DU Hao-yan, CHEN Yan, BAI Wei-nan (Industrial Energy Saving and Green Development Assessment Center, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2023,43(9): 5001-5010

Abstract: Based on the physical and chemical characteristics of municipal solid waste, such as household waste, kitchen waste and hazardous waste, and the metabolism characteristics of disposal facilities, this paper put forward three collaborative disposal mechanisms of waste disposal park, systematically sorted out the collaborative points of 8 typical solid waste disposal technologies, such as incineration, landfilling and anaerobic digestion, etc., and developed a four-step planning method including waste generation prediction, flow stimulation and demand analysis, technology selection and scale matching, and quantitative evaluation. Empirical analysis based on Chang'an Vein Industrial Park in Chengdu showed, by considering collaborative mechanism and adopting this planning method, the park annual solid waste disposal volume would increase 61.3% than base year, annual power generation would be 1.361 billion degrees, annual CO₂ emission would reduce 639,800 tons, waste reduction rate would reach 67.8%, the fly ash and slag would be completely safely treated, and the waste water recycling rate would reach 80.3%. The correlation degree of this park could reach 0.33, which would form a new resource recycling base, integrating collaborative disposal of solid waste, supply of energy and production of building materials.

Key words: multi-source solid waste; collaborative disposal; systematic planning; resource recycling

随着社会发展,中国固废产生规模迅速增加,对分类处置能力也提出了更高的要求.“十四五”相关规划指出要全面推进生活焚烧设施建设,有序开展厨余垃圾处理设施建设,健全可回收资源化利用设施.各城市纷纷开展固废处置项目新建或扩展工作.当前中国固废多为单一品种分散处理,处置项目数量众多^[1-4],2019 年全国有 1183 座生活垃圾无害化处理厂^[45],4195 份危险废物和医疗废物经营许可证^[6].众多单独建设或规划的固废处置设施,导致空间布局分散,选址困难,土地利用碎片化,“邻避效应”显著^[7-8].

单一技术也存在产生副产品和二次污染物的固

有缺陷,如垃圾焚烧产生富含重金属和二噁英的飞灰、高盐高有机渗滤液等难处置的残余物^[9-11],厌氧消化产生的残渣需要运输一定距离至填埋场或焚烧厂,造成额外污染排放和资源消耗^[12].其次,单体设施的规模限制了资源利用潜力,如单体项目的污水处理设施由于沼气产量小,大多采取火炬焚烧的方式处理,浪费了资源^[13],医废消毒、污泥干化等预处理环节往往需要消耗额外的蒸汽或电力^[14-15].此

收稿日期: 2023-02-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1908600);国家自然科学基金资助项目(72004067)

* 责任作者,教授, wenzg@tsinghua.edu.cn

外,由于单一固废的组分不能完全适配处理技术的要求,为达到更好的处置效果,需要将多种固废进行调配,促进系统物料平衡,提高产品转化效率^[16].因此,随着城市固废精细化管理水平的提高,单体处置模式难以彻底解决固废处置面临的各种问题,更无法发挥不同技术的互补优势.

针对上述问题,中国已经开始了协同处置模式的探索.2018 年发改委牵头建设 50 家资源循环利用基地建设,其中包含多个城市固废综合处置园区.2021 年《“十四五”循环经济发展规划》指出推进城市废弃物协同处置,推进生活垃圾焚烧协同处置医疗废物、厨余垃圾、园林废弃物、污水厂污泥等低值有机固废统筹处置等工作^[5].目前城市固废协同处置的尝试主要有两种形式.第一种是以一座设施为核心,同时处理两种及以上的固废^[17-19],例如利用生活垃圾焚烧设施协同处置医疗废物、餐厨垃圾沼渣和市政污泥,以及多种有机固废的联合厌氧等.第二种是将多个处置设施聚集在同一园区内,构建设施之间的固废、水、能协同利用网络^[20-21],如杭州天子岭循环经济产业园,以生活垃圾填埋设施为核心,利用填埋厂沼气和污水处理设施新建餐厨废弃物处理项目.由于建设初期缺乏顶层设计和长期规划,大部分项目协同处置的固废品类和规模有限,物质代谢网络尚未高效链接,资源能源利用效率较低,尚

未完全发挥出园区化协同处置的优势^[22-23].这也与当前研究尚未构建起系统性的协同框架和理论指导有关.现有研究大多基于实际案例分析协同处置项目的建设、运行情况和能源、经济效益等^[24],对于固废协同处置机制的研究存在碎片化、分散化的问题,缺乏对协同节点的系统梳理和共性机制解析.本文详细分析了焚烧、填埋、厌氧等典型技术的协同共生点,提出了城市多源固废园区化协同处置的 3 项机制,开发了城市固废协同处置综合园区的系统规划方法,并应用于成都长安静脉产业园 2025 年建设规划,为城市固废园区化协同处置模式提供了理论支撑和方法借鉴.

1 机制解析

1.1 技术协同共生点

城市固废处置目前已形成以焚烧、卫生填埋为主,厌氧消化、好氧堆肥为辅的处置体系.医疗废物处置以回转窑热解焚烧、高温蒸汽处理为主,工业危险废物基于理化特性因地制宜采取回转窑焚烧、水泥窑协同处置或资源化利用,大件垃圾、建筑垃圾等废物则以资源化利用为主.本研究基于大量工程实地调研,系统分析各类工艺对固废特性的需求以及处置过程中产生的产品和二次残余物,梳理了 8 种典型技术的协同共生点,详见表 1.

表 1 城市固废典型处置技术协同共生点

Table 1 Collaborative symbiosis points of typical disposal technologies of municipal solid waste

处置技术	处理对象	产品	二次残余物	协同共生点
焚烧处理	可燃固废	电力、蒸汽、热水	渗滤液、炉渣、飞灰、烟气、恶臭	1. 协同处置医废、一般工业固废、污泥等多种固废; 2. 渗滤液、恶臭气体与临近项目集中处置,炉渣与建筑垃圾协同资源化; 3. 为园区厂供电,蒸汽、热水等用于集中供热或汽用项目; 4. 为可燃固废提供兜底保障.
卫生填埋	不可燃固废	/	渗滤液、恶臭、填埋气	1. 渗滤液与临近项目集中处置; 2. 填埋气集中发电或制备生物燃气; 3. 为不可燃固废提供兜底保障.
厌氧发酵	有机固废	粗油脂、有机肥、电力、生物燃气	渗滤液、可燃/不可燃物质、恶臭、沼气	1. 渗滤液、恶臭气体与临近项目集中处置; 2. 沼气集中利用发电或制备生物燃气; 3. 可燃固废送至焚烧项目协同处置,不可燃固废进行卫生填埋.
好氧堆肥	有机固废	有机肥、可回收物质	渗滤液、可燃/不可燃物质、恶臭	1. 渗滤液、恶臭气体与临近项目集中处置; 2. 可燃固废送至焚烧项目协同处置,不可燃固废进行卫生填埋.
水泥窑协同处置	危险废物、医疗废物、焚烧炉渣、工业固废	水泥熟料	烟气	协同处置炉渣、一般工业固废、危险废物、医疗废物等多种固废.
资源化	建筑垃圾、大件垃圾	可回收物质	废水、可燃/不可燃物质、粉尘	可燃固废送至焚烧项目协同处置,不可燃固废进行卫生填埋.
高温蒸汽	医疗废物	/	废水、灭菌后医废、恶臭	1. 废水与邻近项目集中处置; 2. 医废残渣送至焚烧项目协同处置; 3. 蒸汽取自临近产汽项目.

1.2 园区化协同机制

基于上述协同节点,并结合对城市多源固废理化成分、处理技术特点以及处置过程中的物质、能量代谢特性的理论分析,本研究总结凝练出以下 3 项园区协同处置关键机制。

1.2.1 废物理化特性相似 从本质上看,各类固废的组分和理化特性相似,均包括挥发分、固定碳、水分和灰分,主要由 C、H、O、N、S、P 等元素组成,采用同一技术处置,可以在节约土地的同时,实现规模经济性。例如,生活垃圾、塑料垃圾、医疗废物等可燃固废可以共同焚烧,回收能源^[25],焚烧厂渗滤液、厌氧消化沼液等多源废水可生化降解特性相近,可共用同一设施集中处理^[26]。此外,由于单一固废的理化特性难以完全符合处置技术对底物的要求,可以根据技术特点,将多种固废进行调配处理,从而达到最优的处理效果。例如,将污泥和园林废弃物联合厌氧消化,可以促进厌氧系统物料平衡,提高沼气产量^[27]。

1.2.2 能量代谢节点链接 通过链接各类固废处

置设施能量代谢过程中的关键节点,可以促进能量的梯级利用和余热回收,从而提高园区整体的能量利用率和资源回收率。例如,焚烧项目产生的电力可供应园区内其他项目使用,剩余部分上网提供可再生能源;焚烧项目产生的蒸汽可供给餐厨垃圾三相分离、厌氧消化、污泥干化、医废高温消毒等用汽环节^[28];厌氧消化、渗滤液处理、卫生填埋等项目分散产生的沼气集中收集,采用燃气发电或提纯制生物燃气等技术提高能源利用效率和碳减排效益^[29]。

1.2.3 焚烧、填埋提供兜底保障 垃圾焚烧和卫生填埋技术成熟,物料适应性广,可以协同处置园区内无法实现安全经济处置的废物。例如,焚烧项目协同处置沼渣细颗粒、渗滤液浓缩液等可燃残余物^[30];卫生填埋项目作为飞灰、炉渣等不可燃固废的终端场所。

1.3 园区协同处置典型路径

以协同机制为指导,将上述的技术协同共生点进行链接,可构建典型固废协同处置园区的技术路径,详见图 1。

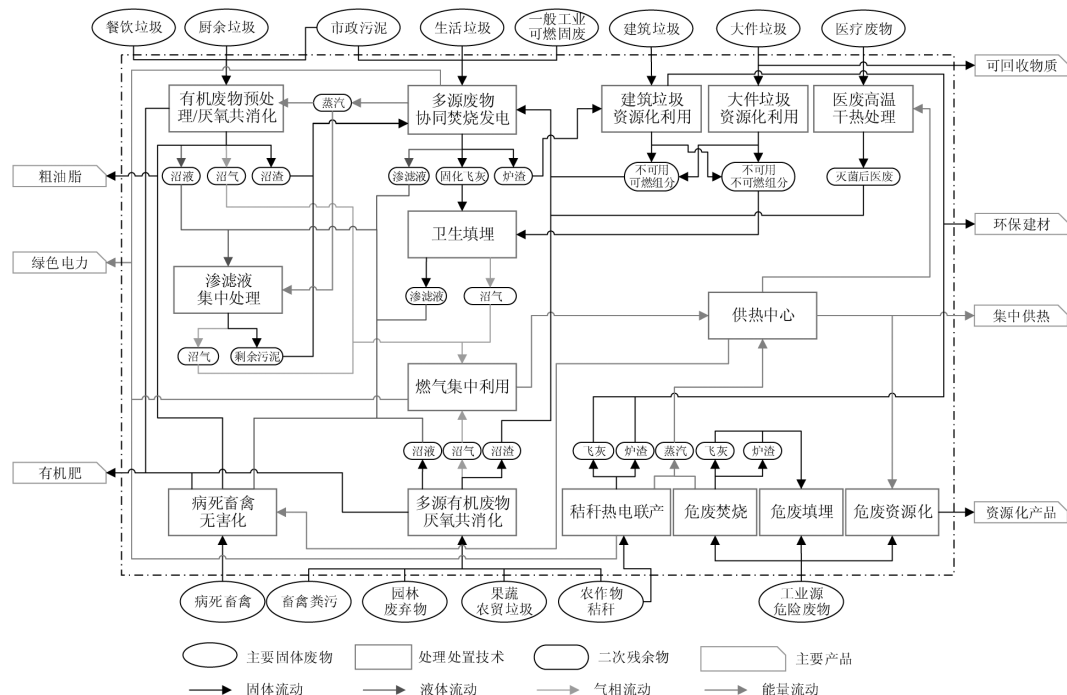


图 1 典型城市多源固废协同处置园区的技术路径

Fig.1 Technological paths of a typical solid waste collaborative disposal park

在该路径下,以垃圾焚烧项目为核心,协同处置餐厨、厨余垃圾、市政污泥、医疗废物、建筑垃圾、一般工业固废、园林垃圾、畜禽粪污等常见固废。

餐厨垃圾等有机固废可协同厌氧共消化;建筑垃圾和大件垃圾进行资源化利用;医疗废物通过高温消毒后根据理化性质采用焚烧或填埋处置;园区可燃

气集中收集利用,废水统一处置,垃圾焚烧和沼气燃烧产生的蒸汽可用于园区供热。

2 规划方法

系统规划方案是实现协同处置园区建设和运营的前提.规划应结合城市社会经济发展和固废管理需求,明确园区定位,充分考虑园区协同机制和技术间的协同共生点,进行技术路线筛选和设施规模匹配,提供环境-经济-能源效益综合最优的方案。

2.1 城市固废产排特征预测

首先需要摸清在规划期限内园区服务范围各类固废的产量.从数据上看,产量预测数据主要来自于规划城市的历史统计数据,包括城市规模、经济发展水平等变量.从方法上看,产量预测模型种类众多,可分为回归分析和时间序列分析两类^[31].回归分析模型旨在构建固废产量与各影响因素回归关系,从而通过影响因素推断固废产量.常用的回归分析模型有多元线性回归、支持向量机、人工神经网络等.时序分析模型则从产量的时间变化规律层面开展分析和预测,比如灰色模型、自回归滑动平均等。

2.2 城市固废流动模拟分析

第二步,理清城市固废从产生、收运、回收、处理各环节的流向和流量变化,并结合已有规划方案、政策要求、社会经济发展和技术水平进步等因素,分析提炼固废处置过程中的问题及改进措施.物质流分析是研究物质代谢较为主流的方法.该方法基于物质守恒,可以对一个系统物质和能量的输入、迁移、转化及输出进行定量分析^[32].目前已在城市固废管理系统中得到大量应用^[33].在固废处置园区规划中,通过采用物质流分析方法,可以模拟城市固废代谢过程,发现处置能力的缺口,明确园区发展定位、项目和规模需求。

2.3 技术路线筛选和规模匹配

第三步,筛选园区处理项目技术路线,核定建设规模,需要综合考虑园区协同机制、处置需求、环境影响、经济效益等多方面因素.本研究采用多约束非线性规划方法选择入园项目处置技术和规模,其数学模型如式(1)–(4)所示.目标函数为经济、环境、能源的总成本最小化,约束函数包括土地面积约束、总处理量约束、技术处理规模约束等,模型输出为各备选技术的选择结果。

目标函数:

$$\min C = \text{Fina} + \sum_{i,k} (\text{Mid}_{i,k} \times u\text{Eco}_k) + \text{Ener}_i \times u\text{Epce} \quad (1)$$

式中: C 为园区规划的总成本; Fina 为总财政投资,包括年均固定资产投资和年运行费用; $\text{Mid}_{i,k}$ 为项目 i 生命周期影响评估的中点指标 k 的取值; $u\text{Eco}_k$ 为中点指标 k 对应的单位生态成本; Ener_i 为项目 i 的能源净消耗量; $u\text{Epce}$ 为单位能耗的平均电价。

土地面积约束:

$$S = \sum_n S_i \leq S_u \quad (2)$$

式中: S 为园区项目总用地面积; S_i 为项目 i 的用地面积; S_u 为园区可用土地面积

总处理量约束:

$$G_i = \sum_{l \in W_i} X_{l,i} \quad (3)$$

式中: G_i 为固体废物 i 的产生总量; $X_{l,i}$ 为技术 l 处置固废 i 的量; W_i 为所有可处置固废 i 的技术集合。

技术规模约束:

$$S_l = n \times S_{l,\min} \geq \frac{\sum_l X_{l,i} + \sum_n X_{l,n}}{A_l} \quad (4)$$

式中: S_l 为技术 l 的建议项目规模, n 为整数; $S_{l,\min}$ 为技术 l 的最小生产线规模; $X_{l,n}$ 为利用技术 l 处理副产品 n 的量; A_l 为技术 l 的实际运行率。

2.4 园区处置效果定量评估

2.4.1 为评估规划园区的减量化、资源化和无害化效果,采用物质流分析的方法,对园区系统的废物及副产品、能量、水流情况进行模拟,分析物质或能量的使用总量及强度,从而找到节约资源、减少污染、改善环境的途径.本研究构建了减量化率、能源产生量、污水回用率、 CO_2 减排量等指标来表征园区代谢效果,计算方法如式(5)–(9)所示。

减量化率 WRR :

$$\text{WRR} = \frac{W_T - W_L}{W_T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: W_T 为入园固废总量; W_L 为最终填埋处置的固废量。

净能源产生量 NEC :

$$\text{NEC} = E_p - E_c \quad (6)$$

式中: E_p 为总能源产生量; E_c 为总能源消耗量。

污水回用率 WWRR :

$$\text{WWRR} = \frac{\sum W_{r,i}}{W_{\text{all}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中： $W_{r,i}$ 为各环节回用水的量； W_{all} 为园区总污水产量。

CO₂ 减排量 CDE:

$$CDE=\mu_1NEC+\mu_2PE-\mu_3IE-\mu_4DE \tag{8}$$

式中:PE 为资源化产品的量;IE 为投加辅料造成的碳排放;DE 为直接排放的温室气体量; μ_i 为转化系数。

2.4.2 固废协同处置园区可借鉴生态工业园的评价方法,基于生物群落关联度理论,将生态关联度(C_e)和总关联度(C_t)作为园区网络共生程度的评价指标^[36],计算公式如式(9)和(10)所示.根据园区项目间利用的物质不同,分为产业链(L_e ,即利用产品)和生态工业链(L_p ,即利用副产品和废弃物)两种关系.园区内总工业食物链数为 L_t .

$$L_t=L_e+L_p \tag{9}$$

$$C_e=\frac{L_e}{E(E-1)/2} \tag{10}$$

$$C_t=\frac{L}{E(E-1)/2} \tag{11}$$

式中: E 为园区内的项目数量。

3 案例应用

长安静脉产业园(以下简称“园区”)位于成都市龙泉驿区,龙泉山城市森林公园内,总面积 4.6km².依托园区内的垃圾填埋场,逐步建设了配套垃圾处理项目,如垃圾焚烧发电厂、垃圾渗滤液处理厂、危废处置中心、餐厨垃圾无害化处理项目等,已初步形成固废处置项目集群。

为有效解决成都市固体废弃物处理处置问题,提升环境质量,完善循环经济体系,本研究以 2016 年为基准年,基于上述协同机制和规划方法,对园区 2025 年的规划方案开展了研究。

3.1 成都市固废产量预测

表 2 成都市 2025 年典型固废产量预测结果
Table 2 Predicted results of typical solid waste production of Chengdu in 2025

固废类别	方法	变量	2016 年现状值 (万 t/a)	2016 年规范化处置能力 (万 t/a)	2025 年预测结果 (万 t/a)
工业危废	多元回归	GDP 增长率、第二产业比率	22.26	21.54	40.73
医疗废物	多元回归	人口、城镇化水平、医疗水平	1.58	2.19	2.01
污泥	多元回归	人口、污水产生量、污水收集率	52.28	43.8	163.05
生活垃圾	人均产量	人口、人均垃圾产量	385.16	402.05	450.74
餐厨垃圾	多元回归	餐饮零售额、GDP、城镇化水平	25.05	19.71	33.98
农贸废弃物	多元回归	人口、经济水平	47.45	暂无规范处置能力	52.41
园林废弃物	多元回归	人口、城市面积、城镇化率、绿地率	35.51	暂无规范处置能力	40.95
建筑垃圾	灰色系统模型	—	1500.00	暂无规范处置能力	2878.00

研究区域为成都市中心城区,包括金牛、武侯、龙泉驿、双流等 11 个行政区以及高新区、天府新区直管区(即“11+2”的区域结构).根据数据情况,分别采用多元回归、人均产量法、灰色系统模型等对成都市 2025 年典型固废类别的产量进行了预测,结果如表 2 所示.随着人口增长、经济发展和城镇化水平提高,成都市各类固废的产量均有所上升,其中污泥、生活垃圾、建筑垃圾的增长尤为迅速,需要加快处置设施建设进度。

3.2 城市固废流动分析

截止 2016 年底,成都市静脉产业建设情况如下:在危险废物方面,现有工业危险废物处置单位 16 家,处理规模达 22.3 万 t;1 家医疗废物集中运输和无害化企业,处置规模约为 2 万 t/a.市政污泥经过机械脱

水后运输至长安垃圾填埋场填埋或暂存至污泥池,也有部分通过厌氧消化和生物养殖等方式综合利用.在生活垃圾处置方面,以焚烧为主,现有 4 座垃圾焚烧发电厂,焚烧处理能力达 7200t/d,其余垃圾进入长安垃圾填埋场.餐厨垃圾处置以双流区和长安园区内的两个餐厨垃圾无害化项目为主,剩余部分直接倾倒、收集喂猪或混入生活垃圾处置.园林农贸废弃物暂无单独的处理处置设施.建筑垃圾资源化利用仅有初级试点,并无规模化应用.在可再生资源方面,成都市现有两家废弃电子电器产品拆解企业,总处理能力 400 万台/a;一家废旧汽车拆解项目,拆解能力 60000 辆/a;2 家废塑料回收企业,回收总量约为 60 万 t/a.基于上述分析,2016 年成都市主要固废类型的产生和流动,结果如图 3 所示。

总体来看,成都市各类固废中生活垃圾、建筑垃圾产量占比最大,其次是园林农贸和污泥.在处理处置方面,存在部分固废流向不明或暂存滞留的现象,园林农贸垃圾实际清运量不足 2%,建筑垃圾尚无规范消纳场,大部分运输至周边沟塘或空置场地简易堆存.其次,部分固废处置能力存在较大缺口,多种固

废混入生活垃圾处理,设施负荷较高,二次污染风险增加,未来危险废物产量增加,综合处置能力将面临较大缺口.此外,可回收固废的资源化利用水平不足,建筑垃圾资源利用率不足 10%,废旧塑料大部分通过生产工艺落后的小企业加工物理再生,处置技术亟待升级.

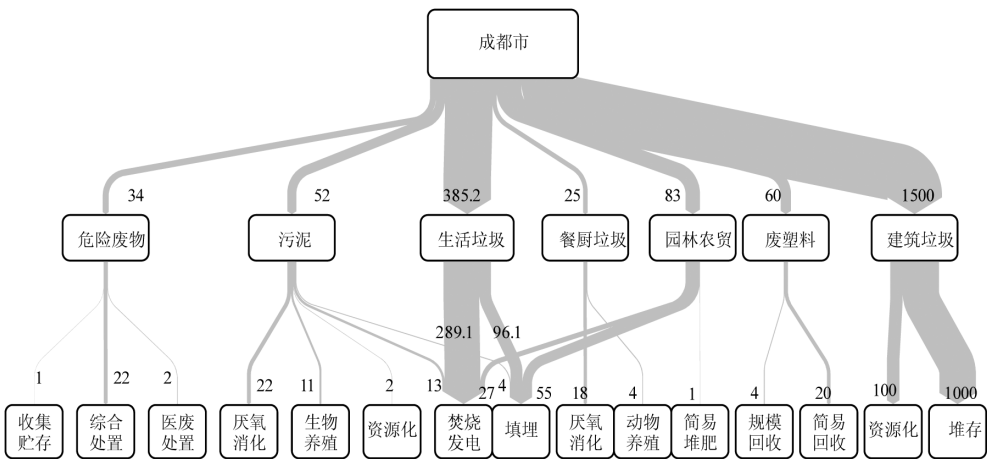


图 2 成都市主要固废物质流(2016 年,万 t/a)

Fig2 Material flow of major solid waste in Chengdu (2016, 10,000tons/year)

在成都市固废处置能力缺口不断增加的形势下,亟需开展科学规划以提高处置能力、增加处置品类,保障安全处置与资源化利用.园区作为城市固废的集中处置中心,将是成都市实现绿色发展,推进生态文明建设的重要载体.

3.3 园区现状及规划目标

园区内生活垃圾、餐厨垃圾、市政污泥和建筑垃圾的服务范围主要是成都市中心城区,服务人口为 1031.5 万人.危险废物和医疗废物服务范围为成都市全市.

园区是全市医疗废物和中心城区生活垃圾填埋的终端处置地区,现具有 90t/d 的医废处置和 5000t/d 的卫生填埋能力.生活垃圾焚烧、危险废物、建筑垃圾的消纳处置能力分别为 2400、89 和 6000t/d,占服务区域固废产生量的 19%~44%.园区餐厨垃圾处置规模达 300t/d,占服务区域产生量的 24%.此外,园区内尚无市政污泥、农林农贸等废弃物的处置设施.

由于园区已有建设项目未做系统性规划,造成项目布局分散,设施间相互独立,无法实现废水废渣的协同处置和基础设施共建共享,导致内部损耗和

资源浪费.针对园区发展定位和未来处置需求,本研究将通过空间优化布局,完善功能分区,重点考虑各项目工艺间的技术协同性和规模匹配,建立并完善以生活垃圾、市政污泥、餐厨垃圾、建筑垃圾、危险废物等固体废物处理处置为主的资源循环利用产业链条,推进固体废物协同处置,提升成都市固废资源无害化处理和资源循环利用水平.

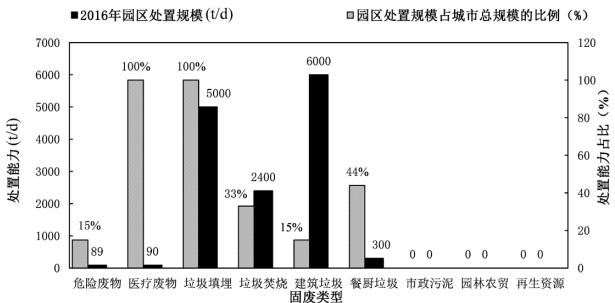


图 3 长安静脉产业园处置概况(2016 年)

Fig.3 Disposal overview of Chang'an Vein Industrial Park

3.4 项目筛选与规模匹配

3.4.1 设计理念 针对园区已有的存量项目,从处置规模扩增、处理技术改造、能源高效利用及副产

品资源化利用等方面予以重点优化提升.规划应重点提升生活垃圾、危险废物、餐厨垃圾、渗滤液等的处置能力;优化改造园区余热利用、多相态残渣协同处置、多源废水调配处理等问题,提高园区整体运行效率,降低运行成本.园区现有项目亟待优化的关键节点如表 3 所示.

表 3 园区协同关键节点识别
Table 3 Identify key collaborative nodes in the park

序号	项目类型	关键节点
11	生活垃圾焚烧发电	处置能力不足
2		余热未得到有效利用
3		渗滤液 COD 浓度过高,设备超负荷
4		炉渣未得到资源化利用
5	医疗废物处置	余热蒸汽尚未得到有效利用
6	垃圾填埋项目	陈腐垃圾难处置
7		渗滤液处置能力不足
8	建筑垃圾消纳	资源化利用水平不足
9	危险废物处置	处置能力不足
10		余热蒸汽尚未得到有效利用

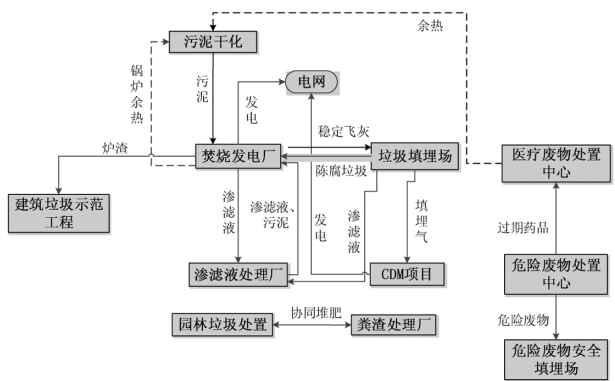


图 4 园区协同处置方案
Fig.4 Collaborative disposal plan of the park

3.4.2 模型构建
(1)总目标

$$C=\min[\sum_{l\in W_i}(X_{l,i}\times e_{l,i}^m)+\sum_{i\in G_l}\sum_{l\in W_i}(X_{l,i}\times E_{k,l,i})+\sum_{i\in G_l}\sum_{l\in W_i}C_L^0+\sum_i\sum_lX_{l,i}(g_{l,i}^h\times H_{l,i}^h)]$$

式中: $X_{l,i}$ 为固体废物 i 利用技术 l 处理的量; $e_{l,i}^m$ 为固体废物 i 利用技术 l 处理中环境影响 m 的单位产生量; $E_{k,l,i}^m$ 为能源 k 单位消耗量; C_L^0 为技术 l 的年均单

位设备投资成本; $g_{l,i}^h$ 为生产物资 h 的单位成本; $H_{l,i}^h$ 为物资 h 的单位消耗量.相关参数参考课题组已有研究的评估结果^[1].

(2)部分约束条件
土地面积约束:

$$\sum_{i=1}^ns_i\leqslant4.6\text{km}^2$$

处置规模约束:

$$\left\{\begin{array}{l}\sum_{l\in W_i}X_{l,\text{RW}}\geqslant8000\\\sum_{l\in W_i}X_{l,\text{FW}}\geqslant600\\\sum_{l\in W_i}X_{l,\text{SL}}\geqslant1500\\\sum_{l\in W_i}X_{l,\text{CW}}\geqslant6000\\\sum_{l\in W_i}X_{l,\text{HW}}\geqslant600\end{array}\right.$$

式中: $X_{l,i}$ 分别代表园区处置的生活垃圾、餐厨垃圾、污泥、建筑垃圾和危险废物;约束条件的单位为 t/d.

技术适用性约束:

协同焚烧发电是园区的核心设施,该技术主要受到入炉垃圾热值的影响.参考文献的研究^[33],确定入炉垃圾热值范围,约束条件如下式所示.其中, LHV_{mix} 为混合固废的低位热值,单位为 kJ/kg.

$$4604\leqslant\text{LHV}_{\text{mix}}\leqslant8372$$

其次考虑渗滤液厂处置技术的约束,基于渗滤液 C/N 为 5:1 时处理效果最佳的原则,得到如下约束方程:

$$\left\{\begin{array}{l}V_{\text{le}}=V_{\text{Ls}}\times\frac{10000-C}{55000}\quad\text{当}C\leqslant10000\text{mg/L}\\V_{\text{Ls}}+V_{\text{le}}\leqslant2300\end{array}\right.$$

式中: V_{le} 为焚烧发电厂每天输送到渗滤液厂的量; V_{Ls} 为填埋场产生的渗滤液输送至渗滤液厂的量, m^3 ; C 为填埋场渗滤液的 COD 浓度值,mg/L.

计算得到园区 2025 年规划方案如表 4 所示.其中,新建 6000t/d 的垃圾焚烧项目、100t/d 危废焚烧/填埋固化项目;扩建餐厨垃圾厌氧消化项目至 600t/d;依托新建 45t/d 的地沟油制生物柴油和 175 0t/d 的污泥干化焚烧项目;通过对原有危废和医废焚烧项目进行提质改造,实现了焚烧飞灰协同处置、蒸汽发电利用;通过引进园林绿化废物和污泥好氧

共堆肥、建筑垃圾物理粉碎制环保建材等先进技术,进一步提升园区资源化率.此外,园区新建多源渗滤液处置设施,实现了渗滤液集中处置;飞灰和二次残渣填埋处置.

表 4 规划项目信息表

Table 4 Information sheet on planned disposal facilities

序号	处理对象	处理技术	类型	处置规模 (t/d)
1	生活垃圾	焚烧发电技术	改造	2400
2		焚烧发电技术	新建	6000
3	餐厨和厨余垃圾	预处理制浆+中温湿式厌氧消化	扩建	600
4	地沟油	制生物柴油技术	新建	45
5	污泥	蒸汽热干化+焚烧/堆肥	新建	1750 (焚烧)
				100 (堆肥)
6	园林绿化废物	好氧共堆肥技术	新建	35
7	建筑垃圾	物理粉碎制环保建材	新建	200 万 t/a
9	危险废物	焚烧/固化填埋	新建	100
10		焚烧项目	改造	30
11	医疗废物	热解气化技术	改造	120
12	残渣	安全填埋	新建	500
13	飞灰	螯合固化+填埋	新建	360
14	渗滤液	水质均化+厌氧+膜生物反应器+纳滤+反渗透	新建	3500 m ³ /d
		曝气沉沙池+膜生物反应器+深度脱氮除磷		500 m ³ /d
15	生活污水、一般生产废水	曝气沉沙池+膜生物反应器+深度脱氮除磷	新建	500 m ³ /d

3.5 园区效果定量评估

园区规划建成后消纳固废量达 555.9 万 t/a,比规划前增加了 61.3%,可有效缓解成都市的固废处置难题.减量化率达 67.8%.在园区废水方面,危废处置和刚性填埋废水转运到危险废物处置中心处置,焚烧渗滤液、厌氧沼液等有机废水进入园区渗滤液处理厂处置.此外,生活污水和一般生产废水进入园区污水处理厂处理,处理后中水主要用于景观绿化,污水回用率达 80.3%.作为潜在的能源供应中心,通过焚烧发电、填埋气综合利用、厌氧产沼等清洁能源项目,全年累计发电量 1 361.1GWh,折算 CO₂ 减排量达 63.98 万 t/a.

园区总工业食物链数为 22 个,其中 20 个生态工业链、2 个产品链,计算得到园区项目间生态关联度 C_e 为 0.30,总关联度 C_t 为 0.33.与丹麦卡伦堡生态工业园、美国 Choctaw 生态工业园、月亮湾生态工业园等典型固废处置园区相比^[35],长安静脉产业园项

目间生态关联度较高,共生系统更稳定.

4 结论

4.1 典型城市固废处置主要包括焚烧、填埋、厌氧消化、好氧堆肥、水泥窑协同处置和资源化利用.考虑城市多源固废理化特性、处理技术特点及处置过程中的物质、能量代谢,总结多源固废园区化协同处置机制主要包括基于废弃物理化特性、基于能量代谢中节点链接和基于焚烧与填埋兜底保障 3 个方面.

4.2 城市多源固废综合处置园区规划方法体系涵盖 4 个组成部分,首先是对规划期固废产量的预测;其次,采用物质流方法分析城市固废处置现状和需求,明确园区定位和规划目标;第三,综合考虑技术、经济、政策等多方面约束和园区项目间的协同机制,构建非线性规划模型,筛选园区技术路线,核定规模;最后对规划园区的代谢效果和共生程度开展评价.

4.3 通过考虑协同处置机制下系统规划方法的应用,实现对成都长安静脉产业园的综合规划,方案表明,园区需要新建和改造项目 15 个,新增固废处置量 211.2 万 t/a,全年累计发电量可达 13.61 亿 kW·h,CO₂ 减排量 63.98 万 t/a;规划方案可以在满足成都市日益增长的综合处置需求的前提下,显著提升园区能源效益,并通过残余物与处置技术衔接,实现园区飞灰、炉渣 100%安全处置,固废减量化率达 67.8%,废水回用率达 80.3%,园区共生效果良好.

参考文献:

[1] 费凡.城市生物质废物处理系统耦合及技术选择模拟研究 [D]. 北京:清华大学, 2019.
Fei F. Urban Bio-Waste Treatment System Synergy Mechanism and Technology Selection Simulation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.

[2] Fei F, Qu L, Wen Z, et al. How to integrate the informal recycling system into municipal solid waste management in developing countries: Based on a China's case in Suzhou urban area [J]. Resources Conservation & Recycling, 2016,110:74-86.

[3] De Clercq D, Wen Z, Fan F. Performance evaluation of restaurant food waste and biowaste to biogas pilot projects in China and implications for national policy [J]. Journal of Environmental Management, 2017,189:115-124.

[4] 温宗国.无废城市:理论、规划与实践 [M]. 北京:科学出版社, 2020.
Wen Z G. Waste-free Cities: Theory, Planning and Practice [M]. Beijing: Science Press, 2020.

[5] 住建部.2020 年城市建设统计年鉴 [EB/OL].<https://www.mohurd.gov.cn/>

- gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html2021-10-12/2022-09-21.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. 2020 Statistical yearbook of urban construction [EB/OL]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html2021-10-12/2022.02-10>.
- [6] 生态环境部. 2020 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/gtfwyhxpj/gtfw/202012/P020201228557295103367.pdf2020-12-28/2022-09-21>.
- Ministry of Ecology and the Environment. Annual report on environmental prevention and control of solid waste pollution in large and medium-sized cities in 2020 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/gtfwyhxpj/gtfw/202012/P020201228557295103367.pdf2020-12-28/2022-09-21>.
- [7] Kosajan V, Wen Z, Zheng K, et al. Municipal solid waste (MSW) co-processing in cement kiln to relieve China's MSW treatment capacity pressure [J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2021, 167:105384.
- [8] Fei F, Wen Z, Ri S. Urban biowaste integrated management based on synergy mechanism and multi-objective optimization: A case study in Suzhou, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2022,823: 153691.
- [9] Luke Makarichi W J K T. The evolution of waste-to-energy incineration: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018,(91):812-821.
- [10] Ding Y, Zhao J, Liu J, et al. A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,293:126144.
- [11] Beylot A, Villeneuve J. Environmental impacts of residual municipal solid waste incineration: A comparison of 110 French incinerators using a life cycle approach [J]. *Waste Management*, 2013,33(12): 2781-2788.
- [12] Chen L, He Z, Yang L, et al. Optimal utilization of solid residue from phase-separation pretreatment before food waste anaerobic digestion [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022,372:133795.
- [13] Qi Y, Chen X, Wang W. Improved life cycle assessment of recycling organic wastes for practice [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195:1558-1571.
- [14] Zhao H, Liu H, Wei G, et al. Comparative life cycle assessment of emergency disposal scenarios for medical waste during the COVID-19 pandemic in China [J]. *Waste Management*, 2021,126:388-399.
- [15] Zhang X, Ye P, Wu Y. Enhanced technology for sewage sludge advanced dewatering from an engineering practice perspective: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,321:115938.
- [16] Li Y, Chen Y, Wu J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review [J]. *Applied Energy*, 2019,240:120-137.
- [17] 吴凯,翟艳丽,俞晓阳,等.从垃圾焚烧发电到静脉产业园的案例研究 [J]. *再生资源与循环经济*, 2018,11(4):13-19.
- Wu K, Zhai Y L, Yu X Y, et al. Case study from waste incineration power plant to venous industrial park [J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2018,11(4):13-19.
- [18] 方明,张冬冬,王朝雄.基于静脉产业园思维的水泥窑协同处置项目实践 [J]. *水泥技术*, 2020,(1):62-67.
- Fang M, Zhang D D, Wang C X. Practice of cement kiln co-processing project based on the thinking of venous industrial park [J]. *Cement Technology*, 2020,(1):62-67.
- [19] 宁红艳.餐厨、地沟油垃圾处理与生活垃圾焚烧发电处理的一种新型结合模式 [J]. *绿色科技*, 2019,(22):138-140.
- Ning H Y. A new combination of kitchen and gutter oil waste treatment and MSW incineration power plant [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019,(22):138-140.
- [20] 纪莎莎,唐建国,张悦,等.城市生活废弃物综合处理静脉产业园的低碳化技术路线探索 [J]. *中国环境管理*, 2017,9(4):34-38.
- Ji S S, Tang J G, Zhang Y, et al. Exploration on low carbonization technical route of municipal waste comprehensive treatment venous industry park [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2017,9(4):34-38.
- [21] 李海波.静脉产业园规划设计研究——以鄂尔多斯市为例 [J]. *环境保护与循环经济*, 2020,40(8):4-7.
- Li H B. Study on the planning and design of venous industry park—Erdos City as an example [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2020,40(8):4-7.
- [22] 闵海华,潘晓峰.杭州大江东循环经济产业园规划构思 [J]. *环境卫生工程*, 2017,25(3):79-81.
- Min H H, P X F. Planning and design of Dajiangdong circular economy industrial park in Hangzhou [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2017,25(3):79-81.
- [23] 欧阳云生.城市废弃物生态工业园区的规划与设计研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2007.
- Ou Yang Y S. Research on Planning and designing of ECO- industrial park about city castoff [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [24] Xiao H, Li K, Zhang D, et al. Environmental, energy, and economic impact assessment of sludge management alternatives based on incineration [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,321: 115848.
- [25] 彭小龙.医疗废物高温蒸煮及其与生活垃圾焚烧协同处理 [J]. *环境卫生工程*, 2020,28(2):51-54.
- Peng X L. Thermophilic Digestion of Medical Waste and its Co-Processing with Incineration of MSW [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2020,28(2):51-54.
- [26] 王天义,蔡曙光,胡延国.生活垃圾焚烧厂渗滤液处理技术与工程实践 [M]. 北京:化学工业出版社, 2018.
- Wang T Y, Cai S G, Hu Y G. Waste treatment technology and engineering practice for municipal solid waste incineration plants [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.
- [27] 周雨绮,许俊超,卓桂华,等.中温条件下污泥接种量对污泥-餐厨垃圾联合厌氧发酵产氢余物产甲烷的影响 [J]. *环境工程*, 2021,39(6): 144-149.
- Zhou Y Q, Xu J C, Zhuo G H, et al. Influence of sludge inoculation volume on methanogenesis of residue from anaerobic fermentative hydrogen production using combined sludge and food waste under medium temperature condition [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(6):144-149.
- [28] 王子铭,洪光.垃圾焚烧发电厂冬季垃圾池加热方案研究 [J]. 中

- 国环保产业, 2020,(6):69-72.
- Wang Z M, Hong G. Research on waste bunker heating scheme for MSW incineration power plant in winter [J]. China Environmental Protection Industry, 2020,(6):69-72.
- [29] 汪 涛.餐厨垃圾厌氧消化处理全过程综合评价研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2021.
- Wang T. Study on comprehensive assessment of whole process for food waste anaerobic digestion [J]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [30] You S, Wang W, Dai Y, et al. Comparison of the co-gasification of sewage sludge and food wastes and cost-benefit analysis of gasification- and incineration-based waste treatment schemes [J]. Bioresource Technology, 2016,218:595-605.
- [31] Markic D, Hristina C, Bjelić D, et al. Using material flow analysis for waste management planning [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2019,28:255-265.
- [32] 王天天,卢笛音,曹 雅.物质流分析方法及应用研究综述 [J]. 再生资源与循环经济, 2017,10(8):9-12.
- Wang T T, Lu D Y, Cao Y. A review of material flow analysis methods and application [J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2017,10(8):9-12.
- [33] 王丽娜.基于物质流分析的北京城市生活垃圾减量化研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2018.
- Wang L N. Research on municipal solid waste reduction of Beijing based on material flow analysis [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
- [34] 尹 琦,肖正扬.生态产业链的概念与应用 [J]. 环境科学, 2002,(6):114-118.
- Yin Q, Xiao Z Y. Concept and application of ecological industry chain system [J]. Environmental Science, 2022,(6):114-118.
- [35] 麦茵茵,曾俏俏.基于生态关联度分析的工业园评价 [J]. 广东化工, 2015,42(20):37-38.
- Mai Y Y, Zeng Q Q. Industrial park assessment base on eco-connectance analysis [J]. Guangdong Chemical Industry, 2015,42(20): 37-38.
- 作者简介:** 温宗国,男,教授,博士,主要研究方向为城市固废资源化与循环经济、环境与碳排放系统工程.发表论文 70 余篇.
wenzg@tsinghua.edu.cn.