

湿垃圾集中处理技术的困境分析及发展建议*

胡愈之¹ 楼紫阳^{2,3,4#} 陈芳源⁵ 贾悦⁵ 赵由才⁷

(1.上海交通大学中英国际低碳学院,上海 201306;2.上海交通大学环境科学与工程学院,上海 200240;
3.上海市固体废物处理与资源化工程研究中心,上海 200240;4.中国城市治理研究院,上海 200030;
5.上海市农工民主党上海市委员会,上海 200241;6.上海环境卫生工程设计院有限公司,上海 200232;
7.同济大学环境科学与工程学院,上海 200092)

摘要 以上海市垃圾分类实践为例,追踪了强制分类一年来上海市湿垃圾的变化特征,并根据目前在运行的实际湿垃圾处理工程案例,系统分析总结了湿垃圾集中处理技术运行过程中的困境和问题。结果表明,上海市人均湿垃圾产量为0.39 kg/d,具有高油盐、高含水率、高有机质等特点,具备较好的资源化前景。当前湿垃圾典型处理技术主要有好氧堆肥、厌氧消化和生物转化,从技术可行、经济实用以及环境效应等角度比较了3种典型技术的特点。针对湿垃圾集中处理存在的产物出路不明确、处置过程中的二次污染严重等问题,从湿垃圾出路、投资成本等方面提出针对性建议,为湿垃圾处理路径选择和问题解决提供科学支撑。

关键词 湿垃圾 组分特征 处理技术 环境效应 垃圾分类

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.12.023

The dilemma and development trend of centralized treatment technology for household food waste HU Yuzhi¹, LOU Ziyang^{2,3,4}, CHEN Fangyuan⁵, JIA Yue⁵, ZHAO Youcai⁷. (1. China-UK Low Carbon College, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201306; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 3. Shanghai Engineering Research Center of Solid Waste Treatment and Resource Recovery, Shanghai 200240; 4. China Institute for Urban Governance, Shanghai 200230; 5. Shanghai Committee of the Chinese Peasants' and Workers' Democratic Party, Shanghai 200241; 6. Shanghai Environmental Sanitation Engineering Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200232; 7. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: Variations of household food waste (HFW) properties were traced and measured for one year after Shanghai started mandatory garbage sorting as an example. The dilemma of the HSW's centralized treatment were systematically identified and summarized according to the existing projects in operation. It was found that the generation rate of HFW in Shanghai was 0.39 kg/(d · per), which had a good prospect of resource utilization with the characteristics of high oil and salt, high water content, and high organic matter. Meanwhile, three typical HFW treatment methods, including aerobic composting, anaerobic digestion, and biotransformation technologies, were compared from the perspectives of technical feasibility, economy and environmental effects. The severe secondary pollution emissions and the huge unknown byproducts generated were two main problems, and specific suggestions were put forward for the aspects of the outlets and investment costs, which might be useful to provide scientific decision support for HFW treatment.

Keywords: household food waste; composition characteristics; treatment technology; environmental effect; waste classification

上海市于2019年7月开始实施《上海市生活垃圾管理条例》,该条例提出垃圾强制分类要求,对垃圾分类工作具有显著的推进作用。垃圾的强制分类一方面改变了城市垃圾管理模式和群众分类习惯,另一方面也直接影响了垃圾组分和产量,对垃圾的

末端处理系统提出了新的要求。传统的填埋、焚烧已不能满足湿垃圾处理的需求,面对当前湿垃圾量大、技术选择的不确定性,本研究以上海市为例,通过聚焦湿垃圾的变化特征,同时结合已实施和试运行的湿垃圾实际处理工程案例,开展了实地调研和

第一作者:胡愈之,女,1996年生,硕士研究生,主要从事固体废物资源化研究。*通讯作者。

*国家重点研发计划重点专项(No.2018YFC1900704);上海市软科学研究计划项目(No.19692114600)

监测,探讨垃圾分类对其处理过程和稳定运行的影响,总结其处理过程中遇到的困境以及技术的适应性,为各地垃圾分类处理的实施和推广提供经验。

1 湿垃圾特点和产量

1.1 湿垃圾组分特点

湿垃圾主要包括餐厨垃圾和餐饮垃圾,受饮食习惯和消费观念的影响,我国分出的湿垃圾具有高油盐、高含水率、高有机质等特点。以上海市分类推进的力度为例,根据现场取样分析得到分类后湿垃圾特性(见表1)。与混合垃圾相比,随着垃圾分类的实施,湿垃圾品质显著提升,厨余类物质质量分数上升至95%以上,纸类、橡塑类和纺织类等杂质明显减少,偏弱酸性($\text{pH}=4.5\sim 6.5$)。

表1 分类后湿垃圾特性¹⁾
Table 1 Characteristic of household food waste after classification %

项目	数值
含水率	80~90
含油率	2~4
杂质	4~7
有机质(干基)	70~95
含盐率	0.5~1.8
元素	C
	38.0~50.0
	H
	6.0~6.8
N	1.2~2.1
	S
	1.1~1.4

注:1)以质量分数计。

1.2 湿垃圾产量

湿垃圾产量与垃圾分类覆盖面积和推进力度密切相关。以上海市为例,2019年2月上海市开展垃圾分类试点工作,湿垃圾产量为4400 t/d,随着垃圾分类工作逐步开展,湿垃圾产量逐步上升,2019年6

月,上海市湿垃圾产量增致6950 t/d。2019年7月上海市正式实施垃圾强制分类,8月湿垃圾产量迅速升至9200 t/d,并一直保持在近万吨的日产量^[1]。

按2019年上海市人口统计数据(常住人口2428.14万)^[2]计算,上海市人均湿垃圾产量约0.39 kg/d,而其他试点城市北京市、深圳市人均湿垃圾产量分别为0.27、0.35 kg/d^[3-4]。湿垃圾的人均产量主要与城市食物消费和经济水平有直接关联,对比美国(0.83 kg/d)^[5]、德国(0.41 kg/d)^[6]和日本(0.43 kg/d)^[7]等经济水平较高的国家,我国未来湿垃圾的产量还有可能增长。另外,虽然政府部门主导推行光盘行动等一系列活动,但目前仍存在食物浪费现象,导致湿垃圾产量居高不下^[8]。据统计,我国城市平均食物浪费率达93 g/(人·餐),厨余类食物垃圾量占到生活垃圾总量的53.3%^[9],远高于德国(26.9%)^[10]等发达国家。

2 典型湿垃圾处理技术现状

2.1 湿垃圾处理典型技术

为充分利用湿垃圾中有机质,可以采用的集中处理技术主要包括好氧堆肥、厌氧消化和生物转化技术(如黑水虻养殖)等。根据上海市实际工程案例,3种典型技术的工艺流程见图1至图3,技术特点总结见表2。

由表2可见,3种典型处理技术对于湿垃圾进料需求各异,一般黑水虻养殖生物转化技术要求垃圾低油脂、低盐度,而厌氧消化为充分发挥其传质性能,大多需经过浆化处理,好氧堆肥为了保证通风,通常粒径偏大。对于黑水虻养殖生物转化技术,餐厨垃圾的收运和存储时间更有严格要求,因大城

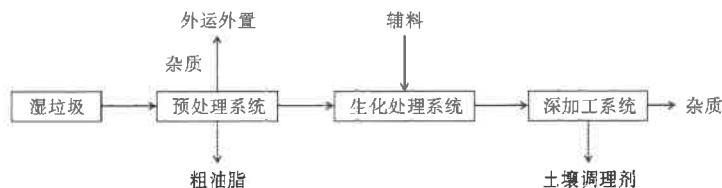


图1 湿垃圾好氧堆肥工艺流程

Fig.1 The process of aerobic composting of household food waste

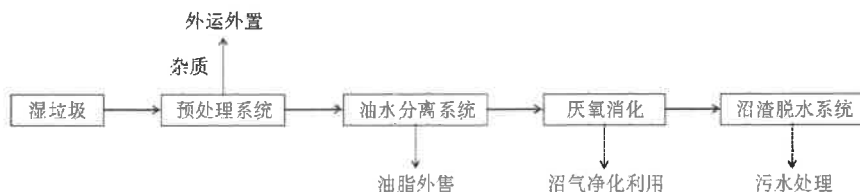


图2 湿垃圾厌氧消化工艺流程

Fig.2 The process of anaerobic digestion of household food waste

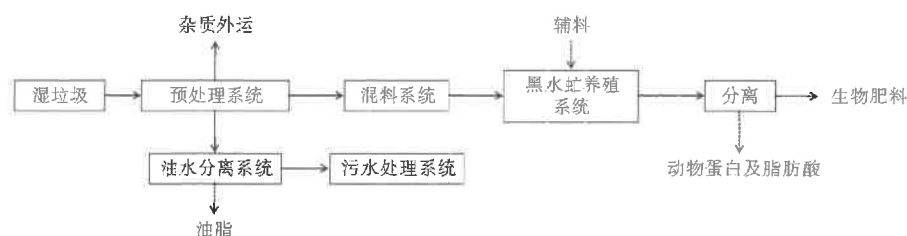


图 3 湿垃圾黑水虻养殖生物转化工艺流程

Fig.3 The process of bioconversion by *Hermetia illucens* L. cultivation of household food waste

表 2 湿垃圾处理技术比较

Table 2 Comparison of treatment technologies of household food waste

处理技术	进料要求	运行要求	产物去向
好氧堆肥	进料粒径小于 5 cm, 含水率低于 85%, 有机质(干基)质量分数大于 97%, 不含有毒有害组分	供氧充足, pH 维持在 7.0~8.5, 运行温度处于 55~60 °C	制成土壤调理剂用于土地利用
厌氧消化	含固率 8%~10%, 进料粒径小于 6 mm, 呈浆液状, 不含有杂质	消化温度 33~40 °C, 停留时间 20~30 d	沼气发电, 沼液经处理后达标排放, 沼渣脱水后焚烧填埋
黑水虻养殖生物转化	含水率 70%~80%, 进料粒径小于 2 cm, 含盐率低于 2%, 含油率低于 4%	幼虫饲料喂养周期 5~7 d, 养殖温度 27~30 °C, 光照强度 200~400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, pH 在 5~11	转化为动物蛋白、有机肥等, 作为附加值产品销售

表 3 湿垃圾典型处理技术的适用性比较

Table 3 Comparison of applicability of typical treatment technology for household food waste

项目	好氧堆肥	厌氧消化	生物转化(以黑水虻养殖为例)
处理规模/($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$)	100~400	200~1 000	<100
无害化率/%	>90	>95	>90
减量化率/%	70~90	60~85	60~70
产物	土壤调理剂	沼气	动物蛋白+有机肥
产物产出率	30%~40% ¹⁾	80~100 m^3/t	30%~40% ¹⁾

注: ¹⁾以质量分数计。

市垃圾收运距离过长, 基本在 1 d 以上, 餐厨垃圾易酸化而影响品质^[11], 因此应用黑水虻养殖生物转化技术时需控制垃圾收运距离在合适范围以保证为生物提供适宜的营养成分和活性物质。

2.2 湿垃圾处理典型技术可行性和经济性

几种典型湿垃圾集中处理技术的适用规模以及处理后产物有较大的差别, 具体见表 3。黑水虻养殖生物转化技术一般适用于少量湿垃圾处理, 目前在试和推进的黑水虻养殖生物转化技术项目基本在 100 t/d 以下; 厌氧消化技术由于可以通过规模化运作, 处理规模相对较大, 老港湿垃圾资源化处置中心处理规模高达 1 000 t/d; 好氧堆肥技术需要有较大的场地来满足产品堆肥的需求, 但随着工程化技术的应用, 机械化程度逐渐升高, 占地面积有所减少, 其处理规模介于前两者之间。

技术的经济性是决定其市场化、可持续性的关键要素。通过对上海市闵行区某 500 t/d 的餐厨垃圾资源化利用中心(好氧堆肥技术)、浦东新区某 600 t/d 有机质固废处理厂(厌氧消化技术)和绍兴

市某 40 t/d 餐厨垃圾处理中心(生物转化技术)的调研, 对 3 种典型技术进行经济性分析, 结果见表 4。经过对比, 好氧堆肥过程需提供大量的曝气装置并保持一定温度, 同时也受到进料垃圾不稳定因素的影响, 其运行费用相对较高; 而厌氧消化、生物转化技术本身运行费用相对偏低。湿垃圾处理过程中, 油脂、动物蛋白、有机肥等产品是重要的收益源, 其价值从上百到上千元不等; 沼气再利用是厌氧消化技术的主要收益来源, 其产量与进料垃圾中有机质含量及反应条件有关, 提高产气及发电效率是厌氧消化技术后续发展的关键。

表 4 3 种典型湿垃圾处理技术的经济性分析

Table 4 Economic analysis of 3 typical treatment technology for household food waste

项目	好氧堆肥	厌氧消化	生物转化
产品附加值	300~2 500 元/t	1.2~1.4 元/ m^3	450~2 500 元/t
投资金额/(万元· t^{-1})	40~60	50~80	30~50
运行费用/(元· t^{-1})	400~600	200~300	200~300

3 讨论与建议

基于经济、技术层面的对比分析发现,3种典型湿垃圾处理技术的适用范围、经济性等都有差别。除此之外,湿垃圾处理产物的出路是目前较为棘手的问题,由于季节性变化,城市湿垃圾产量存在一定波动性,厌氧消化技术由于生化反应周期长(约25 d)、沼液产量大(单位垃圾沼液产量约0.5 t/t)等问题,目前大都依靠焚烧托底处置。而好氧堆肥易受进料垃圾组分影响,且堆肥产物当前未有相应的土地利用质量控制标准和规范而影响其后续出路。生物转化技术受进料品质和运行条件影响较大,黑水虻等生物经养殖后理论上虽然可以作为高质量的蛋白,但在未有规模化运行条件下,产品出路仍不能持久。

湿垃圾的出路成为影响处理技术选择的关键因素,在以农林业为主的区域,可以大力发展好氧堆肥或生物转化技术,提高资源化产品质量,形成相应的产业链以实现就地无害化回收还田、生态利用。另外,投资成本和经济收益也是技术选择的重要依据。好氧堆肥和生物转化技术在保证产品质量稳定和下游销路畅通的基础上,能以较低的投资成本,在实现湿垃圾减量处理的同时为地方带来一定经济利益,可利用相应的市场行为推进其发展,如政府购买服务、特许经营、建设一经营一转让模式(BOT)等,而厌氧消化技术通常需要相关部门在前期有较大的资金投入以完善设施建设,故适用于经济发达地区。因此,就目前我国城市发展规模而言,人口密集、经济发展较好的超大或特大型城市可优先采用厌氧消化技术对湿垃圾进行大规模集中处理,以应对城市巨大的湿垃圾产生量,在中小型城市或边缘地区,需结合实际情况因地制宜开展选择,可考虑好氧堆肥或生物转化技术以实现就近资源化处理。

湿垃圾处理中心大多是已有垃圾处理模式下的新工程项目,从现有运行中心实际情况看,恶臭等二次污染仍然较为严重,且渗滤液就地处理困难较大,在现有垃圾处理布局基本完备的基础上,这些新项目的选址和运行还需考虑恶臭等可能带来的邻避问题。

另外湿垃圾作为重要的生物质,其处理处置过程中碳排放的影响也是关注点。有人认为厌氧消化技术产沼利用过程的低碳化程度达93.7%^[12]。通过

有效回收热量和电能降低温室气体排放量^[13-15],可认为是具有较小综合环境影响的处理技术^[16]。湿垃圾厌氧消化处理设备的运行效率将直接影响其环境效应,一般情况下单相厌氧消化的节能和温室气体减排效果优于双相^[17],而厌氧、好氧相结合的处理模式与单一厌氧处理相比可带来更多正向的环境效应^[18]。肥料作为湿垃圾中碳源的有机载体,其土壤再利用过程亦能有效减少碳排放^[19],但实际上从源头节约食物、避免食物浪费和食物垃圾才是最佳的碳减排举措^[20],可以从根本上实现经济、环境利益最大化。此外,湿垃圾处理技术的选择还应关注其环境效应和生态风险,需要充分发展适合我国特点的生命周期分析理论,建立符合实际情况的数据库和案例。对照已有研究可以发现,研究系统的边界条件、产物后续利用等均有所不同,使得研究结果间的比较存在困难,后续应以实际工程案例为基础,开展相同边界条件下的对比,构建相关的基础框架和数据库以及对固废处理处置及其所需数据提供支撑的系统。

4 结论与展望

(1) 湿垃圾处理技术的产物出路是目前亟需解决的主要问题,制定针对湿垃圾处理的技术规范和产物出路标准,使其有法可依,对打通末端资源化产物出路、有机肥可持续稳定利用以及形成良好的市场环境具有重要意义。

(2) 湿垃圾处理技术选择需关注环境效应,因地制宜开展多维度的综合评估,形成符合湿垃圾特点的具有可操作性的技术选择机制。在有效推进垃圾分类收集的基础上,以可持续发展为导向,实现湿垃圾集中处理的规模化和产业化。

(3) 以湿垃圾处理为契机,以实际分类分流处理的垃圾处置项目为基础,建立本土化固废管理框架和数据库,结合定性、定量指标综合分析,搭建适合垃圾特征的固废评估体系,从而为垃圾分类的推广和实施提供可靠的评估方法和科学支撑。

参考文献:

- [1] 上海市绿化市容局.垃圾分类一年“成绩单”亮相发布会!各区测评得分均超92分[EB/OL].[2020-11-30].<http://lhrs.sh.gov.cn/xwfbh/20200703/ce1b48a472d7491a880bbeda774893ff.html>.
- [2] 上海市统计局,国家统计局上海调查总队.2019上海统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019.

- [3] 北京市城市管理委员会.《北京市生活垃圾管理条例》实施半年,我市召开进展情况新闻发布会[EB/OL].[2020-11-30].http://csglw.beijing.gov.cn/zmhd/hdft/202011/t20201104_2128348.html.
- [4] 深圳垃圾分类展|2020中国厨余垃圾处理市场前景分析[EB/OL].[2020-11-30].https://www.sohu.com/a/390725663_424223.
- [5] USEPA Solid Waste and Emergency Response.Advancing sustainable materials management: facts and figures 2013[R].Washington,D. C.:USEPA Solid Waste and Emergency Response,2014.
- [6] 徐海云.德国家庭可生物降解有机垃圾管理的启示[EB/OL].[2020-11-30].<http://www.cn-hw.net/news/201808/27/43459.html>.
- [7] 王云飞,金宜英.从餐厨废弃物看日本“变废为宝”的模式创新[J].环境保护,2012(16):72-74.
- [8] FAO.Global food losses and food waste-extent,causes and prevention[R].Rome:FAO,2011.
- [9] WANG L E,LIU G,LIU X,et al.The weight of unfinished plate: a survey based characterization of restaurant food waste in Chinese cities[J].Waste Management,2017,66:3-12.
- [10] BMU.Waste management in Germany 2018 - facts,data,diagrams[R].Berlin:BMU,2018.
- [11] 邵君妍,罗恩华,金宜英,等.中国餐厨垃圾资源化利用系统建设现状研究[J].环境科学与管理,2018,43(4):39-43.
- [12] 李欢,金宜英,李洋洋.生活垃圾处理的碳排放和减排策略[J].中国环境科学,2011,31(2):259-264.
- [13] SLORACH P C,JESWANI H K,CUÉLLAR FRANCA R,et al.Assessing the economic and environmental sustainability of household food waste management in the UK: current situation and future scenarios[J].Science of the Total Environment,2020,710:135580.
- [14] BRUNKLAUS B,REX E,CARLSSON E,et al.The future of Swedish food waste: an environmental assessment of existing and prospective valorization techniques[J].Journal of Cleaner Production,2018,202:1-10.
- [15] TAKATA M,FUKUSHIMA K,KAWAI M,et al.The choice of biological waste treatment method for urban areas in Japan - an environmental perspective[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2013,23:557-567.
- [16] 陈冰,封静,黄文雄,等.应用生命周期模型评价餐厨垃圾处理技术[J].环境工程学报,2011,5(8):1857-1862.
- [17] YU Q,LI H,DENG Z,et al.Comparative assessment on two full-scale food waste treatment plants with different anaerobic digestion processes[J].Journal of Cleaner Production,2020,263:121625.
- [18] ZHAO Y,DENG W.Environmental impacts of different food waste resource technologies and the effects of energy mix[J].Resources,Conservation and Recycling,2014,92:214-221.
- [19] PIKAAR I,DE VRIEZE J,RABAEY K,et al.Carbon emission avoidance and capture by producing in-reactor microbial biomass based food,feed and slow release fertilizer: potentials and limitations[J].Science of the Total Environment,2018,644:1525-1530.
- [20] BERNSTAD S S A,ANDERSSON T.Food waste minimization from a life-cycle perspective[J].Journal of Environmental Management,2015,147:219-226.

编辑:丁 怀 (收稿日期:2021-01-10)

(上接第1619页)

参考文献:

- [1] 吴建平,李彦,杨小力.促进温室气体和大气污染物协同控制的建议[J].中国经贸导刊,2019(23):39-41.
- [2] 陈超,杨乐,徐鸿,等.杭州市主要温室气体浓度变化特征[J].环境污染与防治,2014,36(1):69-72,96.
- [3] 高庆先,高文欧,马占云,等.大气污染物与温室气体减排协同效应评估方法及应用[J].气候变化研究进展,2021,17(3):268-278.
- [4] 贾璐宇,王艳华,王克,等.大气污染防治措施二氧化碳协同减排效果评估[J].环境保护科学,2020,46(6):19-26,43.
- [5] 周颖,张宏伟,蔡博峰,等.水泥行业常规污染物和二氧化碳协同减排研究[J].环境科学与技术,2013,36(12):164-168,180.
- [6] 毛显强,曾校,刘胜强,等.钢铁行业技术减排措施硫、氮、碳协同控制效应评价研究[J].环境科学学报,2012,32(5):1253-1260.
- [7] 毛显强,邢有凯,胡涛,等.中国电力行业硫、氮、碳协同减排的环境经济路径分析[J].中国环境科学,2012,32(4):748-756.
- [8] 颜敏,郑卓云,徐光仪,等.大气污染物与温室气体协同控制效应案例研究[J].广东化工,2019,46(4):132-133.
- [9] 张杨,付凌波,李薇,等.基于黑龙江省大气污染防治行动计划的温室气体减排核算[J].中国人口·资源与环境,2015,25(11):333-336.
- [10] 邢有凯,毛显强,冯相昭,等.城市蓝天保卫战行动协同控制局地大气污染物和温室气体效果评估——以唐山市为例[J].中国环境管理,2020,12(4):20-28.
- [11] 陶士康,张清爽,安静宇,等.基于地基观测及源清单的2017—2019年德州市秋冬季大气污染防治效果评估[J].环境科学研究,2019,32(10):1739-1746.
- [12] 宗亚楠,李王峰,毛磊,等.基于CAMx模型的福州市PM_{2.5}来源解析[J].环境科学与技术,2018,41(增刊1):251-256.
- [13] BOVE M C,BROTTO P,CASSOLA F,et al.An integrated PM_{2.5} source apportionment study: positive matrix factorization vs. the chemical transport model CAMx[J].Atmospheric Environment,2014,94:274-286.
- [14] 李璇,聂滕,齐珺,等.2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析[J].环境科学,2015,36(4):1148-1153.
- [15] 张智答,王骁琦,张晗宇,等.京津冀地区典型城市秋冬季PM_{2.5}输送特征研究[J].中国环境科学,2021,41(3):993-1004.
- [16] LU X C,FUNG J C H.Sensitivity assessment of PM_{2.5} simulation to the below-cloud washout schemes in an atmospheric chemical transport model[J].Tellus B: Chemical and Physical Meteorology,2018,70(1):1-17.
- [17] 贾佳,韩力慧,程水源,等.京津冀区域PM_{2.5}及二次无机组分污染特征研究[J].中国环境科学,2018,38(3):801-811.
- [18] 刘茂辉,徐媛,岳亚云,等.天津《大气污染防治行动计划》实施减排效益[J].环境科学与技术,2020,43(5):124-131.

编辑:胡翠娟 (收稿日期:2021-06-18)