



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202203018 中图分类号 X820.3 文献标识码 A

杨建新, 刘鹤. 厨余垃圾粉碎机应用的环境影响研究现状与展望[J]. 环境工程学报, 2022, 16(9): 2949-2957. [YANG Jianxin, LIU He. The state of art and prospects of studies on environmental impact of food waste disposers[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(9): 2949-2957.]

厨余垃圾粉碎机应用的环境影响研究现状与展望

杨建新^{1,2,✉}, 刘鹤^{1,2}

1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100089; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要 为探究厨余垃圾粉碎机 (food waste disposer, FWD) 应用后的潜在环境影响, 分别从生活垃圾减量化效益, 垃圾处理系统能量流变化, 碳减排效益, 酸化以及富营养化效应等方面系统地梳理针对该设备的当前研究进展。结果表明, FWD 的应用可实现厨余垃圾的源头分离, 直接减少了城市生活垃圾的收运数量, 但系统的净能源产出仍存在不确定性; FWD 在降低碳排放和酸化效应方面有正向作用, 但会增加富营养化效应。未来研究重点建议聚焦于本地化的清单数据挖掘, 深化厌氧消化模式和 FWD 模式的环境影响的对比研究, 分析 FWD 普及率阈值与环境影响的相互关系, 以及探究 FWD 应用的新模式。

关键词 厨余垃圾粉碎机; 减量化; 潜在环境影响评价; 能量流分析

随着经济的快速发展以及城市化进程的加速, 厨余垃圾在城市固体废物管理系统中占据愈发重要的位置。据统计, 厨余垃圾在生活垃圾中占比可达 50.0% 以上^[1-3], 其化学组份主要为淀粉、纤维素、蛋白质、脂质和无机盐^[4]。厨余垃圾有 3 大特性: 一是含水率高, 占比高达 80%^[5], 易腐烂并散发恶臭, 不仅造成卫生问题, 也不利于垃圾收运; 二是油脂和盐类物质含量高^[6-7], 若不能妥善处理, 会影响后续综合利用效果, 影响资源化产物的品质^[4]; 三是蕴含丰富的碳资源, 碳含量高达约 50.0%, 碳氮比约为 20.0^[8-15], 为其资源化利用提供了良好的物质基础。

目前, 我国厨余垃圾资源化利用的途径主要是厌氧消化处理 (74.3%), 少量采用好氧堆肥 (13.5%)、饲料化 (12.2%) 等模式^[16]。然而, 厨余垃圾的资源化依然面临 2 大困境。首先, 分类收运困难, 厨余垃圾尚未做到完全从生活垃圾中分离出来单独收集^[17-20]。目前, 在试点城市分类收运的实践中, 分离后的厨余垃圾中依然含有 10.0%~25.0% 的杂质, 如木筷、纸杯、塑料袋^[21-22], 这使得预处理工序十分复杂。其次, 资源化处理技术存在弊端。厌氧消化技术的经济成本高且安全隐患大^[21, 23-24]; 好氧堆肥占地面积大且会带来严重的二次污染^[25-26]; 饲料化技术尚不成熟且存在同源性危害^[24]。为应对上述困境, 厨余垃圾粉碎机 (food waste disposer, FWD) 开始引入我国厨余垃圾管理实践。

FWD 作为一种新型厨房电器, 主要用于厨余垃圾的粉碎处理, 它提供了一种处理厨余垃圾的全新方法。FWD 的主体是由不锈钢材质的研磨腔和研磨盘组成, 体积适中, 通常安装于厨房水池台下并且连接排水管道。在工作时, 通过高速运转的永磁电机带动研磨腔中的转盘, 厨余垃圾便在离心力的作用下互相撞击, 可以在极短时间内被研磨粉碎成细小颗粒, 最终随水流汇入污水处

收稿日期: 2022-03-03; 录用日期: 2022-05-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC1903601)

第一作者: 杨建新 (1965—), 男, 博士, 研究员, yangjx@rcees.ac.cn; ✉通信作者

理系统。FWD能够处理多种多样的厨余垃圾,从残羹剩饭到肉鱼骨刺,都可以使用FWD粉碎成浆状直接排出。1927年,FWD在美国被首次推出,因其方便快捷的特性而获得广泛的应用,目前,在美国的普及率约为50.0%^[27]。加拿大、澳大利亚和新西兰的普及率分别约为10.0%、12.0%和30.0%^[28-29]。在日本,FWD已成为将厨余垃圾从生活垃圾中分离出来的有效工具^[30]。然而,欧洲国家如法国、德国等不鼓励使用FWD。其主要原因是,FWD的使用增加了污水处理厂进水的污染物浓度,超过了污水处理厂的处理负荷^[31]。近年来,我国政府也开始关注FWD的应用,但尚无明确政策导向,仅在个别地区(如北京市)鼓励安装。随着经济快速发展,FWD会因其便捷性被更多居民所接受。然而,关于FWD的应用所产生的环境影响,目前尚未达成共识。

本文将依据文献分析,从FWD安装后带来的物质减量化效果,能量流变化,以及重要环境效应的变化等方面进行梳理,以期识别FWD应用后将可能带来的潜在环境影响,以为城市固废管理和科学研究提供参考。

1 FWD应用后的生活垃圾减量化效果

引入FWD以后,家庭厨余垃圾从城市生活垃圾处理系统转移到污水处理系统,生活垃圾减量化效果显著。GALIL等^[32]认为,当FWD普及率达60.0%时,生活垃圾的重量和体积预计将分别减少7.0%~18.7%和3.3%~11.0%。厨余垃圾的转移不仅带来生活垃圾量的变化,还会影响生活垃圾的成分组成和特性。最显著的一点就是,大大降低了生活垃圾的含水率,当FWD普及率为60.0%时,生活垃圾的含水率最高可降低13.3%^[32]。

对于生活垃圾的收运来说,FWD的应用直接减少了收运的频次和费用,从而减少市政环卫部门的垃圾收运成本。在MARASHLIAN等^[33]的研究中,引入FWD产生的净经济效益可达市政固废管理成本的7.2%~44.0%(FWD普及率为25.0%~75.0%),主要是由于节约了收运环节的成本。

对于生活垃圾的再利,由于生活垃圾成分的变化,使得热值大幅增加(当FWD普及率达到90.0%~97.0%时,热值可增加1倍^[30])。这不仅利于热能回收,提高了垃圾综合利用的效率,而且减少了焚烧时由于垃圾高水分导致的二恶英^[30]。

通过引入FWD,厨余垃圾从固体废物流转移到废水流,实现了生活垃圾从源头分离。生活垃圾的减量,对于居民而言,改善了卫生状况,使垃圾分类更易操作;对于市政环卫部门而言,不仅降低了垃圾收运成本,而且提高了垃圾资源化利用的效率。

2 FWD应用后的能量流变化

FWD的应用会消耗能量,同时又会产出一定能量。能量消耗主要出现在污水处理阶段,能量产出主要来自污水处理过程沼气产量的增加^[34-35]。能量流的变化源于FWD应用后污水处理厂边界内的物质流变化。

2.1 FWD的应用对污水处理系统物质流的影响

FWD的应用会明显增加污水处理厂进水中有机物的负荷。这主要是因为,家庭厨余垃圾中蕴含着丰富的有机质,1.0 g厨余垃圾(干重)可产生1.2 g有机物(以COD表示)^[36]。同时,FWD应用后,用水量的增加幅度不高^[37]。FWD不同普及率下污水处理厂进水中有机质呈现增加趋势(表1)。当FWD普及率为100.0%时,污水中COD增加了4.0%~59.2%,BOD增加了28.0%~59.5%。此外,总氮(TN)增加量可达6.5%~11.4%,总磷(TP)增加量可达11.5%~18.4%^[38-40]。由此可发现,FWD的应用提高了污水的碳氮比和碳磷比^[41],可以有效缓解污水处理厂碳资源匮乏的问题,有利于厌氧消化过程^[39,42-45]。

FWD应用会增加能源产出。污水中新增的固体颗粒物和有机物,大部分作为污泥通过一级处理去除^[48]。新增污泥通过厂内配备的厌氧消化设施或者外运到污泥处理厂进行处置,将带来新增

表 1 FWD 的应用对污水处理厂进水 TSS、COD 及 BOD 的影响

Table 1 The influence variation of TSS, COD and BOD of sewage treatment plants due to FWD installation

FWD普及率	TSS增加量	COD增加量	BOD增加量	参考文献
10.0%	2.0%	—	2.9%	IACOVIDOU等 ^[28]
24.0%	6.0%	—	8.8%	
96.0%	27.8%	—	40.2%	
25.0%	1.9%	—	17.0%	MARASHLIAN等 ^[33]
75.0%	7.1%	—	62.0%	
100.0%	71.9%	59.2%	—	IQBAL等 ^[38]
1.0%	0.5%	0.5%	0.6%	杨瑒等 ^[39]
5.0%	2.3%	2.5%	3.1%	
10.0%	4.5%	5.0%	6.1%	
100.0%	43.7%	48.3%	59.5%	
67.0%	30.0%	44.0%	—	BATTISTONI等 ^[44]
63.0%	—	50.0%	—	THOMSEN等 ^[46]
100.0%	18.0%~39.0%	24.0%~48.0%	28.0%~59.0%	THOMAS等 ^[47]
10.0%	8.7%	5.5%	—	ZAN等 ^[48]
80.0%	44.0%~69.0%	28.0%~44.0%	—	

沼气的产出(如表 2 所示)。同时,污泥中有机物的增多促进了厌氧消化过程更加充分、高效地进行,通过提高厌氧消化效率也会增加沼气的产量。当 FWD 普及率为 50.0% 时,污水处理系统沼气产量增加率高达 46.0%^[49],每年新增约 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 甲烷^[50],这将带来可观的能源回收效益。

尽管 FWD 的普及会给污水处理系统带来可观的能源收益,但是由于物质流的改变带来的经济成本的变化也值得被关注。有研究表明,当厨余垃圾粉碎机的普及率为 60.0% 时,污水处理厂的投资建设成本将增加 23.0%~27.0%,运营和维护年成本预计将增加 26.0%~30.0%^[32]。ZAN 等^[48]的研究认为,对于污水处理厂来说,当厨余垃圾粉碎机的普及率小于 30.0% 时,运行成本的增加可以忽略不计;当普及率大于 50.0% 时,运行成本明显升高;普及率高达 80.0% 时会导致运营支出超过 50.0%。增加的运营成本来自二级处理中曝气所需的能耗增加以及污泥的处置和运输。

2.2 FWD 应用的能源效益

尽管 FWD 的应用具有可观的能源回收量,但该系统能否带来净能源产出仍然存疑。ZAN 等^[48]

表 2 FWD 的应用对污水处理系统污泥产量及沼气产量的影响

Table 2 Changes of sludge production and biogas production in sewage treatment system due to FWD installation

FWD普及率	污泥增加量	沼气增加量	参考文献
5.0%	1.5%	—	IACOVIDOU等 ^[28]
60.0%	60.0%~92.0%	50.8%~73.3%	GALIL等 ^[32]
100.0%	12.0%	63.0~88.0%	IQBAL等 ^[38]
10.0%	5.4%	—	刘荣杰等 ^[45]
20.0%	10.8%	—	
30.0%	16.2%	—	
40.0%	27.1%	—	
50.0%	54.2%	—	
10.0%	16.9%	8.0%	ZAN等 ^[48]
80.0%	135.0%	64.0%	
50.0%	6.0%	19.0%	KIM等 ^[51]
100.0%	11.0%	38.0%	
50.0%	—	46.0%	EVANS等 ^[52]

的研究表明,当FWD普及率在10.0%~30.0%时,尽管新增沼气发电可以增加7.8%~24.0%的电力产出,但是该系统消耗的能量更多,主要归因于污水二级处理中曝气所需的能耗增多。然而,也有研究认为,FWD应用系统中可回收能量大于系统能耗^[38,51,53-54]。IQBAL等^[38]的研究表明,FWD的应用使污水处理厂增加能耗约30.0%,但同时能量回收率提高了58.0%~76.0%,因此产生净能源收益。GUVEN等^[54]的研究认为,当FWD的普及率为10.0%时,污水处理系统的净能源收益增加了205.9%。

与其他垃圾处理模式相比,FWD模式的能源效益不是绝对的,其不确定性源于研究划定的系统边界、基准情景以及FWD普及率的设定。就市政厨余垃圾管理模式而言,LUNDIE等^[55]和DIGGELMAN等^[56]的研究结果均表明,FWD比好氧堆肥更具节能优势。当FWD普及率为100.0%时,能耗降幅可达68.0%^[56]~78.0%^[55]。通过比较处理单位重量的厨余垃圾所消耗的能量,包括处理系统的设备投入、垃圾收运、垃圾处理、副产品运输以及废弃物处理的全过程,得到FWD的处理方式可以节约更多的能源,主要优势在于垃圾收运过程的能耗大大降低;此外,FWD处理系统的设备能耗也相对更小^[55]。GUVEN等^[57]认为,FWD普及率为10.0%时,厨余垃圾处理系统的净能源效益可增加33.3%,该研究的基准处理情景设为厨余垃圾有84.2%进行填埋、10.5%生产燃料、5.3%好氧堆肥。THOMSEN等^[46]以城市生活垃圾管理系统为研究对象,观察到,当FWD普及率为16.0%时,其净能源产出比焚烧模式降低了1.4%。由于基准情景和系统边界的差异,FWD模式的能源效益和普及率不成正比关系。

3 FWD应用的环境影响研究

3.1 FWD应用的减碳效应

众多研究都聚焦于FWD应用后系统的碳足迹变化研究,即系统处理厨余垃圾的全过程直接或间接的温室气体排放量。碳排放量的计算主要分为3个步骤:首先,确定研究的系统边界,如厨余垃圾处理系统、市政固体废物处理系统或城市污水处理系统;其次,对选定系统中碳排放的来源项进行识别,把系统中投入的物质、能源及其投入量进行汇总;最后,选择各个投入物质、能源所对应的碳排放指标因子,将投入量与指标因子进行乘积汇总,即为最终的碳排放量。本文将不同研究中FWD应用带来的碳减排效果,统一用碳减排率来表示(如表3所示),即FWD应用后系

表3 FWD应用的碳减排率
Table 3 Carbon reduction rate due to FWD installation

FWD普及率	碳减排率	系统边界	比较情景	参考文献
100.0%	75.0%	厨余垃圾处理系统	好氧堆肥	LUNDIE等 ^[55]
21.0%	24.0%	固体废物处理系统	好氧堆肥, 填埋	MAALOUF等 ^[58]
42.0%	22.2%	固体废物处理系统	好氧堆肥	
50.0%	2.4%	有机垃圾(包括剩余污泥)处理系统	好氧堆肥	TIDAKER等 ^[59]
100.0%	-236.0%	厨余垃圾处理系统	好氧堆肥	KIM等 ^[60]
21.0%	20.4%	固体废物处理系统	厌氧消化, 填埋	MAALOUF等 ^[58]
42.0%	-16.7%	固体废物处理系统	厌氧消化	
100.0%	-290.3%	厨余垃圾处理系统	厌氧消化	KIM等 ^[60]
100.0%	-300.0%	厨余垃圾处理系统	厌氧消化	MORRIS等 ^[61]
10.0%	9.0%	厨余垃圾处理系统	填埋, 生物干燥产燃料, 好氧堆肥	GUVEN等 ^[57]
42.0%	10.0%~42.0%	固体废物处理系统	填埋	MAALOUF等 ^[62]
10.0%	149.8%	市政污水处理系统	高速活性污泥工艺	GUVEN等 ^[54]

统减少的碳排放量占原碳排放量的比例。

文献研究结果表明，碳减排率和处理处置方式、系统边界、基准情景以及FWD普及率有关。相比于厨余垃圾好氧堆肥和填埋处理，FWD的应用具有更优的减碳效益。根据LUNDIE等^[55]的研究，当FWD的普及率为100.0%时，相比厨余垃圾好氧堆肥处理系统，使用FWD进行厨余垃圾的后续处理可以减少75.0%的碳排量。根据MAALOUF等^[62]的研究，当FWD的普及率为42.0%时，市政固体废物处理系统比全部采用填埋处理要减少10.0%~42.0%的碳排量。

与厌氧消化处理方式相比，FWD会增加碳排放量。MAALOUF等^[58]的研究中，以市政固体废物处理系统为研究对象，当FWD的普及率达42.0%时，碳排放量比全部使用厌氧消化处理时高出16.7%。以厨余垃圾处理系统为研究对象时，使用FWD比厌氧消化处理的碳排放量高出290.3%~300.0%^[60-61]。

对于市政污水处理系统而言，FWD的应用具有明显的减碳效益^[54]。研究表明，当FWD的普及率达到10.0%时，通过回收副产物沼气，会产生一定的环境效益。此时，系统在碳排放量方面产生的效益可以达到未使用FWD时碳排放量的49.8%。

由于不同研究设定的系统边界和比较基准不同，FWD模式的碳减排率与其普及率之间是否呈现正比例关系尚且没有定论。例如，在MAALOUF等^[58]的研究中，当FWD的普及率成比例变化时(由21.0%变为42.0%)，碳排放量的削减率却不是成比例增加的，其原因是，与2者进行比较的基准情景差异较大。普及率为21.0%时的基准情景是：23.0%的固废回收处理、22.0%进行焚烧产能、43.0%填埋处理、12.0%好氧堆肥。而普及率为42.0%时的基准情景是：13.0%的固废回收处理、45.0%填埋处理、42.0%进行好氧堆肥。目前，针对碳减排率与FWD普及率之间的关系尚未发现相关研究文献。

文献研究结果表明，FWD应用产生的新增污泥综合利用模式和途径对系统碳排量影响巨大。TIDAKER等^[59]设定FWD普及率为50.0%，其碳减排率却相对较低(为2.4%)。这是因为，基准情景中污泥经堆肥处理用作农田的肥料，而FWD应用情景中污泥经简单处理后用于市政绿化。KIM等^[60]的研究表明，FWD的应用会导致碳排量大幅增加(比好氧堆肥增加236.0%，比厌氧消化增加290.3%)。这主要是因为，FWD应用情景中未考虑新增污泥的综合利用。

3.2 FWD的应用对酸化效应及富营养化效应的影响

有文献采用生命周期评价的方法，分析了FWD应用带来的潜在环境影响^[46,54-55,57]。由于各研究所采用的环境影响类型并不相同，本文选取了在所有文献中均涉及到的2种环境影响类别，即酸化效应和富营养化效应，分析FWD的应用带来的环境影响。

酸化效应是指 SO_x 等酸性物质对环境带来的危害。在进行生命周期评估时，酸化效应潜值的计算主要分为以下2个步骤：首先，对系统输入输出的物质能源清单进行分析，识别其中会产生酸化效应的物质，主要包括 SO_2 、 SO_3 、 NO_x 、 HCl 、 HF 、 H_2S 以及 NH_3 ，以其中的 SO_2 为基准，将其影响潜值作为基准1；其次，根据不同物质对酸化效应贡献量的不同得到相应的影响因子，通过影响因子即可得到以基准为单位的当量值，从而不同系统产生的酸化效应可以在统一的单位下进行比较。

厨余垃圾在进行好氧堆肥的过程中，将产生一定的酸性气体(主要是 SO_x 和 NO_x)，EDWARDS等^[53]认为，当FWD普及率为100.0%时，与好氧堆肥模式比， SO_x 排量削减率达24.7%、 NO_x 排量削减率达135.8%。FWD的处理途径可以减少好氧堆肥时酸性气体的产生，因而与厨余垃圾好氧堆肥相比，FWD模式可以有效缓解在酸化效应方面造成的影响。根据LUNDIE等^[55]的研究，当FWD普及率为100.0%时，可使酸化效应潜值减少81.4%。GUVEN等^[57]的研究中10.0%的厨余垃圾用FWD来处理，其余仍保持原有的处理模式，结果表明，引入FWD之后厨余垃圾处理

系统的酸化效应降低了33.0%。

富营养化效应是指由于氮、磷等营养物质含量过多所引起的水质污染现象。在进行生命周期评估时,富营养化效应潜值的计算方法和酸化效应潜值类似。造成富营养化效应的主要物质包括 NO_3^- 、 NO_x 、 NO 、 NH_3 以及COD。在计算富营养化潜值时,以 NO_3^- 为基准物质,将其影响潜值作为基准1,其他的影响物质通过影响因子换算得到以基准为单位的当量值,通过加和即可得到总的潜值。

FWD的使用,使富含有机质的厨余垃圾从固体废物流转入废水处理系统,与好氧堆肥模式、填埋模式和焚烧模式相比,FWD的应用在一定程度会加剧淡水富营养化效应。GUVEN等^[57]的研究认为,FWD普及率为10.0%时,潜值增加率为236.0%。而在LUNDIE等^[55]的研究中,FWD普及率为100.0%时,潜值增加率为50.0%。该差距较大同样是因为与之相比的基准情景不同。前者设定的基准情景中好氧堆肥比例只占5.3%,堆肥处理占84.2%;而后者设定的基准情景为100.0%好氧堆肥。对于市政污水处理模式来说,FWD的应用增加了系统向淡水中排放的磷含量,在普及率为10.0%时,系统的淡水富营养化潜值增加了32.8%^[54]。对于城市生活垃圾管理系统而言,相比于全部焚烧产生能量的处理方式,当有16.0%的厨余垃圾通过FWD被处理时,系统的淡水富营养化潜值增加33.5%^[46]。

4 未来研究展望

1) 比较情景和数据清单需要本土化。不同地区厨余垃圾的特征有所不同,不同经济体的市政固废管理模式也不相同,采用本地化的基础清单数据进行分析才能得出具有实际应用价值的结果。基于基准现状进行比较,才能有效支撑厨余垃圾管理政策的制定。

2) 需要深入开展厨余垃圾厌氧处理模式和FWD模式的环境影响比较研究。据统计,我国超过半数的餐厨垃圾采用厌氧消化工艺进行处理^[63-64]。然而,关于对比这2者环境影响的研究相对较少,比较的指标不全面,例如酸化效应、富营养化效应等重要的环境影响均无法得出确切结论。

3) 深入分析FWD的普及率与各项环境影响潜值的关系,寻求FWD的最佳普及率区间。许多研究都将FWD的普及率设置为50.0%乃至100.0%。然而,FWD的普及率能否达到该值还未可知,这就导致在该普及率下的研究结果很可能不具实际意义。另外,FWD是否存在最低普及率阈值也值得进一步开展研究。

4) 需要探究FWD应用的新模式。FWD模式在大多数研究中都是通过污水管网直接连接污水处理厂,对该模式稍加改造,或许可以得到更加节能环保的新模式。有研究提供了一些可供参考的思路,例如,在住宅排水系统中增加一个固液分离设施或在小区内设置FWD流出物集中处理装置,来打破对FWD推广的限制^[65-70]。这种厨余垃圾的分散式收集处理装置或许可以使FWD得到更好的应用,对其潜在的环境影响有必要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] DE C D, WEN Z G, GOTTFRIED O, et al. A review of global strategies promoting the conversion of food waste to bioenergy via anaerobic digestion[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79: 204-221.
- [2] QU X Y, LI Z S, XIE X Y, et al. Survey of composition and generation rate of household wastes in Beijing, China[J]. *Waste Management*, 2009, 29(10): 2618-2624.
- [3] 陈朱蕾,周磊,江娟,等. 粪便与厨余垃圾现场处理研究[J]. *环境科学*, 2005(5): 196-199.
- [4] 徐栋,沈东升,冯华军. 厨余垃圾的特性及处理技术研究进展[J]. *科技通报*, 2011, 27(1): 130-135.
- [5] 张红玉. 碳氮比对厨余垃圾堆肥腐熟度的影响[J]. *环境工程*, 2013, 31(2): 87-91.
- [6] DEWILDA Y, WARNARES S A, ZULKARNAINI I. Study of

- Generation, Composition, Characteristics, and Recycling Potential of Industrial Food Waste in Padang City// 2nd International Conference on Sustainable Infrastructure (ICSI)[J]. *Journal of Physics Conference Series*. Yogyakarta, INDONESIA, 2019: 28-29.
- [7] 闵海华, 刘淑玲, 郑苇, 等. 厨余垃圾处理处置现状及技术应用分析[J]. *环境卫生工程*, 2016, 24(6): 5-7+10.
- [8] 宗望远, 严继红, 袁巧霞. 厨余垃圾厌氧发酵工艺研究[J]. *科技信息*, 2010(35): 668-669.
- [9] 李兵, 董志颖, 王英. 两种供能方式对厨余垃圾好氧堆肥的影响研究[J]. *环境工程*, 2012, 30(5): 86-90.
- [10] 杨延梅. 易利用碳的添加对厨余堆肥氮素转化与氮素损失的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(32): 19831-19833+19841.
- [11] 杨璐, 张影, 汤岳琴, 等. 温度对厨余垃圾高温厌氧消化及微生物群落的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(4): 704-711.
- [12] 宋庆彬, 李爱民, 鞠茂伟, 等. 厨余与污泥联合发酵不同预处理产氢特性研究[J]. *可再生能源*, 2008, 26(6): 62-65.
- [13] 李荣平, 刘研萍, 李秀金. 厨余和牛粪混合厌氧发酵产气性能试验研究[J]. *可再生能源*, 2008(2): 64-68.
- [14] 赵明星. 厨余物厌氧产氢过程控制因素优化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [15] 夏旻, 邵俊, 余召辉. 上海市分类后家庭厨余垃圾理化特性分析[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(07): 276-278.
- [16] JIN C X, SUN S Q, YANG D H, et al. Anaerobic digestion: An alternative resource treatment option for food waste in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146397.
- [17] 徐静雯, 卢梦筱, 闫涵, 等. 家庭厨余垃圾精准分类及处理现状的满意度研究——以石家庄市为例[J]. *当代化工研究*. 2021, (21): 80-82.
- [18] 蒋霞, 宋薇, 王富生. 济南市生活垃圾分类治理现状、问题及对策分析[J]. *环境卫生工程*, 2021, 29(5): 36-40+45.
- [19] 赵志萍, 王炳伟, 陈爱梅, 等. 常州市生活垃圾强制分类立法现状与对策[J]. *环境卫生工程*, 2021, 29(5): 46-49.
- [20] 江珣. 城市生活垃圾分类收集现状及对策[J]. *农村经济与科技*, 2021, 32(16): 20-22.
- [21] 王子源. 国内厨余垃圾处理现状及主体工艺论证[J]. *广东化工*, 2020, 47(12): 164-166+169.
- [22] 李欢, 周颖君, 刘建国, 等. 我国厨余垃圾处理模式的综合比较和优化策略[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(7): 2398-2408.
- [23] 刘子旭, 彭晶. 餐厨垃圾特性及处理技术研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(7): 102-104.
- [24] 黄芳, 楚德军, 李芳, 等. 北京市餐厨垃圾处置现状及资源化利用前景分析[J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(12): 83-86.
- [25] 靳晨曦, 孙士强, 盛维杰, 等. 中国厨余垃圾处理技术及资源化方案选择[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1240-1251.
- [26] 丁晓翔, 姜志磊, 汪洋, 等. 国内主要餐厨垃圾处理技术模式探讨分析[J]. *科技创新与应用*, 2020(1): 6-11.
- [27] IACOVIDOU E, OHANDJA D G, GRONOW J, et al. The household use of food waste disposal units as a waste management option: a review[J]. *Critical Reviews In Environmental Science And Technology*, 2012, 42(14): 1485-1508.
- [28] IACOVIDOU E, OHANDJA D G, VOULVOULIS N. Food waste disposal units in UK households: The need for policy intervention[J]. *Science Of The Total Environment*, 2012, 423: 1-7.
- [29] LEGGE A, NICHOLS A, JENSEN H, et al. The characteristics and in-sewer transport potential of solids derived from domestic food waste disposers[J]. *Water Science And Technology*, 2021, 83(12): 2963-2979.
- [30] YANG X, OKASHIRO T, KUNIYASU K, et al. Impact of food waste disposers on the generation rate and characteristics of municipal solid waste[J]. *Journal Of Material Cycles And Waste Management*, 2010, 12(1): 17-24.
- [31] HU Y, SHI C, KOBAYASHI T, et al. An integrated anaerobic system for on-site treatment of wastewater from food waste disposer[J]. *Environmental Science And Pollution Research*, 2020, 27(15): 17587-17595.
- [32] GALIL N I, YAACOV L. Analysis of sludge management parameters resulting from the use of domestic garbage disposers[J]. *Water Science And Technology*, 2001, 44(10): 27-34.
- [33] MARASHLIAN N, EL-FADEL M. The effect of food waste disposers on municipal waste and wastewater management[J]. *Waste Management & Research*, 2005, 23(1): 20-31.
- [34] ZAN F X, DAI J, JIANG F, et al. Test of transformation mechanism of food waste and its impacts on sulfide and methane production in the sewer system[J]. *Water Science And Technology*, 2020, 81(4): 845-852.
- [35] MATTSSON J, HEDSTROM A, VIKLANDER M. Long-term impacts on sewers following food waste disposer installation in housing areas[J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(21): 2643-2651.
- [36] KIM M, CHOWDHURY M, NAKHLA G, et al. Characterization of typical household food wastes from disposers: Fractionation of constituents and implications for resource recovery at wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 183C: 61-69.
- [37] MATTSSON J, HEDSTROM A, ASHLEY R M, et al. Impacts and managerial implications for sewer systems due to recent changes to inputs in domestic wastewater - A review[J]. *Journal Of Environmental Management*, 2015, 161: 188-197.
- [38] IQBAL A, EKAMA G A, ZAN F X, et al. Potential for co-disposal and treatment of food waste with sewage: a plant-wide steady-state model evaluation[J]. *Water Research*, 2020, 184: 13.
- [39] 杨瑒, 李江华, 段妮娜, 等. 食物垃圾处理器的环境经济损益研究[J]. *住宅科技*, 2011, 31(1): 53-57.
- [40] 李江华, 牟心鸣, 张建军, 等. 食物垃圾处理器对城市污水系统的影响研究[J]. *给水排水*, 2011, 47(S1): 105-110.

- [41] BOLZONELLA D, PAVAN P, BATTISTONI P, et al. The under sink garbage grinder: a friendly technology for the environment[J]. *Environmental Technology*, 2003, 24(3): 349-359.
- [42] 吴远远, SEGUN G A, 郑明霞, 等. 基于破碎处理的家庭厨余垃圾减量及其对下水的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5): 2576-2580.
- [43] GUVEN H, OZGUN H, ERSAHIN M E, et al. High-rate activated sludge processes for municipal wastewater treatment: the effect of food waste addition and hydraulic limits of the system[J]. *Environmental Science And Pollution Research*, 2019, 26(2): 1770-1780.
- [44] BATTISTONI P, FATONE F, PASSACANTANDO D, et al. Application of food waste disposers and alternate cycles process in small-decentralized towns: a case study[J]. *Water Research*, 2007, 41(4): 893-903.
- [45] 刘荣杰, 邓舟, 梁卫坤, 等. 深圳市市政污水厂对家庭厨余垃圾粉碎直排的耐受分析[J]. *环境卫生工程*, 2018, 26(4): 43-47.
- [46] THOMSEN M, ROMEO D, CARO D, et al. Environmental-economic analysis of integrated organic waste and wastewater management systems: a case study from Aarhus City (Denmark)[J]. *Sustainability*, 2018, 10(10): 20.
- [47] THOMAS P. The effects of food waste disposers on the wastewater system: a practical study[J]. *Water And Environment Journal*, 2011, 25(2): 250-256.
- [48] ZAN F X, IQBAL A, GUO G, et al. Integrated food waste management with wastewater treatment in Hong Kong: Transformation, energy balance and economic analysis[J]. *Water Research*, 2020, 184: 116-155.
- [49] EVANS T D, ANDERSSON P, WIEVEGG A, et al. Surahammar: a case study of the impacts of installing food waste disposers in 50% of households[J]. *Water And Environment Journal*, 2010, 24(4): 309-319.
- [50] ZAN F X, DAI J, HONG Y Z, et al. The characteristics of household food waste in Hong Kong and their implications for sewage quality and energy recovery[J]. *Waste Management*, 2018, 74: 63-73.
- [51] KIM M, NAKHLA G, KELEMAN M. Modeling the impact of food wastes on wastewater treatment plants[J]. *Journal Of Environmental Management*, 2019, 237: 344-358.
- [52] EVANS T D. Domestic food waste - the carbon and financial costs of the options[J]. *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers-Municipal Engineer*, 2012, 165(1): 3-10.
- [53] EDWARDS J, OTHMAN M, CROSSIN E, et al. Life cycle inventory and mass-balance of municipal food waste management systems: decision support methods beyond the waste hierarchy[J]. *Waste Management*, 2017, 69: 577-591.
- [54] GUVEN H, ERIKSSON O, WANG Z, et al. Life cycle assessment of upgrading options of a preliminary wastewater treatment plant including food waste addition[J]. *Water Research*, 2018, 145: 518-530.
- [55] LUNDIE S, PETERS G M. Life cycle assessment of food waste management options[J]. *Journal Of Cleaner Production*, 2005, 13(3): 275-286.
- [56] DIGGELMAN C, HAM R K. Household food waste to wastewater or to solid waste? That is the question[J]. *Waste Management & Research*, 2003, 21(6): 501-514.
- [57] GUVEN H, WANG Z, ERIKSSON O. Evaluation of future food waste management alternatives in Istanbul from the life cycle assessment perspective[J]. *Journal Of Cleaner Production*, 2019, 239: 12.
- [58] MAALOUF A, EL-FADEL M. Carbon footprint of integrated waste management systems with implications of food waste diversion into the wastewater stream[J]. *Resources Conservation And Recycling*, 2018, 133: 263-277.
- [59] TIDAKER P, KARRMAN E, BAKY A, et al. Wastewater management integrated with farming - an environmental systems analysis of a Swedish country town[J]. *Resources Conservation And Recycling*, 2006, 47(4): 295-315.
- [60] KIM M H, SONG Y E, SONG H B, et al. Evaluation of food waste disposal options by LCC analysis from the perspective of global warming: Jungnang case, South Korea[J]. *Waste Management*, 2011, 31(9/10): 2112-2120.
- [61] MORRIS J, BROWN S, COTTON M, et al. Life cycle assessment harmonization and soil science ranking results on food waste management methods[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(10): 5360-5367.
- [62] MAALOUF A, EL-FADEL M. Effect of a food waste disposer policy on solid waste and wastewater management with economic implications of environmental externalities[J]. *Waste Management*, 2017, 69: 455-462.
- [63] 邴君妍, 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.
- [64] 梅冰, 窦法楷, 汪慧莲, 等. 餐厨垃圾处理技术研究进展[J]. *环境卫生工程*, 2015, 23(5): 17-18.
- [65] 赵珍仪, 张哲, 张磊. 厨余垃圾家庭粉碎处理排放适用条件研究[J]. *给水排水*, 2019, 55(3): 118-120.
- [66] BERNSTAD A, DAVIDSSON A, TSAI J, et al. Tank-connected food waste disposer systems - Current status and potential improvements[J]. *Waste Management*, 2013, 33(1): 193-203.
- [67] DAVIDSSON A, SARAIVA A B, MAGNUSSON N, et al. Technical evaluation of a tank-connected food waste disposer system for biogas production and nutrient recovery[J]. *Waste Management*, 2017, 65: 153-158.
- [68] SANKAI T, DING G, EMORI N, et al. Treatment of domestic wastewater mixed with crushed garbage and garbage washing water by advanced Gappei-shori Johkaso[J]. *Water Science And Technology*, 1997, 36(12): 175-182.

- [69] ICHINARI T, OHTSUBO A, OZAWA T, et al. Wastewater treatment performance and sludge reduction properties of a household wastewater treatment system combined with an aerobic sludge digestion unit[J]. *Process Biochemistry*, 2008, 43(7): 722-728.
- [70] HELLSTROM D, BAKY A, JEPPSSON U, et al. Comparison of environmental effects and resource consumption for different wastewater and organic waste management systems in a new city area in Sweden[J]. *Water Environment Research*, 2008, 80(8): 708-718.

(责任编辑: 金曙光)

The state of art and prospects of studies on environmental impact of food waste disposers

YANG Jianxin^{1,2,*}, LIU He^{1,2}

1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing100089, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing100049, China

*Corresponding author, E-mail: yangjx@rcees.ac.cn

Abstract Based on the literatures analysis, the relative studies on the potential environmental impacts of application of Food Waste Disposer (FWD) are reviewed. It summarized the literature study results in the context of municipal waste flow, energy consumption, carbon reduction and acidification, as well as eutrophication. Firstly, FWD installation can reduce the MSW flow in collection and transportation so as to divert the food waste from MSW to wastewater system. Secondly, there is uncertainty in the net energy output. Thirdly, FWD can reduce the carbon emission and acidification, but increase the eutrophication. The future research focus are suggested on these such four aspects as local data mining, comparison of environmental impact of FWD and anaerobic digestion, and relationship of FWD installation rate and environmental impacts, as well as developing new model of FWD application.

Keywords food waste disposer; waste reduction; environmental impact assessment; energy flow analysis