



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

易腐垃圾处理技术及其效果研究进展

蒯伟, 徐艳, 李厚禹, 张春雪, 成卫民, 郑向群

引用本文:

蒯伟,徐艳,李厚禹,张春雪,成卫民,郑向群. 易腐垃圾处理技术及其效果研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 356–363.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0532>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

城乡有机废弃物资源化利用现状及展望

李龙涛, 李万明, 孙继民, 褚飞, 饶中秀, 黄凤球

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 264–271 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0150>

农户参与对农村生活垃圾分类处理效果的影响

许骞骞, 王成军, 张书赫

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 223–231 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0142>

餐厨垃圾生物质炭制备及其吸附水中亚甲基蓝性能

张新旺, 李保鹏, 沈建国, 臧志林, 马小涵, 辛言君

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 115–120 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0315>

杭州市农村生活垃圾治理实践及问题对策研究

屠翰, 华永新, 徐钢, 虞益江, 陈艳

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 251–256 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0024>

接种率及尿素添加量对农村生活垃圾厌氧发酵产甲烷的影响

罗臣乾, 王星, 张国治, 魏珞宇, 施国中, 张敏

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 168–174 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0222>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蒯伟, 徐艳, 李厚禹, 等. 易腐垃圾处理技术及其效果研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 356–363.

KUAI W, XU Y, LI H Y, et al. Research progress on disposal technology and effects of perishable waste[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(2): 356–363.



开放科学 OSID

易腐垃圾处理技术及其效果研究进展

蒯伟^{1,2}, 徐艳^{1*}, 李厚禹¹, 张春雪¹, 成卫民¹, 郑向群¹

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要:随着易腐垃圾数量的日益增加,其对环境的影响也越来越大。易腐垃圾虽然具有严重的污染特性,但也存在资源化利用的潜力,通过不同的技术对易腐垃圾进行处理,可以减小其所造成的危害,实现对易腐垃圾的资源化利用。本文综述了易腐垃圾传统处理技术(填埋、焚烧、粉碎直排)、生物资源化利用技术(饲料化处理、厌氧发酵、好氧堆肥等)以及目前一些新型处理技术,对这些技术的处理效果、缺陷进行归纳,阐述了技术应用状况,同时分析了垃圾分类对易腐垃圾处理的影响,以期对易腐垃圾处理技术的优化和资源化利用的发展方向提供理论参考。

关键词:易腐垃圾;餐厨垃圾;处理技术;资源化;垃圾分类

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)02-0356-08

doi: 10.13254/j.jare.2020.0532

Research progress on disposal technology and effects of perishable waste

KUAI Wei^{1,2}, XU Yan^{1*}, LI Houyu¹, ZHANG Chunxue¹, CHENG Weimin¹, ZHENG Xiangqun¹

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: With the increasing amount of perishable waste, its impact on the environment is increasing. Studies have shown that despite its pollution characteristics, perishable waste has the potential to be reused as a resource after disposal by various technologies through which the toxicity of perishable waste can be minimized. This review summarizes the treatment effects, disadvantages, and applications of traditional perishable waste disposal technologies (landfilling, incineration, and smashing), biological resource utilization approaches (feed treatment, anaerobic fermentation, aerobic composting, etc.), and some new disposal technologies. The impact of waste classification on perishable waste disposal is also discussed. This review may provide theoretical references for the development of perishable waste disposal and resource utilization technologies and promote the further development of perishable waste disposal technology in China.

Keywords: perishable waste; kitchen waste; disposal technology; resource utilization; waste classification

2017年3月30日,国家发展改革委、住房和城乡建设部发布《生活垃圾分类制度实施方案》,将生活垃圾分为有害垃圾、可回收垃圾、易腐垃圾和其他垃圾四类^[1]。实际上,湿垃圾、有机垃圾、餐厨垃圾都属于易腐垃圾的范畴,在《杭州市生活垃圾管理条例》中,

“餐厨垃圾”则被改名为“易腐垃圾”^[2]。故本文针对以餐厨垃圾为主的易腐烂、含大量有机质的易腐垃圾进行探讨。研究表明,全球生产的食物中30%~50%未被利用而直接丢弃,成为易腐垃圾的主要来源^[3]。在我国,随着经济的快速发展,居民生活水平大幅提

收稿日期:2020-09-21 录用日期:2020-11-16

作者简介:蒯伟(1996—),男,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为农业废弃物的处置利用。E-mail:18281533346@163.com

*通信作者:徐艳 E-mail:xuyan@aepi.org.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1901004)

Project supported: National Key Research and Development Plan Projects(2018YFC1901004)

<http://www.aed.org.cn>

升,生活垃圾中易腐垃圾所占比例也越来越高。据统计,以餐厨垃圾和家庭厨余垃圾为主的易腐垃圾占生活垃圾总产量的45%左右^[4]。与生活垃圾相比,易腐垃圾含有更为丰富的营养元素和有机物质,具有很大的资源化利用价值。然而由于其具有的高含水率和高易腐性等特点^[5],易腐垃圾极易腐败变质,散发恶臭,传播细菌和病毒,给环境带来巨大的污染,甚至危及人体健康^[6]。

2016年6月,国家发展改革委、住房和城乡建设部发布的《垃圾强制分类制度方案》征求意见稿^[7]中明确到2020年底生活垃圾回收利用率要在35%以上,其中易腐垃圾的回收利用是促使生活垃圾回收率达到目标值的主要措施之一。因此,应对易腐垃圾进行合理和有效的管理,使其成为宝贵的资源,最大程度利用易腐垃圾,同时减少其对环境的影响^[8]。故在垃圾分类措施实行的背景下,如何根据易腐垃圾的特性选择最佳的处置技术,从而最大程度资源化利用易腐垃圾是我国亟需解决的问题。鉴于此,本文针对现有易腐垃圾处理处置技术及其处理效果进行概述和分析,归纳现有易腐垃圾处理技术的原理、处理效果以及不足,为易腐垃圾处理工艺选择与改进提供理论支持。

1 易腐垃圾的来源及特征

易腐垃圾是指易腐烂、含有机质的生活垃圾,其与《生活垃圾分类标志》国家标准中厨余垃圾的定义一致。因此,餐厨垃圾、家庭厨余垃圾及其他厨余垃圾均属于易腐垃圾的范畴^[9]。其中,家庭厨余垃圾来源分散且数量庞大,难以管理,且含水率高,脂肪、蛋白质等有机物含量高,热值相对较低^[10]。而餐厨垃圾是易腐垃圾的主要组成部分,其成分复杂且产量较高,占城市固体废弃物总量的36.5%~76.0%^[11]。2010年我国餐厨垃圾的总产量约为9 000万t,据估算,2020年我国餐厨垃圾的总产量达到12 000万t^[12]。其他厨余垃圾则含有丰富的营养物质,如总糖、脂肪和纤维素等^[13]。易腐垃圾中丰富的营养物质是其能被资源化利用的重要依据。易腐垃圾的特点如表1所示。

2 易腐垃圾传统处理技术及应用

易腐垃圾的传统处理技术主要通过物理或化学手段直接实现对易腐垃圾快速减量化处理,如填埋、焚烧和粉碎直排等。在我国,易腐垃圾往往与其他生活垃圾混合收集后进行填埋,从而实现易腐垃圾的快

表1 易腐垃圾的来源及特点

Table 1 Sources and characteristics of perishable waste			
易腐垃圾 Perishable waste	来源 Source	特点 Characteristic	参考文献 Reference
家庭厨余垃圾	产自居民日常生活	有机质含量、含水率、油脂量和含盐量高、有毒有害物质少,易滋生和传播病菌	[14]
餐厨垃圾	公共食堂、家庭、餐饮行业产生的食品废弃物	含水率、含盐量、有机物含量高,富含氮、磷等元素,易腐败和滋生蚊蝇	[15]
其他厨余垃圾	农贸市场、农产品批发市场产生的蔬菜、瓜果垃圾	一般无有害,含水量大,易腐烂,含有糖类和半纤维素等,含有少量的氮、磷、钾	[13,16]

速减量化,该方式成本较低、操作简单直接^[17]。然而,由于易腐垃圾含水率高,会产生垃圾渗滤液,造成蚊虫滋生、老鼠为患等后果,从而影响填埋场周围的生态环境,对地下水和大气造成二次污染。因此,国外对易腐垃圾填埋处理技术的使用进行一定程度的限制,如英国1999年颁布填埋限额交易法案和实行填埋税政策对易腐垃圾的填埋进行限制,德国从2005年开始要求填埋物中的总有机碳不得高于5%,禁止易腐垃圾未经处理直接填埋,提倡改用其他更加环保、高效的处理技术提高易腐垃圾的回收和资源化利用率^[18]。

垃圾焚烧被认为是易腐垃圾减量和降低危害最快速的工艺^[19]。早在20世纪90年代,我国便开始使用焚烧的方式处理易腐垃圾,焚烧处理技术具有处理量大、减容性好、产生的热量可以用于发电等优势^[20]。易腐垃圾往往与日常生活中所丢弃的包装袋、餐巾纸等混合后进行焚烧,焚烧过后,混合垃圾减量化效果明显,其体积约减小95%,质量约减少75%^[21]。在资源化利用方面,通常利用易腐垃圾焚烧过程所产生的热值发电,与此同时,垃圾焚烧技术具有占地面积小的优势,焚烧所产生的热量可用于供暖,适合在用地紧张且寒冷的地区推广。但易腐垃圾含水率高,且焚烧所产热值相对较低,使易腐垃圾焚烧发电的成本增加,不利于能源化利用^[22]。此外,易腐垃圾的高含盐量会使其在燃烧过程中产生二噁英等有毒气体,污染大气环境,进而损害人体健康。

粉碎直排是一种利用厨房配置的机械研磨装置将餐厨垃圾粉碎后直接排入市政下水道管网的手段^[23]。此类粉碎研磨装置可以一定程度上解决下水道堵塞问题,避免餐厨垃圾随意丢弃和转运途中产生

的二次污染。然而,其在易腐垃圾的资源化利用方面几乎没有优势,原因是我国易腐垃圾油脂含量高,极易在管道中凝结成块,从而堵塞管网,滋生细菌,增加市政下水道管网的负荷^[24]。鉴于此,粉碎直排处理技术仅适用于处理家庭厨余垃圾产量少的情况。同时,该技术也增加了污水处理的负担,故未被广泛应用。这也是虽然超过94%的美国家庭被允许安装粉碎装置,但累计安装率却仅占50%的原因^[25]。在我国,虽然粉碎直排技术已引进多年,但考虑到其耗水耗电,成本较高,且会给下水道和污水处理带来额外的负荷,因此使用量亦较少^[26]。

综上所述,传统的处理技术虽然可以对大部分易腐垃圾进行有效的减量化处理,但是由于土地资源匮乏的局面不断提升、易腐垃圾产量逐年上涨、环境整治力度不断加强等原因,填埋、焚烧和粉碎直排等传统处理技术已不再适用于当前阶段的易腐垃圾处理。而易腐垃圾中含有大量的有机成分,选用合适的技术进行处理和加工,可以将其转化为新的资源进一步利用。

3 易腐垃圾生物资源化利用技术及应用

3.1 饲料化处理技术

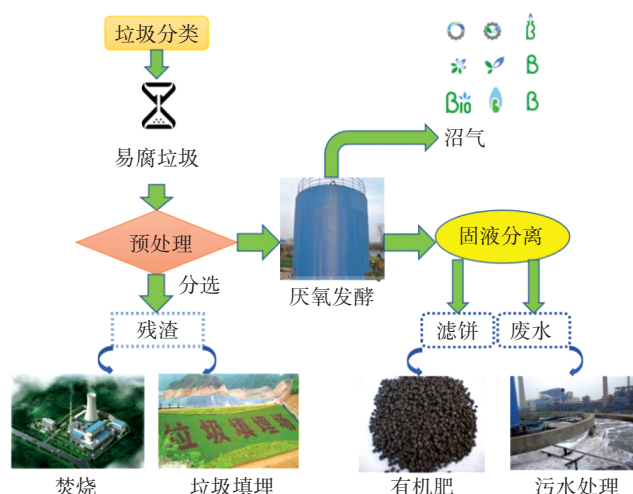
饲料化处理技术是使用时间较早、技术成熟且普及程度范围广的生物资源化技术,其主要针对的是以餐厨垃圾为主的易腐垃圾。目前,饲料化处理技术以高温脱水制干饲料和生物处理制蛋白为主要的生产模式。其中,高温脱水有利于易腐垃圾中病菌和寄生虫的灭活,而生物处理则是利用微生物本身及其发酵产生的蛋白分泌物生产蛋白饲料^[27]。王孝强等^[28]利用乳酸菌对易腐垃圾进行发酵,制成蛋白质饲料,发现其蛋白含量最高可达31.1%。自20世纪80年代起,美国、日本等国家就开展了易腐垃圾无害化加工处理后用作饲料的研究^[28]。目前,城市中较为成熟的饲料化方法是将制粒技术、挤压膨化和干燥技术综合利用,利用易腐垃圾被挤压所产生的温度杀灭潜在的病原菌,其相关配套设施已投入市场生产并运行使用^[29]。此外,在我国和东南亚一些国家衍生出了一种新的饲料化技术,该技术是将蝇类幼虫接种到易腐垃圾上,使幼虫啃食易腐垃圾后快速生长,最终得到大量的昆虫蛋白,其垃圾减量比例在70%以上^[30]。然而,虽然饲料化处理技术具有操作简单方便、资源化程度高的特点,但该技术要求产品干物质中粗纤维含量<18%,粗蛋白含量≥20%。相关研究表明,绝大部分的垃圾中粗蛋白含量低于20%,处理后的产品难以

达到蛋白饲料的标准,同时存在同源污染的风险,危害人体健康^[31]。因此,未来饲料化处理技术的研究重点应放在如何从根源上解决同源污染的问题及提升产品中蛋白的含量占比,有效解决我国蛋白质饲料短缺的现状。

3.2 厌氧发酵技术

厌氧发酵是指在无氧的条件下利用兼性厌氧微生物的代谢作用将易腐垃圾中的有机物分解为氢、甲烷和短链脂肪酸等小分子有机物及无机物的一种生物手段^[32]。如图1所示,以易腐垃圾为底物的厌氧发酵工艺主要包括垃圾分类收集、预处理、厌氧发酵、固废处理等步骤。按照厌氧发酵参数设置的不同,一般将厌氧发酵工艺分为干法、湿法、单相、多相、中温、高温、序批式和连续式厌氧发酵,各发酵工艺的效果对比如表2所示^[33]。

在我国重庆、唐山、南宁等地,厌氧发酵是处理易腐垃圾的主流技术^[34]。在国外,瑞士Komogas厌氧消化厂利用易腐垃圾厌氧发酵生产沼气,其沼气产量可达 $3\ 200\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,同时将发酵后的腐殖质作为肥料使用^[35]。厌氧发酵具有良好的环境效益,如可再生能源的产生、养分的循环利用及减少易腐垃圾数量等^[36]。该技术的特点是自动化程度高,人工成本较低,所得产品价值较高,且在国内接受度普遍较高,综合减量化比例可高达85%^[37]。通过厌氧发酵技术对易腐垃圾进行资源化利用,其产生的沼气用作发电,在一定程度上减轻了我国能源短缺的压力,且经济效益较高。然而,由于我国地区差异及易腐垃圾高油高盐的特性,



构建图片均来源于百度(<https://image.baidu.com/>)。下同
Pictures are from Baidu(<https://image.baidu.com/>). The same below

图1 厌氧发酵工艺流程

Figure 1 Anaerobic fermentation process

表 2 不同厌氧发酵工艺优劣对比

Table 2 Comparison of different anaerobic fermentation processes

工艺 Technology	优点 Advantage	缺点 Shortcoming
干式厌氧发酵	基本实现污染物零排放,负荷能力高,产气高	易酸化
湿式厌氧发酵	可处理较高浓度有机垃圾	成本高,沼渣和沼液处理难度较大
单相厌氧发酵	操作简单,处理效率较高,可实现资源化利用	系统稳定性差,易酸化
多相厌氧发酵	系统较稳定,产能较高	难以规模化应用,应用范围较小
中温厌氧发酵	甲烷产率高,能耗低	发酵时间长,对虫卵的灭杀率低
高温厌氧发酵	发酵时间短,产气快,虫卵灭活率达 90%	耗能高,沼气中氨浓度高,对环境危害大
序批式厌氧发酵	控制简单	出料不连续,运行成本较高
连续式厌氧发酵	处理能力强,无需消毒清洁	甲烷产率低

厌氧发酵工艺也存在一些弊端,例如:①易腐垃圾高油脂、高盐量的特点在发酵过程中严重影响微生物的生长,厌氧发酵达不到理想效果;②对资金要求较高,且工艺复杂、管理困难,难以保持稳定运行。

此外,厌氧发酵技术对发酵条件的要求极为严格,尤其是对发酵菌种的选择。然而,易腐垃圾高油高盐的典型特征导致多数厌氧细菌发酵效率低甚至难以存活。同时,由于缺乏耐低温厌氧菌种,厌氧发酵技术难以在我国寒冷地区推广使用。因此,针对厌氧发酵技术的限制因素,筛选新型耐盐与耐低温厌氧菌是目前亟待解决的问题。

3.3 好氧堆肥技术

好氧堆肥是好氧微生物在有氧条件下,将易腐垃圾中的有机物转化为无机物质,同时释放能量的过程^[36]。而易腐垃圾有机质含量丰富,营养元素全面,有利于微生物的生长繁殖,适宜利用好氧堆肥工艺进行处理。好氧堆肥技术主要包括传统好氧堆肥与高温好氧堆肥两类。传统好氧堆肥可利用易腐垃圾中土著微生物分解有机质,此方式成本低、简单易操作,但占地面积大。高温好氧堆肥相较于传统好氧堆肥,其减量化作用明显,占地较小,堆肥产生的高温有利于去除易腐垃圾中的病原微生物^[38]。图 2 为以易腐垃圾为底物的好氧堆肥工艺流程。CHANG 等^[39]对自制的易腐垃圾进行堆肥试验,结果表明好氧堆肥发酵周期较短,能在 4 d 内完成堆肥,实现对易腐垃圾的资源化利用。余培斌等^[38]从腐熟后的易腐垃圾中筛选出了枯草芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌,制成复合菌剂用于易腐垃圾的好氧堆肥,结果表明该复合菌剂不仅缩短堆肥周期,且使易腐垃圾的降解率提高了 31%。王春雨等^[40]则利用罐式好氧发酵堆肥处理易腐垃圾,发现该技术有效地改善了原生垃圾填埋现状,减少 90% 需要填埋的易腐垃圾,在延长垃圾

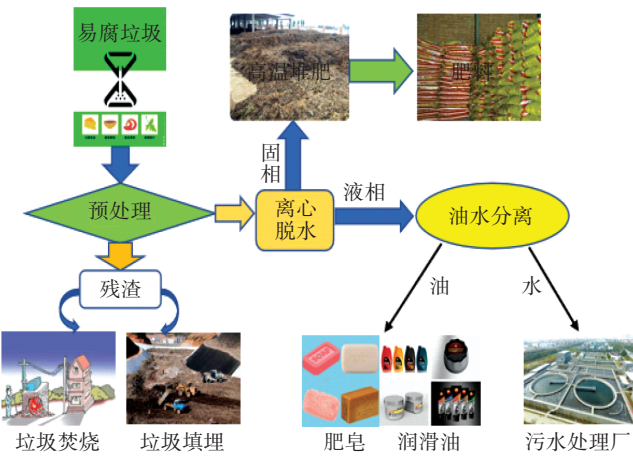


图 2 高温好氧堆肥工艺流程

Figure 2 High-temperature aerobic composting process

填埋场使用寿命的同时,也一定程度上实现了资源化、减量化、无害化的目标。此外,在好氧堆肥的基础上引入蚯蚓,利用其丰富的酶系统也可将易腐垃圾中的有机物质进一步转化为可直接利用的营养物质,从而提高对易腐垃圾的资源化利用效率^[41]。

通过好氧堆肥的方式可以获得较稳定、高肥效的腐殖质,且操作简单、发酵周期较短、对环境的污染小、便于机械化操作^[42]。然而,国内好氧堆肥多数采用条垛式或窄槽、浅槽堆肥的方式,对土地面积的需求较大,同时堆肥环境难以控制^[43]。此外,易腐垃圾来源广泛、发酵时间短、成分复杂,通过好氧堆肥生产的肥料中杂质较多,产出的肥料品质难以保障^[37]。

因此,鉴于好氧发酵技术对于土地面积的需求较大,此项技术更适合在土地相对富余的农村地区推广,而不适合在土地资源短缺的城市推广使用。此外,针对好氧发酵堆肥产品质量差的问题,可以结合垃圾分类措施对垃圾进行初步筛选,进而联合预处理、多次发酵等手段改善堆肥质量。

4 其他处理技术

易腐垃圾联合生物处理技术是将两种或多种生物处理过程组合起来,同时实现对两种或两种以上废物的减量化、无害化和资源化利用,从而减少分支处理流程、提高废弃物处理效率的技术手段。ZHANG等^[44]发现将黑水与易腐垃圾复合发酵可以提高黑水中能量的回收率和易腐垃圾的利用率。李思宇等^[45]在剩余污泥与易腐垃圾混合发酵的研究中指出,单独的污泥发酵有机质不足,单独的易腐垃圾发酵有机质过多,易导致发酵环境酸化。因此,污泥与易腐垃圾混合发酵可作为城市固废垃圾资源化和集约化处理的新途径。

热解技术的出现为我国易腐垃圾的处理提供了新的思路,即在无氧或者缺氧的条件下对易腐垃圾进行加热,将复杂的有机物质分解为固体残渣^[46]。近年来,易腐垃圾的热解研究日益活跃,有研究者利用热解技术开发的装备处理填埋场腐熟后的垃圾,可将易腐垃圾减量95%^[21]。上海市采用的热解炭化工艺将易腐垃圾脱水烘干后炭化为可燃烧炭,产炭率可以达到3%~10%^[47]。黄云龙等^[48]对易腐垃圾热解产物进行分析,结果表明易腐垃圾热解产生的气体主要是一氧化碳和甲烷,固体产物为焦炭,液体产物为焦油,皆可作为燃料使用。易腐垃圾热解技术有效避免了二次污染的产生,且产物极具利用价值,是一种极具发展潜力的处理技术。

此外,ANTONOPOULOU等^[49]研究出易腐垃圾萃取液作为微生物燃料电池的底物发电技术。易腐垃圾中的生物质可作为微生物燃料电池发电的理想基质,极具应用前景。

5 垃圾分类对易腐垃圾处理的影响

易腐垃圾通常与生活垃圾混合收集,含有玻璃、渣石等杂质,甚至还含有重金属等物质^[50]。这不仅增大了易腐垃圾的体积,而且增加了处理成本。同时,在垃圾清理频率较低的农村地区,易腐垃圾在炎热的季节极易腐烂,长时间的堆积或运输途中刺鼻气味的散发将导致大气污染,加剧环境问题,危害人体健康。而垃圾经分类收集后,易腐垃圾被单独分离出来,采用封闭式的收集桶进行收纳,置于指定地点,便于后续处理。可依据不同地区和不同垃圾类型制定相应的运输模式^[51],由垃圾清运人员定时收集并运输至垃圾处理厂。垃圾分类可在缓解垃圾处理厂处理压力

的同时,有效避免对环境和垃圾收集员健康造成的不良影响。

此外,未经垃圾分类而被收集来的垃圾杂质较多,因此需要对其进行分选、脱水等前处理。这不仅增加了易腐垃圾的处理难度和成本,而且在预处理过程中还会导致易腐垃圾的流失,造成资源浪费^[52]。未经分类收集的易腐垃圾中可降解的有机部分与不可降解的玻璃瓶、易拉罐等混合^[53],可能使易腐垃圾资源化处理所得到的产品(如肥料、饲料等)中残留抗生素、重金属等,从而威胁环境安全,甚至危害人体健康。而垃圾经分类收集后,可以减少处理前的分选等步骤,从而降低成本,提高易腐垃圾的处理效率,同时,饲料化处理技术所产生的“同源污染”等食品安全问题也可以得到有效解决。此外,分类后易腐垃圾中的重金属、抗生素和有机污染物含量会大幅下降,经过堆肥或饲料化所得到的肥料、饲料等农用产品的品质得到有力保障。

6 展望

本文对易腐垃圾的来源及特征进行了归纳分析,概述了焚烧、填埋、饲料化处理、粉碎直排、厌氧发酵、好氧堆肥等处理方法,同时总结了这些易腐垃圾处理技术的效果和优劣,并就垃圾分类措施对易腐垃圾处理的影响给出了一些见解。最后,基于垃圾分类的大背景,指出了易腐垃圾处理在地区差异、技术适用性等方面存在的一些问题,基于此,引发了关于我国未来对易腐垃圾处理的一些思考和想法:

(1)易腐垃圾的资源化利用技术对微生物菌种有一定的要求,在寒冷地区采用厌氧发酵或好氧堆肥技术时,低温会限制微生物菌种的活力,降低发酵效率。因此,筛选耐低温发酵菌是易腐垃圾资源化处理技术在寒冷地区推广的技术重点之一。

(2)易腐垃圾具有含水率高和含盐量高的共性,因此无论是采用传统的处理技术还是对其进行资源化利用,都需要进行脱水与脱盐处理。后续研究的重点应聚焦易腐垃圾前处理中脱水脱盐技术的研发与优化,并综合考虑既高效又低耗的经济要求。

(3)农村与城市的易腐垃圾处理技术选择标准应因地制宜。农村的地理位置偏远,交通不便,缺乏易腐垃圾处理厂,为避免易腐垃圾运输过程中出现泄漏和减少运输成本,相关部门应加强农村地区的基础设施建设,充分评估易腐垃圾处理技术在不同地区的可行性,提高对易腐垃圾的利用效率。而在城市中,则

应开发方便、占地面积小的处理技术。通过有效的方式对易腐垃圾进行回收,同时加大垃圾分类政策的执行力度,从源头上控制易腐垃圾的质量。

(4)易腐垃圾具有携带和传播病毒的风险。传统垃圾处理方式在收集、运输与处置过程中,极易滋生蚊蝇,为病毒的迁移扩散提供途径,增加交叉感染的风险,从而威胁人体健康。鉴于此,应避免异位处理或远距离运输易腐垃圾,加强易腐垃圾原位预处理技术研究,降低病毒传播的风险。

参考文献:

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于转发国家发展改革委 住房城乡建设部生活垃圾分类制度实施方案的通知[EB/OL]. (2017-03-18)[2020-06-21]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-03/30/content_5182124.htm. General Office of the State Council. Circular of the General Office of the State Council on transmitting the *Implementation Plan of the Classification System for Domestic Waste* of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development and the National State Development and Reform Commission[EB/OL]. (2017-03-18)[2020-06-21]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-03/30/content_5182124.htm.
- [2] 张蓉.《杭州市生活垃圾管理条例》今起正式实施[EB/OL]. (2019-08-15)[2020-06-21]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1641897519811893735>. ZHANG R. *Hangzhou Municipal Solid Waste Management Regulations* from now on the official implementation[EB/OL]. (2019-08-15)[2020-06-21]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1641897519811893735>.
- [3] BABBITT C W. The role of clean technology research in creating sustainable urban food waste solutions[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2020, 22(1):1-4.
- [4] 鲁晓菊. 加强生活垃圾分类中易腐垃圾厌氧消化处理的必要性研究[J]. 区域治理, 2018(12):52. LU X J. Study on the necessity of strengthening the anaerobic digestion and treatment of perishable waste in the classification of domestic waste[J]. *Regional Governance*, 2018(12):52.
- [5] SHARMA P, GAUR V K, KIM S H, et al. Microbial strategies for bio-transforming food waste into resources[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 299:122580.
- [6] ZHOU Y, ENGLER N, NELLES M. Symbiotic relationship between hydrothermal carbonization technology and anaerobic digestion for food waste in China[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 260:404-412.
- [7] 国家发展改革委办公厅. 国家发展改革委办公厅、住房城乡建设部办公厅关于征求对《垃圾强制分类制度方案(征求意见稿)》意见的函[EB/OL]. (2016-06-15)[2020-06-21]. http://www.gov.cn/hudong/2016-06/20/content_5083862.htm. Office of the National Development Reform Commission. Letter from the General Office of the National Development and Reform Commission and the General Office of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development on soliciting opinions on the *Programme of the Compulsory Classification System for Garbage*[EB/OL]. (2016-06-15)[2020-06-21]. http://www.gov.cn/hudong/2016-06/20/content_5083862.htm.
- [8] GAO A Q, TIAN Z Y, WANG Z Y, et al. Comparison between the technologies for food waste treatment[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105:3915-3921.
- [9] 住房和城乡建设部. 生活垃圾分类标志 GB/T 19095—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of PRC. *Classification mark of domestic waste GB/T 19095—2019*[S]. Beijing: China Standards Press, 2019.
- [10] YU Q Q, LI H. Moderate separation of household kitchen waste towards global optimization of municipal solid waste management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277:123330.
- [11] FENG H L, WANG X J, CAI J S, et al. Discrepancies in N₂O emissions between household waste and its food waste and non-food waste components during the predisposal stage[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 265:110548.
- [12] AHAMED A, YIN K, NG B J H, et al. Life cycle assessment of the present and proposed food waste management technologies from environmental and economic impact perspectives[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 131:607-614.
- [13] 马志丹. 菜市场垃圾减量化、资源化的研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2014. MA Z D. Research on the vegetable market waste in its reduce and reuse[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2014.
- [14] 邵蕾. 厨余垃圾家庭好氧生物处理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. SHAO L. Research of household food waste aerobic biological treatment[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [15] WEN Z G, WANG Y J, DE CLERCQ D. What is the true value of food waste? A case study of technology integration in urban food waste treatment in Suzhou City, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 118:88-96.
- [16] 史东晓, 屈阳, 潘天高, 等. 菜市场垃圾预处理浆料的减量化试验研究[J]. 环境工程, 2014, 32(6):93-96. SHI D X, QU Y, PAN T G, et al. Study on decrement of fragmented food from a pretreatment system for vegetable market waste[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(6):93-96.
- [17] 邓俊. 餐厨垃圾无害化处理与资源化利用现状及发展趋势[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(6):637-642. DENG J. Harmless treatment and resource utilization of kitchen waste development status and trend[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(6):637-642.
- [18] 邓伟, 刘军晓, 黄伟钊, 等. 易腐垃圾干法厌氧沼气工程工艺运行分析[J]. 中国沼气, 2017, 35(4):79-83. DENG W, LIU J X, HUANG W Z, et al. The process analysis of dry anaerobic engineering treating biodegradable urban waste[J]. *China Biogas*, 2017, 35(4):79-83.
- [19] 路小彬, 杨书荣, 杨军. 生活有机垃圾裂解燃油技术[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(8):93-94. LU X B, YANG S R, YANG J. Pyrolysis fuel technology using domestic organic waste[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2019, 45(8):93-94.

- [20] 张丽军. 城市餐厨垃圾特点及处理技术分析[J]. 环境与发展, 2017, 29(5): 232, 234. ZHANG L J. Analysis on characteristics and treatment technology of urban food waste[J]. *Environment and Development*, 2017, 29(5): 232, 234.
- [21] 杨超. 热解气化技术在农村生活垃圾处理中的优势[J]. 节能与环保, 2019(7): 61-62. YANG C. Advantages of pyrolysis and gasification technology in rural domestic waste treatment[J]. *Energy Conservation & Environmental Protection*, 2019(7): 61-62.
- [22] KAUR G, LUO L, CHEN G H. Integrated food waste and sewage treatment: A better approach than conventional food waste-sludge co-digestion for higher energy recovery via anaerobic digestion[J]. *Biore-source Technology*, 2019, 289: 121698.
- [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. LIU Z X, PENG J. Characteristics and treatment technologies of food residue[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(7): 102-104.
- [24] 刘荣杰, 邓舟, 梁卫坤, 等. 深圳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. LIU R J, DENG Z, LIANG W K, et al. Tolerance analysis of municipal sewage plants in Shenzhen by the application of kitchen waste disposer[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2018, 26(4): 43-47.
- [25] 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.
- [26] 郝晓地, 周鹏, 曹达啓. 餐厨垃圾处置方式及其碳排放分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2): 673-682. HAO X D, ZHOU P, CAO D Q. Analyses of disposal methods and carbon emissions of food wastes[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(2): 673-682.
- [27] 冯华一. 餐厨垃圾资源化利用处理方法现状及改进策略研究[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(8): 58-60. FENG H Y. Research on current situation and improvement strategy of food waste utilization treatment method[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, 37(8): 58-60.
- [28] 王孝强, 尹玮, 汪群慧, 等. 餐厨垃圾乳酸发酵残渣生产蛋白饲料的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2008, 24(4): 404-408. WANG X Q, YIN W, WANG Q H, et al. Animal feed production from lactic acid fermentation residue of kitchen waste using Plackett-Burman design[J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2008, 24(4): 404-408.
- [29] 黄泉, 郗登宝. 国内餐厨垃圾处理现状及对策[J]. 农业工程技术(新能源产业), 2013(9): 3-6. HUANG X, XI D B. Current situation and countermeasures of domestic kitchen waste treatment[J]. *Agricultural Engineering Technology (New Energy Industry)*, 2013(9): 3-6.
- [30] 闫骏, 王则武, 周雨琨, 等. 我国农村生活垃圾的产生现状及处理模式[J]. 中国环保产业, 2014(12): 49-53. YAN J, WANG Z W, ZHOU Y J, et al. Generation status and treatment mode of rural domestic refuse in China[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014(12): 49-53.
- [31] 继宁. 餐厨垃圾饲料化处理的风险及改进措施[N]. 中国食品报, 2014-02-18(007). JI N. Risk and improvement measures for feed treatment of kitchen waste[N]. *China Food Newspaper*, 2014-02-18(007).
- [32] ZHAO J W, JING Y M, ZHANG J, et al. Aged refuse enhances anaerobic fermentation of food waste to produce short-chain fatty acids[J]. *Biore-source Technology*, 2019, 289: 121547.
- [33] 王佳君. 餐厨垃圾的厌氧发酵及资源化利用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016. WANG J J. Anaerobic digestion and resource utilization for food waste[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [34] SAHA S, LEE H S. High-rate carboxylate production in dry fermentation of food waste at room temperature[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136695.
- [35] SAINT-JOLY C, DESBOIS S, LOTTI J P. Determinant impact of waste collection and composition anaerobic digestion performance: Industrial results[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(3): 291-297.
- [36] KOSSEVA M R. Management and processing of food wastes[M]// MOO-YOUNG M. Comprehensive biotechnology: Second edition. Burlington: Academic Press, 2011: 557-593.
- [37] 刘增革. 餐厨垃圾的处理技术[J]. 科技创新与应用, 2019(35): 155-156. LIU Z G. Treatment technology of kitchen waste[J]. *Technology Innovation and Application*, 2019(35): 155-156.
- [38] 余培斌, 杜晶, 陈建新. 高温好氧堆肥过程中芽孢杆菌的筛选、鉴定及应用[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 119-205, 212. YU P B, DU J, CHEN J X. Study on screening and identification of *Bacillus* in the process of high-temperature aerobic composting and its application[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(12): 119-205, 212.
- [39] CHANG J I, TSAI J J, WU K H. Thermophilic composting of food waste[J]. *Biore-source Technology*, 2006, 97(1): 116-122.
- [40] 王春雨, 陈荣. 罐式好氧发酵堆肥处理生活、餐厨垃圾及资源化利用的研究[J]. 科技创新与应用, 2017(21): 24-25. WANG C Y, CHEN R. Study on the treatment of life, kitchen waste and utilization of resources by aerobic fermentation composting in tank[J]. *Technology Innovation and Application*, 2017(21): 24-25.
- [41] KESAN J, PENGOMPOSAN V, TERHADAP U, et al. Effects of vermicomposting duration to macronutrient elements and heavy metals concentrations in vermicompost[J]. *Sains Malaysiana*, 2010, 39(5): 711-715.
- [42] 刘建伟, 赵高辉. 城市生活垃圾资源化综合处理技术研究和应用进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(34): 40-47. LIU J W, ZHAO G H. Research progress of city life solid waste comprehensive treatment technology and application progress[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(34): 40-47.
- [43] 梁浩, 吴德胜, 赵明杰, 等. 好氧堆肥技术发展现状与应用[J]. 农业工程, 2020, 10(4): 50-53. LIANG H, WU D S, ZHAO M J, et al. Development and application of aerobic composting technology[J]. *Agricultural Engineering*, 2020, 10(4): 50-53.
- [44] ZHANG L, GUO B, ZHANG Q, et al. Co-digestion of blackwater with kitchen organic waste: Effects of mixing ratios and insights into micro-

- bial community[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 236:117703.
- [45] 李思宇, 杨玉萍, 苑宏英, 等. 剩余污泥与餐厨垃圾混合发酵处理技术现状及影响因素分析[J]. 绿色科技, 2018(12):64-66. LI S Y, YANG Y P, YUAN H Y, et al. Analysis on the present situation and influencing factors of mixed fermentation technology of residual sludge and kitchen waste[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2018(12):64-66.
- [46] LU J S, CHANG Y J, POON C S, et al. Slow pyrolysis of municipal solid waste (MSW): A review[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 312: 123615.
- [47] 毕珠洁, 邵俊. 我国湿垃圾处理工艺类型及扶持政策浅析——以上海为例[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(4):54-58. BI Z J, TAI J. Analysis on wet waste treatment process technology and enabling policies in China: A case study of Shanghai[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(4):54-58.
- [48] 黄云龙, 郭庆杰, 田红景, 等. 餐厨垃圾热解实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(4):721-728. HUANG Y L, GUO Q J, TIAN H J, et al. Study on pyrolysis of kitchen waste (KW) by using thermo gravimetric analyzer (TGA) and tube furnace[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2012, 26(4):721-728.
- [49] ANTONOPOULOU G, NTAIKOU I, PASTORE C, et al. An overall perspective for the energetic valorization of household food waste using microbial fuel cell technology of its extract, coupled with anaerobic digestion of the solid residue[J]. *Applied Energy*, 2019, 242:1064-1073.
- [50] ZHUANG Y, WU S W, WANG Y L, et al. Source separation of household waste: A case study in China[J]. *Waste Management*, 2008, 28(10):2022-2030.
- [51] 王晨颀. 基于分类的北京城市生活垃圾清运车辆调度与优化研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018. WANG C D. Research on vehicle dispatching and optimization of Beijing refuse collection based on municipal solid waste classification[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [52] DAVIDSSON A, BERNSTAD S A, 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.
- [53] YUAN J, LI Y, WANG G Y, et al. Biodrying performance and combustion characteristics related to bulking agent amendments during kitchen waste biodrying[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 284:56-64.