

# 2020年中国垃圾分类背景下厨余垃圾处理热点回眸

蒋建国<sup>1</sup>, 耿树标<sup>2</sup>, 罗维<sup>3</sup>, 江燕航<sup>4</sup>, 高语晨<sup>1</sup>, 陈哲红<sup>2</sup>, 杨国栋<sup>4</sup>, 兰天<sup>1</sup>, 孟园<sup>1</sup>, 鞠彤瑶<sup>1</sup>, 韩思宇<sup>1</sup>, 沈鹏飞<sup>2</sup>, 向虹霖<sup>1</sup>

1. 清华大学环境学院, 北京 100084
2. 中国铁工投资建设集团有限公司, 北京 101300
3. 深圳市宝安区城市管理和综合执法局, 深圳 518101
4. 深圳市宝安区市容环境综合管理服务中心, 深圳 518101

**摘要** 随着中国垃圾分类工作不断推进, 厨余垃圾的分类收集及其处理处置凸显出诸多问题。梳理了中国垃圾分类政策的推行现状、厨余垃圾的产生和处理情况, 重点回顾了厌氧消化、堆肥、生物干化、腐生生物养殖和物理预处理等几项关键的厨余垃圾处理技术在2020年取得的研究进展, 整合了技术研究热点和相关工程案例, 为中国厨余垃圾处理技术的进一步研发和应用提供指引。

**关键词** 垃圾分类; 厨余垃圾; 资源化; 减量化

## 1 中国垃圾分类政策推进现状

自2017年3月, 国家发展改革委员会、住房城乡建设部联合发布了《生活垃圾分类制度实施方案》(以下简称《方案》<sup>[1]</sup>)起, 中国生活垃圾分类进入“强制时代”, 从过去的自愿参与, 到法律法规条款下的强制执行, 垃圾分类已经走过3个年头。2020年4月29日第二次修订通过的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》提出设立生活垃圾

分类制度, 并坚持政府推动、全民参与、城乡统筹、因地制宜、简便易行的原则。《方案》中提出2020年底中国的省辖市、省会城市以及一些计划单列市等46座城市均要先行实施生活垃圾强制分类, 从中央到地方, 上海2019年带头实施, 北京、广州、浙江等省份2020年紧随其后, 过去1年垃圾分类行动如火如荼向前推进。

表1整理了中国部分典型城市发布的垃圾分类相关政策方案, 并对发布实施时间及工作进展进

收稿日期: 2020-12-25; 修回日期: 2020-01-05

基金项目: 生态环境部水体污染控制与治理科技重大专项“十三五”项目(2017ZX07202005)

作者简介: 蒋建国, 教授, 研究方向为固体废物处理, 电子信箱: jianguoj@tsinghua.edu.cn

引用格式: 蒋建国, 耿树标, 罗维, 等. 2020年中国垃圾分类背景下厨余垃圾处理热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 261-276; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.01.022

表1 中国部分省市地区生活垃圾分类相关政策及工作进展

地区	名称	时间	垃圾分类工作进展(截至2020年底)
厦门	《厦门经济特区生活垃圾分类管理办法》	2017.8.25通过 2017.9.10施行	生活垃圾分类收集实现全覆盖,全市3000余个居住小区全部实现分类收集、分类运输和分类处理,小区覆盖率达100% <sup>[2]</sup> 。
广州	《广州市生活垃圾分类管理条例》	2018.3.30通过 2018.7.01施行	构建“1+2+3+N”生活垃圾分类政策体系,深入推进教育、医疗、酒店、快递、物业等行业12项垃圾源头减量专项行动,生活垃圾回收利用率超38% <sup>[3]</sup> 。 全程分类体系基本建成,干垃圾焚烧和湿垃圾资源化利用总能力显著提升,2020年基本实现原生生活垃圾零填埋。
上海	《上海市生活垃圾管理条例》	2019.1.31通过 2019.7.1施行	垃圾分类实效趋于稳定,“四分类”垃圾实现可回收物回收量、有害垃圾分出量、湿垃圾分出量增长,干垃圾处置量减少 <sup>[4]</sup> 。
青岛	《青岛市生活垃圾分类管理办法》	2019.11.18通过 2020.1.6施行	市区全部居民小区(4534个)及公共机构(2059个)已实现生活垃圾分类设施全覆盖;分类收运基本覆盖市区,分类处理体系基本建立 <sup>[5]</sup> 。
北京	《北京市生活垃圾管理条例》	2019.11.27通过 2020.5.1施行	北京市持续建立健全垃圾分类投放、收集、运输、处理体系,大力开展“桶”“车”“站”“楼”全链条设施设备改造提升。厨余垃圾分出量稳步增加,其他垃圾减量明显 <sup>[6]</sup> 。 全市共推进“三定一督”小区4113个,覆盖率达87.4%。市级19家单位具有垃圾分类行业管理职能,均出台相关行业标准、措施并组织实施。坚持垃圾分类收运“四不同”(不同人员、不同车辆、不同要求、不同去向)原则,全面架牢垃圾分类前后衔接工作链 <sup>[7]</sup> 。
苏州	《苏州市生活垃圾分类管理条例》	2019.11.29通过 2020.6.1施行	全市3823个小区和1716个城中村实现了分类覆盖,实现“三增一减”,可回收物、厨余垃圾、有害垃圾的分类回收量实现不同幅度的增长,其他垃圾量下降 <sup>[8]</sup> 。
深圳	《深圳市生活垃圾分类管理条例》	2019.12.31通过 2020.9.1施行	

行梳理,其中厦门、广州及上海分别代表了2017—2019年开展相关行动的地区,青岛、北京、苏州及深圳为2020年开始施行垃圾分类的重点城市,西安、成都、沈阳、济南和石家庄将于2021年正式实施。住房和城乡建设部于2020年12月召开新闻通气会表示,中国当前生活垃圾分类工作取得了阶段性进展,46个重点城市生活垃圾分类覆盖7700多万家庭,居民小区覆盖率86.6%,其他地级城市生活垃圾分类已全面启动。

2020年5月1日,北京市垃圾分类工作在新修订的《北京市生活垃圾管理条例》指导下全面施行,截至2020年底,北京市家庭厨余垃圾分出量大幅提升,从新条例实施前的309 t/d增长至4248 t/d,增长了12.7倍,厨余垃圾分出率达到21.78%;其他垃圾减量明显,为1.53万 t/d,同比去年下降35%<sup>[9]</sup>。上海市作为强制垃圾分类的“排头兵”,与2019年相比,2020年1~11月湿垃圾(即厨余垃圾)分出量

为9428 t/d,增长27%;干垃圾(即其他垃圾)处置量为14178 t/d,下降20%,可回收物回收量增长53%,有害垃圾分出量增加3.3倍<sup>[10]</sup>。对于垃圾分类开展不足半年的城市,以深圳市为例,《深圳市生活垃圾分类管理条例》实施仅百日,厨余垃圾分类回收量由660 t/d增至2300 t/d,升幅250%<sup>[11]</sup>。垃圾分类有效实现了4类垃圾的“三升一降”,但也为末端处理带来了新的挑战,图1为深圳市某小区生活垃圾分类集中投放点。



图1 深圳市某小区生活垃圾分类集中投放点

除了取得的成绩,垃圾分类工作目前仍然存在很多的不足和改进空间。部分地区片面地强调将厨余垃圾分出量的增长作为垃圾分类工作的考核指标,这不仅会导致部分基层部门为追求指标而采用一些不合理的手段,而且背离了垃圾分类工作希望实现“源头减量”的初衷。同时,分出的厨余垃圾缺少可靠的资源化消解能力,例如上海市在前期对湿垃圾产生量预估不足,导致末端设施的处理能力难以匹配实际需求处理量,在集中处理设施建设完成之前,主要采取集中+就地相结合的处理方式,现有4座在建集中处理设施完全建成后才能基本满足每日9000余t湿垃圾的处理<sup>[12]</sup>。广西南宁市日产生厨余垃圾600~800t,但具有许可资质的企业目前处理能力仅为450t,收运及处理能力难以满足需求<sup>[13]</sup>。在这种情况下,目前一些城市地区垃圾混合收集、运输、处理(焚烧或填埋)仍然是垃圾清运处理工作的“常态模式”<sup>[14]</sup>。花了大力气分出来的厨余垃圾,绕了一圈后还是通过焚烧、填埋进行处理,相比之前不仅没有带来资源化收益,反而增加了很多的成本。

根据国家统计局公布的数据显示,2019年中国城市生活垃圾清运量为2.42亿t<sup>[15]</sup>,同比增长6.16%,当前生活垃圾的无害化处理仍主要通过卫生填埋和焚烧进行,但现有的填埋和焚烧的处理处置能力趋于饱和且难以新建,“垃圾围城”已成为大多数城市面临的主要环境问题之一。垃圾分类的实施能有效实现垃圾的源头减量,推动可回收资源的循环利用,是提振固废全产业链以及助力城市生态文明建设的关键环节。厨余垃圾在分类收运后大量集中,与之配套的资源化处理技术设施及消纳能力却严重不足,与其他垃圾混收混运现象也时有发生<sup>[16]</sup>,这种停留在表面并未贯穿整个垃圾分类处

理链条的现象,极大程度降低民众对垃圾分类的信心与积极性,不利于垃圾分类的广泛推进。

## 2 厨余垃圾的产生及处理现状

目前各类文献或新闻报道中对于“厨余垃圾”“餐厨垃圾”等概念通常没有明确区分,容易造成混淆。来自居民厨房的家庭厨余垃圾、来自餐厅和食堂的餐厨垃圾以及来自菜场的果蔬垃圾都属于“易腐垃圾”,即易腐烂的、含有机质的生活垃圾。本文所涉及的厨余垃圾是指除餐厨垃圾之外的易腐垃圾,包括居民生活中产生的食物残余、吃剩的食物和来自菜场的果蔬垃圾。中国厨余垃圾一方面来源分散,相对较难单独管理,另一方面产生量大,是“湿垃圾”中占比最大的类别。2018年中国易腐垃圾产生量达到1.08亿t<sup>[17]</sup>。深圳市仅来自家庭厨房的厨余垃圾占易腐垃圾比例就高达73%<sup>[18]</sup>,2020年5月广州市厨余垃圾清运量达1120t/d<sup>[19]</sup>。

表2<sup>[20-22]</sup>为餐厨垃圾和厨余垃圾的物化特性对比,其中厨余垃圾数据基于2020年北京市海淀区大工村厨余垃圾处理厂采样测得。与来自餐饮单位的餐厨垃圾相比,厨余垃圾在水、油、盐的含量上具有较大差异。厨余垃圾含水率达75%以上,而餐厨垃圾含水率更高,一般在90%左右。厨余垃圾中油脂、盐(氯化钠)含量相对较低,这一方面是因为家庭烹饪所用的油和盐相比于餐厅来说较少,另一方面是由于厨余垃圾中存在较高比例的水果和蔬菜等废弃物,降低了垃圾整体的蛋白质、油脂和盐的含量。

现有的厨余垃圾处理技术可分为生物法、物理法、化学法等,具体的处理技术包括破碎直排处理技术、厌氧处理技术、蚯蚓堆肥技术、微生物菌体处

表2 餐厨垃圾和厨余垃圾物化特性比较

特性 垃圾种类	含水率/%	碳水/%	蛋白质/%	氯化钠/%	脂肪/%
餐厨垃圾	88.0~92.0	3.8~4.1	11.1~12.1	1.2~2.2	3.4~9.3
厨余垃圾	76.6~78.6	8.7~10.3	3.5~4.0	0.27~0.45	2.8~4.6

\*注:餐厨垃圾的碳水、蛋白质、氯化钠及脂肪含量为脱去游离水后(含水率约70%)的测定结果。

理技术、饲料化处理技术、焚烧处理技术、制肥处理技术等。目前应用最普遍的是厌氧消化技术,以广州市为例,到2020年已建成运营2200 t/d的厨余垃圾处理设施,其中采用厌氧发酵技术的处理能力达2000 t/d,采用高温好氧制腐殖酸技术的处理能力达200 t/d<sup>[9]</sup>。此外,堆肥、腐生生物处理、机械处理等也是常见的厨余垃圾处理手段。

当前厨余垃圾的处理仍面临诸多问题。从处理能力来讲,厨余垃圾处理设施一般由部分餐厨垃圾处理设施改建而成,而全国城市餐厨垃圾每年都仅有12%得到了资源化及无害化处理<sup>[9]</sup>。以北京为例,现有23座餐厨垃圾处理设施,处理能力为2700 t/d,垃圾分类后日产餐厨垃圾的量在6500 t/d

以上<sup>[21]</sup>,易腐垃圾整体处理能力还存在较大缺口。从政策层面来讲,对处理技术规范不明确或认识不正确的情形普遍存在。表3总结了深圳、上海、北京及杭州这4个典型城市所发布政策条例中与厨余垃圾相关的内容,可以看出,产沼、堆肥等传统生化处理技术还是各个地方用于厨余垃圾处理的主要推荐技术,这些技术成熟度高、资源化利用率高、大型工程建设和运营的经验丰富。但目前产沼技术产生的沼渣和沼液处理难度较大,堆肥技术的产品后端出路较窄,造成这些技术整体的处理效果不佳且成本偏高。因此,因地制宜研发出减量化显著、资源化程度高的处理技术,并对这些技术进行工艺优化是厨余垃圾处理的当务之急。

表3 中国部分省市地区厨余垃圾处理相关政策

名称	厨余垃圾处理相关部分内容
《深圳市生活垃圾分类管理条例》	厨余垃圾应当主要采用产沼、制肥等生化处理方式进行资源化利用。 鼓励农产品批发市场、农贸市场、大型超市、食堂、餐饮单位以及有条件的住宅区安装符合标准的厨余垃圾处理装置,进行就地处理。 新建农贸市场、标准化菜场的,应当按照标准同步配置湿垃圾就地处理设施。 已建成的农贸市场、标准化菜场湿垃圾产生量达到一定规模的,应当按照标准配置湿垃圾就地处理设施。
《上海市生活垃圾分类管理条例》	鼓励产生湿垃圾的其他单位配置湿垃圾就地处理设施。 湿垃圾采用生化处理、产沼、堆肥等方式进行资源化利用或者无害化处置。 农村地区应当就地就近对湿垃圾进行资源化利用。
《北京市生活垃圾分类管理条例》	有条件的居住区、家庭可以安装符合标准的厨余垃圾处理装置。 推进厨余垃圾源头就地处理,对厨余垃圾就地处理设施的建设、运行给予指导和经济补助。 农村地区产生的厨余垃圾,应当按照农业废弃物资源化的要求,采用生化处理等技术就地或者集中处理。
《杭州市生活垃圾分类管理条例》	易腐垃圾应当采用生化厌氧产沼、堆肥、焚烧、填埋等方式进行资源化利用或者无害化处置。 农村地区产生的厨余垃圾,应当按照农业废弃物资源化的要求,采用生化处理等技术就地或者集中处置。

### 3 厨余垃圾处理技术研究热点

#### 3.1 厌氧消化处理技术

厌氧消化技术,即在无氧或缺氧条件下,厌氧微生物将厨余垃圾等有机废弃物中有机质进行分解利用并转化为 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、微生物细胞等物质的生物化学过程。在实现厨余垃圾减量化的同时可以

产生 $\text{H}_2$ 与 $\text{CH}_4$ 等能源,由于具有反应效率高、动力消耗低、实现沼气能源回收、制备高附加值副产物等优势,是目前常用的有机废弃物处理方法之一。随着垃圾分类政策不断推进落实,针对厨余垃圾的厌氧消化技术在2020年取得了相当的进展,下面就技术研究突破、工程案例进展和相关问题剖析等角度进行回顾。

### 3.1.1 技术研究突破

厨余垃圾厌氧消化预处理手段的开发是现阶段研究的一项重点。北京工商大学刘伊等<sup>[22]</sup>采用高温湿热预处理厨余垃圾,目的是提高厨余垃圾中大分子有机质的溶解性,进而促进厨余垃圾的资源利用率和生化处理潜能。而兰州交通大学 Zhen 等<sup>[23]</sup>采用微氧预处理的方式,促进微生物对小分子有机物的利用和分解,提高了厨余垃圾厌氧消化的产气效率,缩短了消化时间。清华大学蒋建国等<sup>[24]</sup>针对厨余垃圾 C/N 较低、营养元素不均衡等特征,导致厌氧消化体系挥发性有机酸和氨氮的累积、降低 CH<sub>4</sub> 产率等问题,开发了超声、碱热、微波等基质预处理手段,强化厨余垃圾中蛋白质、碳水化合物、脂肪等大分子有机物溶出分解,有效提高后续厌氧消化的效率,且有助于提高反应系统产沼速率,在较短时间内释放产气潜能。

另一方面,将厨余垃圾与其他有机废弃物混合共消化,其不同基质间对产沼的协同效应也不容忽视。江南大学赵明星等<sup>[25]</sup>发现将厨余垃圾、餐厨垃

圾、果蔬垃圾按照 5:2:3 的比例混配进行共消化,累积 CH<sub>4</sub> 产量和 CH<sub>4</sub> 含量相较于厨余垃圾单一消化,分别从 279.09 mL/g VS 和 50.12% 提升到了 354.51 mL/g VS 和 57.66%,有着明显的协同促进作用。西安建筑科技大学王晓昌等<sup>[26]</sup>也利用厨余垃圾和牛粪的共消化,实现了稳定、高速地产沼,在 300 d 以上的半连续生物反应器运行中,累积甲烷产量达到 441 mL/g VS,且未发现挥发性脂肪酸的累积。而厨余垃圾和市政污泥的共消化,同样被 Avn Institute of Engineering and Technology 的 Varsha 等<sup>[27]</sup>证明可有效规避了在单一厌氧消化中厨余垃圾 pH 缓冲能力弱、市政污泥可生化性较差的弊端,混合物料的 C/N 比合适、pH 值稳定,共消化有效对累积产甲烷量和生物降解性均有协同促进作用。图 2 展示了厨余垃圾、餐厨垃圾、果蔬垃圾共消化的协同作用。北京科技大学汪群慧等<sup>[28]</sup>通过引文数据库的文献计量分析研究,识别出共消化处理技术也是厨余垃圾厌氧消化技术现阶段以及未来研究的一个热点。

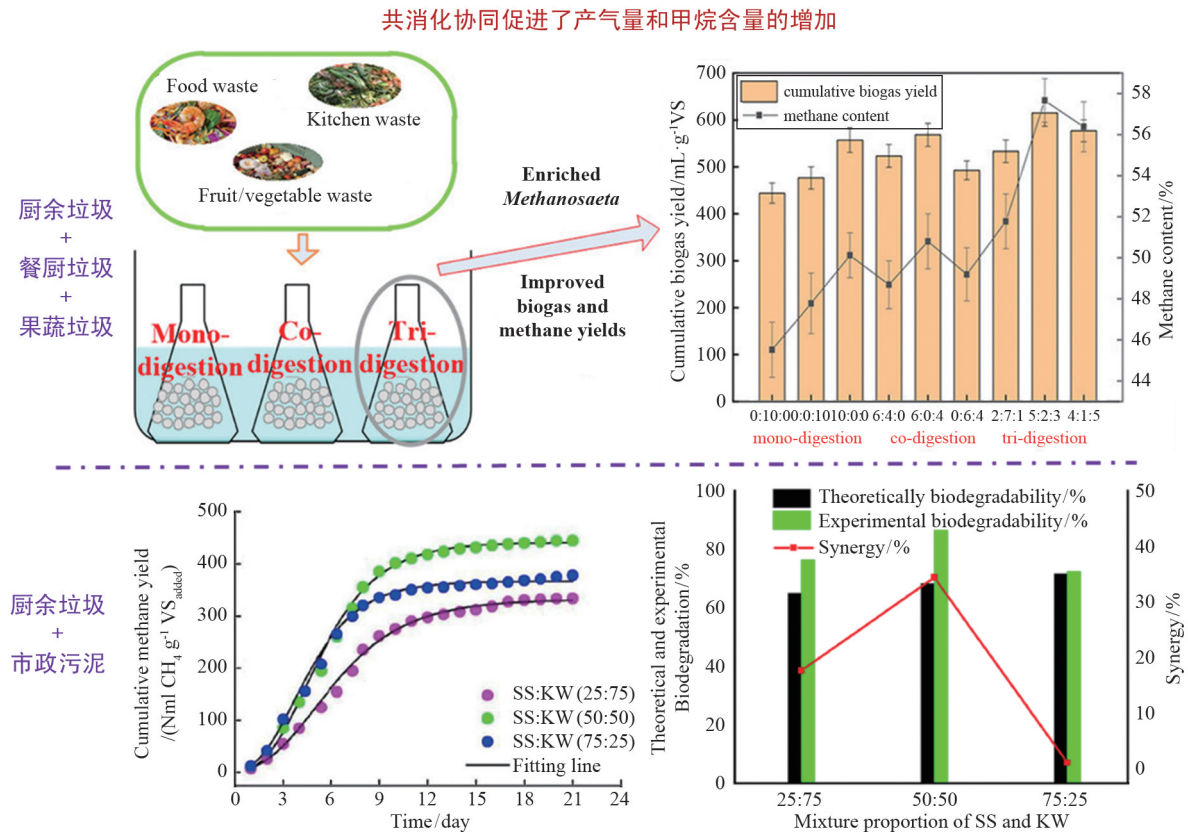


图2 厨余垃圾、餐厨垃圾、果蔬垃圾共消化的协同作用

### 3.1.2 工程应用案例

随着全国范围内垃圾分类工作的推进,末端厨余垃圾的处理处置设施也在逐年发展,国内已建和在建厨余垃圾厌氧消化工程案例较多,以“预处理—干式厌氧消化”“预处理—湿式厌氧消化”“预处理—生物水解—湿式厌氧消化”等工艺流程为主<sup>[29]</sup>。但值得注意的是,目前已建的厨余垃圾厌氧消化工程很多是依托原有餐厨垃圾处理设施进行改建运行。

例如,上海老港湿垃圾处理项目,处理规模为1000 t/d,其中餐饮垃圾400 t/d,厨余垃圾600 t/d,针对湿垃圾中餐饮、厨余垃圾的不同特性,确定餐饮垃圾采用“预处理+厌氧消化”,厨余垃圾采用“预处理+干式厌氧消化”的工艺路线,项目沼气产生量可达到50000 Nm<sup>3</sup>/d<sup>[30]</sup>。类似地,其他很多已

建和在建项目,针对厨余垃圾,均采用“预处理+干式厌氧消化”的主体工艺,采用水平推流式或者立式设备,这种技术的优势在于设备成熟稳定、适应性强、产气量高<sup>[32]</sup>。例如,青岛厨余垃圾项目的处理规模为500 t/d,其主要设施包括了厨余垃圾预处理、干式厌氧消化、沼渣脱水、沼渣干化、沼气净化及利用、除臭系统等;杭州天子岭处理规模200 t/d的厨余垃圾项目、北京市丰台区生活垃圾循环经济园处理规模300 t/d的厨余垃圾项目等也采用类似的工艺路线。另外,上海松江湿垃圾处理项目和上海嘉定湿垃圾处理项目等则采用了“预处理—生物水解—湿式厌氧消化”的主体工艺。图3为上海老港湿垃圾处理项目<sup>[33]</sup>、杭州天子岭厨余垃圾处理项目<sup>[34]</sup>、上海嘉定是垃圾处理项目工艺路线<sup>[35]</sup>。

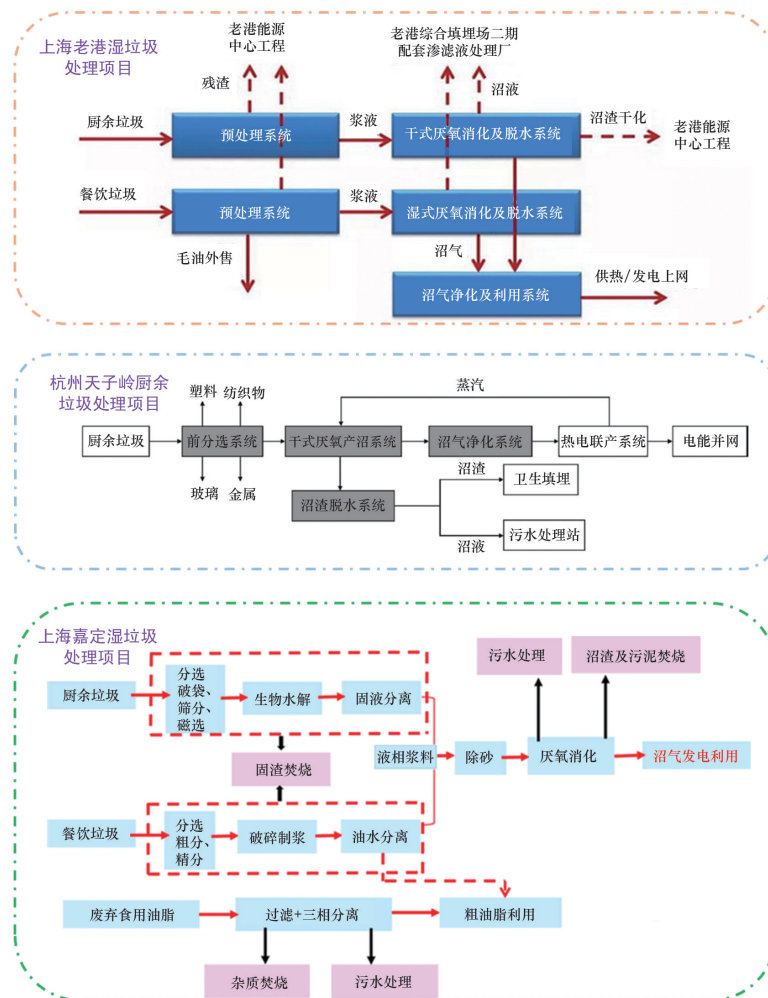


图3 上海老港湿垃圾处理项目、杭州天子岭厨余垃圾处理项目、上海嘉定是垃圾处理项目工艺路线

### 3.1.3 存在问题剖析

目前,厨余垃圾的厌氧消化技术的应用仍面临一些问题,主要包括厨余垃圾的颗粒较大,且存在一部分木质纤维素等难以被生物降解或利用的组分;厌氧消化系统易出现氨氮抑制现象,降低系统的产气效率;产甲烷菌生产周期长,消耗有机酸的能力有限,当系统有机负荷较高时,容易出现酸化现象等<sup>[36]</sup>。

而在应用方面,一些地方为了尽快消纳厨余垃圾,依托原有餐厨垃圾湿式厌氧消化处理设施进行厨余垃圾的厌氧消化,但厨余垃圾与餐厨垃圾相比,含水率、含油率、含盐率较低,预处理和厌氧消化工艺的选择有明显差异,因此直接采用餐厨垃圾厌氧消化工艺与设施处理厨余垃圾还存在较大问题。另一方面,厨余垃圾厌氧消化产生的沼气和沼渣的出路问题需要进一步考虑,沼气常被直接用作发热发电,丧失了其富含甲烷可进行高值化利用的优势,现有利用价值较低;而沼渣也常被直接脱水后焚烧,未拓展其利用途径,未来可考虑将具有环境安全性的厌氧消化沼渣经过高温堆肥后制备沼渣源有机肥,提高沼渣的资源化利用程度。

### 3.2 堆肥处理技术

厨余垃圾堆肥处理(肥料化处理)主要包括好氧堆肥及厌氧堆肥2种。好氧堆肥是指在有氧条件下微生物通过新陈代谢作用降解厨余垃圾中的

有机物,使垃圾最终达到稳定化无害化状态的过程,堆肥剩余物经调节达到相应标准后可作为土壤肥料或土壤调节剂。厌氧堆肥则是在厌氧情况下对厨余垃圾中的有机物进行降解。目前普遍应用的是好氧堆肥技术,具有技术成熟、操作简单、二次污染小等优势。

尽管厨余及餐厨垃圾的堆肥处理已是较为完备和成熟的技术,但其过程优化与效率提升仍然是学界广泛关注的问题,2020年这一技术取得了一系列全新的研究进展。张春燕等<sup>[37]</sup>研究了竹炭添加对厨余垃圾好氧堆肥过程的影响,发现竹炭可以增加堆肥高温持续时间,提高有机物的降解率和堆肥产品的腐熟程度。余培斌等<sup>[38]</sup>为解决高温好氧堆肥过程中可用菌剂较少的问题,从完全腐熟的餐厨垃圾有机肥中筛选、富集培养和分离纯化了对淀粉、纤维素、蛋白质及油脂具有更强分解能力的菌株,制作成复合菌剂,发现该复合菌剂能明显缩短堆肥周期(约40%),而且将餐厨垃圾降解率提高了31%。Chen等<sup>[39]</sup>将餐厨垃圾与污水污泥进行协同好氧堆肥,研究了抗生素对水解酶活性和微生物群落的影响,发现5 mg/kg的抗生素会降低纤维素酶的活性,增加脂肪酶和蛋白酶的活性,pH和温度是影响微生物群落演替的最重要因素,其次是餐厨垃圾和污泥的共同堆肥过程中的总氮和水分含量(图4<sup>[39]</sup>)。

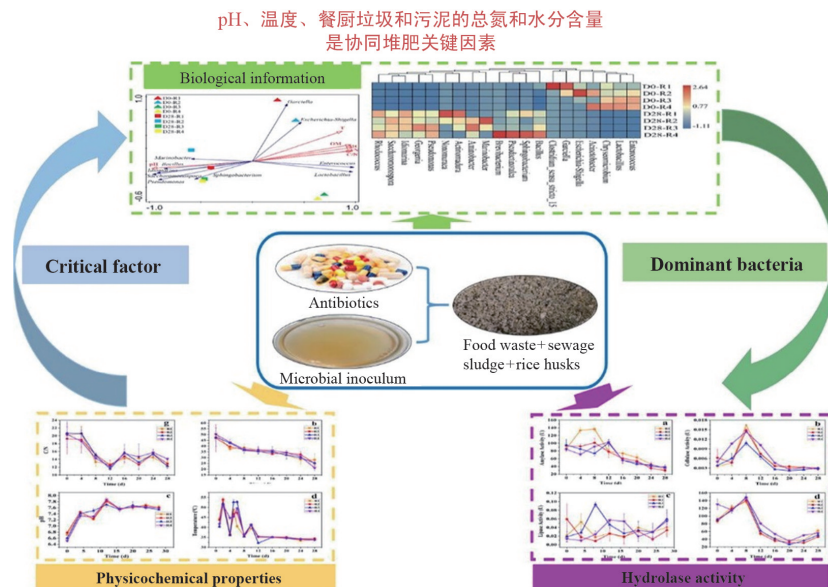


图4 餐厨垃圾与污泥协同好氧堆肥

好氧堆肥处理技术已有较为成熟的应用。以北京市为例,海淀区餐厨厨余垃圾处理厂采用好氧制肥工艺结合浆液厌氧发酵工艺处理系统,其技术路线如图5<sup>[40]</sup>所示,主工艺为有机废物生物强化腐殖化和控氧制肥,将餐厨垃圾固相中的营养成分快速降解为生物腐植酸,辅助工艺采用高浓度有机液相厌氧发酵,产生沼气可供锅炉燃烧回用于工艺用热,实现沼气的自身循环利用<sup>[40]</sup>。朝阳区高安屯

餐厨垃圾处理厂设计餐厨垃圾处理规模400 t/d,采用高温好氧发酵处理工艺,得到有机肥料及饲料终产品。大兴区瀛海镇南宫堆肥厂采用好氧式高温堆肥发酵技术,依靠微生物发酵,将有机物降解为 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{NH}_3$ ,或对其进行半腐殖化处理。原设计处理能力为每天400 t,经过2008年、2009年和2014年3次工艺改进,处理能力已经提升至每天2000 t以上。

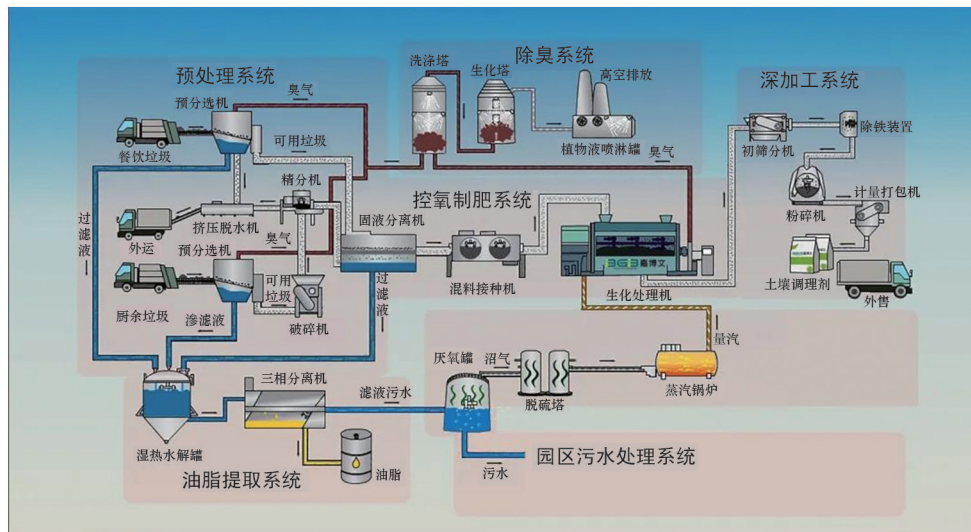


图5 海淀区餐厨厨余垃圾处理厂工艺流程

目前堆肥处理技术存在的问题是预处理过程相对复杂、占地较大、处理周期较长。此外,堆肥技术受垃圾成分的制约很大,厨余垃圾需要经过脱水或与园林、农业废物等混合后才适合进行好氧堆肥处理。在堆肥过程中还容易产生臭气及有机质含量较高的渗滤液,垃圾无害化程度有限,需要进一步通过调整微生物群落、生物除臭塔除臭等方式来减小环境危害。

### 3.3 生物干化技术

生物干化技术是一种由堆肥技术发展而来的垃圾预处理技术,其核心为2大过程:一是利用好氧微生物生命活动释放的热量将水分汽化,二是通过通风对流的方式将水分带出。该技术可在不消耗外源热能的情况下提高垃圾低位热值、稳定部分有机物,且持续时间较短,利于降低含水率和垃圾减量,为后续进一步处理打下基础。自国内推行垃

圾分类政策以来,厨余垃圾量大幅增长,由于其有机物含量较高,利于好氧微生物生长,因此生物干化技术展示出较大潜力,许多学者对此进行了大量研究。生物干化设备、物料配比及性质、运行工艺参数成为该项技术的几大焦点。

大连泰达环保有限公司<sup>[41]</sup>对生物干化反应器进行改进,强化了物料混匀、物料粉碎以及生物反应的效果;清华大学蒋建国等针对传统生物干化技术所存在的降解效率低、发酵周期过长,资源化利用率较低且成本高的问题,发明了一种辅热强化厨余垃圾快速生物干化技术,通过分段式反应设计和嗜热菌的添加快速去除水分,含水率可在24 h内从80%降低到30%,减量化率达到70%以上;北京大学张智焯等<sup>[42]</sup>对添加辅料对厨余垃圾生物干化的影响进行了研究,结果表明添加不同辅料对厨余垃圾生物干化过程中挥发性固体降解率产生影响,

且降解主要的贡献组分也不同。添加辅料对生物干化过程后厨余垃圾的燃烧特性也有所提高;国家电投集团远达环保工程有限公司<sup>[43]</sup>则对厨余垃圾的燃烧特性进行了研究,结果表明厨余垃圾燃烧反应可分为低温段、主要反应阶段和高温阶段,并对主要燃烧阶段成功采用一级反应进行了拟合;清华大学向虹霖等<sup>[44]</sup>研究了工艺运行参数对于厨余垃圾生物干化的影响,结果表明通风量较高时能够更快提高水的去除量,但通风量增大会加大热量损

失,微生物降解产生的热量难以支持水分蒸发所需的热量,将导致反应无法保持高温状态;北海道大学 Ham 等<sup>[45]</sup>发现基质中有机物含量对生物干化的影响也出现了和通风量相似的趋势:基质中有机物含量较高利于微生物的生命活动,但含量进一步增加会导致微生物代谢过程中产生较多水分,不利于生物干化效果;因此,在实际工程应用中需要持续监控运行条件和基质性质变化,以保证更好的生物干化效果。图6对比了2种生物干化设备工艺<sup>[41,46]</sup>。

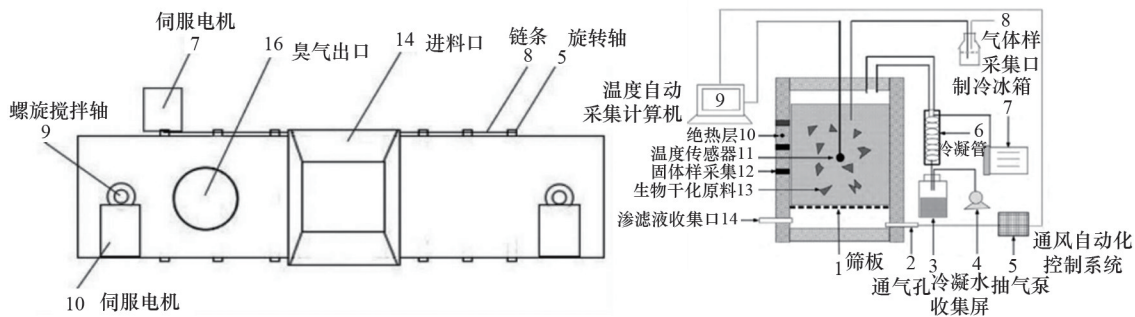


图6 两种生物干化设备

生物干化技术处理后的厨余垃圾实现了减量化且大幅降低含水率,其再利用的范围被大大拓宽,制备垃圾衍生燃料、二次发酵制备肥料、作土壤改良剂等资源化途径被广泛研究。江苏维尔利公司联合清华大学<sup>[47]</sup>采用机械生化处理技术(EMBT, eco-mechanical biological treatment)对厨余垃圾进行处理。项目占地约5000 m<sup>2</sup>,平均垃圾处理成本约140元/t,由此制备出包括生物水解系统固相物料、生物干化后高热值物料和机械预处理分选出的高热值塑料、织物3种垃圾衍生燃料(RDF)。该项目工艺流程图和干化设备如图7、图8所示。

生物干化技术还存在一些问题亟待解决:(1)厨余垃圾含水量较高,采用传统生物干化通风方式难以保证通风效果,因此需进一步开发相应设备,优化工艺参数;(2)厨余垃圾不均匀,导致其垃圾衍生燃料的力学性质、燃烧特性不稳定等;(3)随着垃圾分类政策的推进,厨余垃圾量将大量增长,如何尽量减小其占地面积、缩短其作用时间并且提高其减量效果成为重中之重。

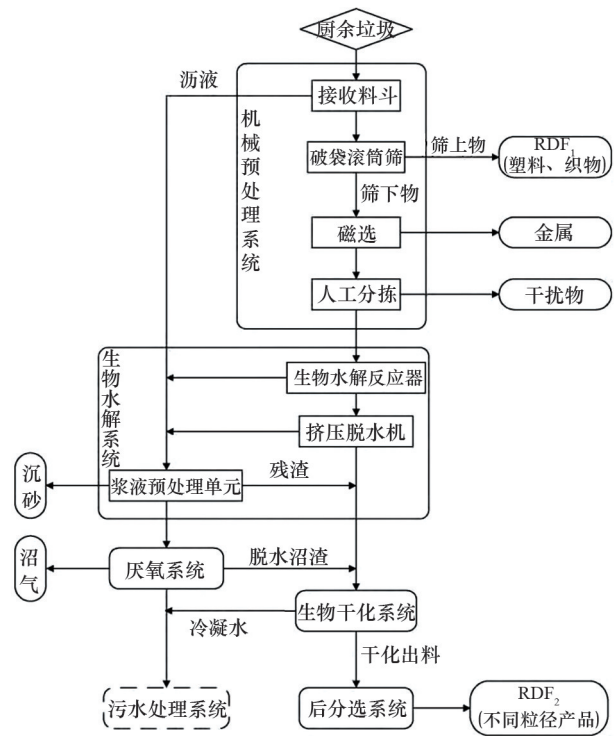


图7 某EMBT项目工艺流程

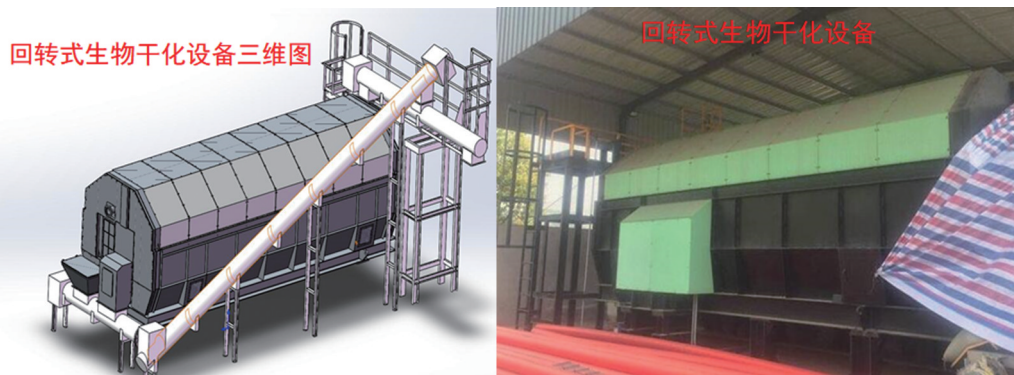


图8 某EMBT项目生物干化设备

### 3.4 腐生生物养殖处理技术

蝇、虹、蚯蚓、蟑螂等体内含有蛋白酶、淀粉酶等多种消化酶,利用这些腐生动物对厨余垃圾中的有机物进行分解并实现稳定化处理,产生的虫体富

含脂肪和蛋白以及动物生长必需营养元素,可以作为动物饲料来源。同时,代谢废物也可作为肥料改善土壤状况(图9)。

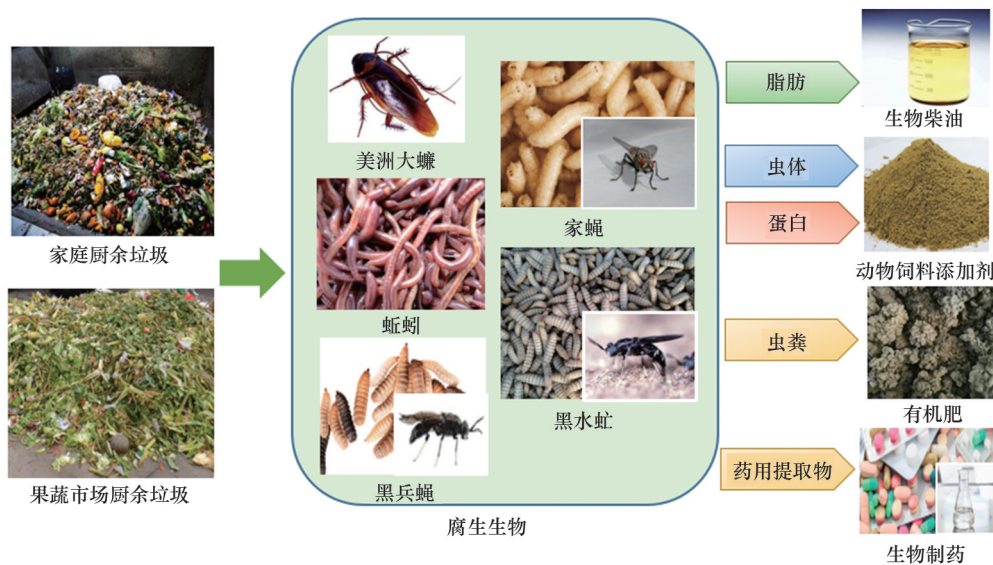


图9 腐生生物处理厨余垃圾与资源化利用

#### 3.4.1 美洲大蠊养殖技术

美洲大蠊俗称蟑螂,在全球分布极广,体蛋白质含量高达70%,虫体和卵荚可做高蛋白饲料,对动物有促消化、增强免疫的效果。近年来,美洲大蠊机体成分进行生物制药逐渐成为研究热点。利用美洲大蠊生命力顽强、腐食性的特点可将其作为分解厨余垃圾的工具,通过高密度的养殖处理厨余垃圾,可实现无害化与减量化<sup>[48]</sup>。山东济南某蟑螂养殖场,目前养殖规模为10亿只,每日可消耗50 t

厨余垃圾。蟑螂虫体可作为畜禽饲料的蛋白质来源,也可以作为鱼饲料。同时蟑螂粪便收集之后可以作为有机肥用于农业生产。每吨处理费用政府补贴208元,年生产蛋白饲料约1200 t,固定资产投资约为30万/t,目前蛋白饲料市场价约3200元/t,收益可观。

#### 3.4.2 蝇蛆养殖技术

蝇蛆(家蝇的幼虫)可提炼出抗菌活性蛋白和复合氨基酸,是极具开发潜力的新型的蛋白类免疫

增强剂。风干蝇蛆的粗蛋白质含量可达60%左右,氨基酸总量占干物质总量的50%以上,必需氨基酸占总氨基酸含量的43%以上,可作为一种高质量的动物性蛋白质资源,在畜禽和水产养殖中具有广阔应用前景。从蝇蛆中提取抗菌肽、几丁质以及蛆油物质也成为新的研究热点<sup>[49]</sup>。Niu<sup>[50]</sup>等利用蝇蛆处理厨余垃圾,发现在适当的培养条件下1.5 g家蝇卵在4 d内便可处理700 g厨余垃圾,家蝇卵和厨余垃圾的质量比约为1/467,厨余垃圾消耗量约为43%。减量处理后的残渣可作为优质的有机肥,得到的干蛆质量达到53.08 g,其中蛋白质含量达57%左右,油脂含量达15%左右。蝇蛆的蛋白具有药用价值,可用于医药生产和动物饲料生产,油脂部分经转化后可得到生物柴油,产率约为87%。

#### 3.4.3 蚯蚓处理技术

蚯蚓的主要化学成分为蛋白质、脂肪、糖类,可以作为动物的饲料。蚯蚓又称为“地龙”,中医认为其具有药用价值,其体内的提取物在抗氧化、抗菌消炎以及促进创伤修复方面有独特的效果。蚯蚓粪富含大量的微生物及有机物,病原微生物少,现已被广泛应用于农业生产、花卉培养和土壤改良中。在家庭阳台或庭院利用蚯蚓对餐厨垃圾进行分散式的处理已有很多报道。蚯蚓每天可以处理等同于自身重量的厨余垃圾同时可以排出大约1~2倍重量的蚯蚓粪。有报道称“1 kg蚯蚓大约有2000只,每天可以吃掉大约1 kg厨余垃圾,相当于一个3口之家每天产生的厨余垃圾的数量。”Hussain利用蚯蚓对厨余垃圾和秸秆的混合物进行堆肥,经过45 d处理后,堆肥产物的养分含量显著提高,各项理化性质和营养状况均优于原始厨余垃圾,同时发现,厨余垃圾和水稻秸秆的最佳质量比为2:3,厨余垃圾过多会对蚯蚓生长具有负面影响<sup>[51]</sup>。

#### 3.4.4 黑水虻幼虫处理技术

黑水虻幼虫取食范围非常广泛,其幼虫具有腐生性,能够转化处理包括人畜粪便、食物残渣、市政有机废弃物。黑水虻幼虫的营养价值高,干重高达42%左右,干物质中的粗蛋白质含量高达32%~

52%,与豆粕的蛋白含量相近,粗脂肪含量高达31%~38%,同时富含支持动植物生长必需元素以及粗纤维、月桂酸、抗菌物质和甲壳素等物质。黑水虻幼虫干燥粉碎后可替代鱼粉喂养家禽、鱼等经济动物(粟颖)。黑水虻处理厨余垃圾工艺的资源化程度高,广东某黑水虻处理基地10 t的厨余垃圾可生产2 t的幼虫和1 t的虫粪,只剩4%~5%的剩余物,均是混杂在厨余垃圾中的塑料、木竹等无法采食的物质。该项目建设费用约为10万~35万元/t,运营费用约为90元/t。远低于主流厌氧消化项目的建设费用(40万~52万元/t)及运营费用(270~300元/t)。烘干后的黑水虻幼虫和虫粪目前市场价分别为6000元/t和500元/t<sup>[52]</sup>。

#### 3.4.5 黑兵蝇幼虫处理技术

黑兵蝇是一种常见的热带和亚热带昆虫,对不同的环境条件具有很强的适应性,其幼虫一方面可以同化水果蔬菜以及动物粪便等有机废料,另一方面通过黑兵蝇收获生物质中含有脂类、蛋白质和必需营养元素<sup>[53]</sup>。黑兵蝇体内的饱和脂肪含量高达67%,远高于大豆饱和脂肪含量的11%和棕榈油饱和脂肪含量的37%<sup>[54]</sup>,目前已有大量关于黑兵蝇幼虫制备生物燃油工艺的研究<sup>[55]</sup>。

利用腐生动物安全高效地处理厨余垃圾目前还存在一些技术问题:昆虫饲料的成分难以保持一致性,厨余垃圾的水分含量、营养成分、微生物安全性以及有机污染物等关键参数均是需要考虑的问题<sup>[56]</sup>;昆虫培养条件的适宜技术参数需要进一步探索,例如黑水虻人工养殖对养殖温度要求均较高,从而限制了其在低气温地区的发展,人工养殖黑水虻存在黑水虻幼虫过小、黑水虻蛹羽化率低等问题<sup>[57]</sup>;腐生动物养殖技术稳定性、产品风险以及技术标准的建立均是需要进一步克服的技术问题。

#### 3.5 物理预处理技术

通过物理机械手段对厨余垃圾进行预处理,有助于厨余垃圾更高效地实现减量化和资源化。目前国内外研究和推广较多的物理预处理技术主要包括粉碎直排和机械压榨。厨余垃圾经过物理手段预处理后的粒度变细可实现固体和浆体液的高

效分离,可通过家庭下水排放进入污水处理系统,或通过制成垃圾衍生燃料、堆肥以及厌氧发酵等技术进一步开发利用。

### 3.5.1 粉碎直排技术

粉碎直排是指在厨房下水口安装粉碎装置,将厨余垃圾粉碎后直接排放到下水道,随后进入市政污水处理系统。目前,全球超过90个国家使用厨余垃圾粉碎机。其中,美国、新西兰和澳大利亚分别有94%、30%和20%的城市使用了厨余垃圾破碎机。在美国平均50%美国家庭安装了厨余垃圾粉碎机,有80%的新建住房将厨房垃圾粉碎机作为标准配件。粉碎直排技术将厨余垃圾从固废处理系统转入污水处理系统,有利于污水处理厂通过厌氧消化回收能源物质。同时减少了至少1/3的生活垃圾,降低了清运次数和垃圾处理负荷,进而节省了垃圾处理费用,降低了垃圾填埋场 $\text{CH}_4$ 的排放量<sup>[58]</sup>。Zan等<sup>[59]</sup>评估了厨余垃圾粉碎直排技术对相关污水处理厂污水处理网络的影响,发现厨余垃圾处理器的使用对生活污水处理厂的处理能力和水质影响有限,厨余垃圾粉碎直排系统有利于城市废物管理。

粉碎直排技术在中国的推广存在以下问题:粉碎设备成本较高,在收入较低的家庭推广难度较大;粉碎设备处理能力受限,可能造成家庭下水道

堵塞;污水流速过低导致破碎厨余垃圾在污水管网中沉积而产生厌氧发酵、大量产气等问题<sup>[60]</sup>;管网中的厨余垃圾油脂可能会在低温条件下凝固导致管道堵塞;破碎厨余垃圾进入污水厂可能会增加预处理系统负荷和运维难度<sup>[61]</sup>。厨余垃圾粉碎机处理技术只适合厨余垃圾产生源相对分散,产生量少,且住宅设施条件好的场合,现阶段不宜大面积推广应用<sup>[62]</sup>。

### 3.5.2 机械压榨预处理技术

厨余垃圾机械压榨技术通过压榨预处理设备将厨余垃圾中的浆化料挤压,实现了干湿分离的目的。图10展示了中大型压榨预处理和浆化料处理减量站的工作流程。压榨预处理单元是整个工艺技术预处理系统的核心组成部分,通过高压将厨余垃圾快速分类为压榨渣、浆化料两部分产物,能够较好地实现分质分类处理效果,并能够有效提升后续处理效率。机械压榨预处理工艺流程为:板式给料机→多效分级装置→磁选→破碎机→制浆机→一次压榨→二次压榨。具体是将厨余垃圾卸料进入料斗后落入下方的给料机。通过给料机输送进入制浆机,浆料通过重力作用落入粉碎机下方的物料缓冲池。存储在缓冲池中的物料泵送至一次生物压榨机进行第一轮粗压榨。一次压榨后分离出的有机浆液通过重力作用落入压榨机下方的浓浆

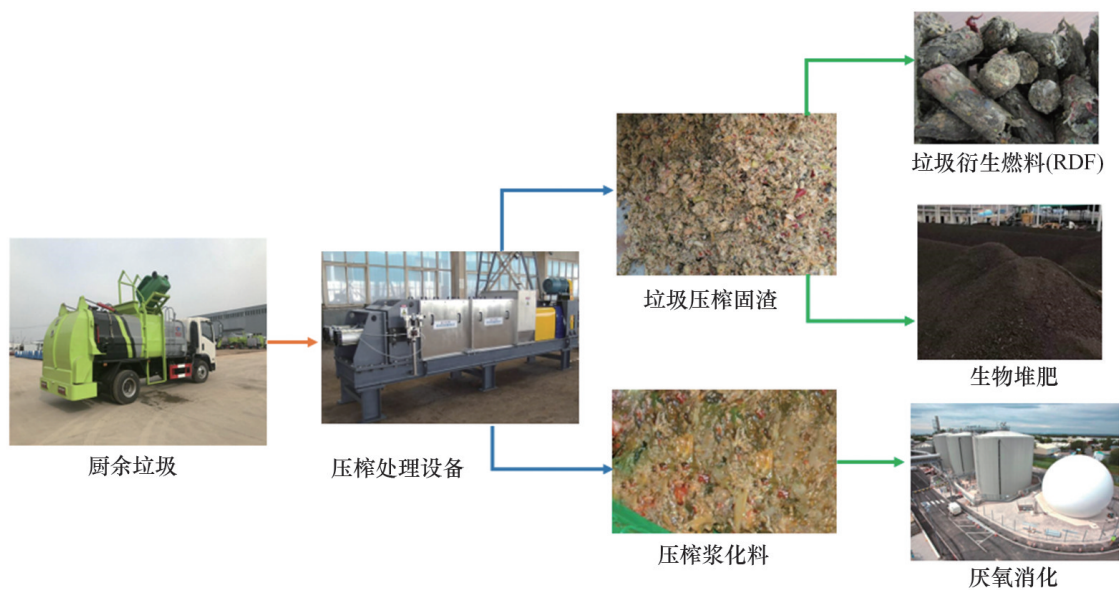


图10 中大型压榨预处理+浆化料处理减量站

池缓存。为了能最大限度地提取有机质,可以将一次压榨后的固体杂质加热后再进行二次压榨,二次压榨后分离出来的液相泵送至浓浆池缓存,剩余的固体杂质直接重力落入二次生物压榨机下方的除渣间。压榨后固体部分(压榨渣)含水率约30%左右,可以进一步制成垃圾衍生燃料或堆肥;浆化料部分含水率约85%~90%,可通过柱塞泵泵送至厌氧消化罐进行厌氧反应,回收能源实现资源化利用<sup>[62]</sup>。

厨余垃圾经过压榨实现固液分离,性状更加稳定,有利于有针对性地提高后续处理效能,“减量化、无害化和资源化”效益显著。同时压榨处理工艺还存在初期投资大、占用一定土地面积、潜在的噪声和臭气污染等问题。

## 4 结论

2020年是中国垃圾分类工作推进开展的关键之年,在生活垃圾强制分类的背景下,大量厨余垃圾的分类收集及其处理处置凸显出的诸多问题亟待解决。本文围绕着垃圾分类政策推进现状、厨余垃圾的产生和处理出路以及厨余垃圾处理技术的研究热点进行了重点回顾,指出了当前垃圾分类政策、厨余垃圾的产生及特征等方面存在的认识偏差,梳理并整合了厨余垃圾处理技术研究热点和相关的工程案例,对2020年中国厨余垃圾处理技术研发和应用及其优劣势进行阐述,相信在中国垃圾分类工作的广泛推进下,能更好地促进厨余垃圾末端处理和资源化设施设备的完善与更新,期待2021年厨余垃圾处理领域能取得更大的突破。

### 参考文献(References)

- [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]. [2020-12-24]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-03/30/content\\_5182124.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-03/30/content_5182124.htm).
- [2] 厦门市市政园林局. 生活垃圾分类工作我市保持全国领先[EB/OL]. [2020-12-21]. [http://szyl.xm.gov.cn/dtxx/bjdt/202012/t20201225\\_2508124.htm](http://szyl.xm.gov.cn/dtxx/bjdt/202012/t20201225_2508124.htm).
- [3] 广州市城市管理和综合执法局. 晒成绩! 2020年广州城管交出高质量“成绩单”坚持以人民为中心推动城市管理高质量发展[EB/OL]. [2020-12-21]. [http://www.gz.gov.cn/xw/zwlb/bmdt/scsghzhzfj/content/mpost\\_7008826.html](http://www.gz.gov.cn/xw/zwlb/bmdt/scsghzhzfj/content/mpost_7008826.html).
- [4] 上海市绿化市容局. 垃圾分类最新“成绩单”出炉 上海始终保持第一[EB/OL]. [2020-12-21]. <http://www.shanghai.gov.cn/nw31406/20201231/7c891ffaf74e4b158c7654aa753b1ba3.html>.
- [5] 鲁网. 青岛市城市生活垃圾分类现场观摩会在城阳区召开[EB/OL]. [2020-12-21]. [http://qingdao.sdnews.com.cn/qdgd/202011/t20201105\\_2817841.htm](http://qingdao.sdnews.com.cn/qdgd/202011/t20201105_2817841.htm).
- [6] 北京日报. 生活垃圾管理条例实施8个月 家庭厨余垃圾分出量增长12.7倍[EB/OL]. [2020-12-21]. [http://www.beijing.gov.cn/ywdt/gzdt/202101/t20210106\\_2198985.html](http://www.beijing.gov.cn/ywdt/gzdt/202101/t20210106_2198985.html).
- [7] 苏州市城市管理局. 《苏州市生活垃圾分类管理条例》实施半年工作情况[EB/OL]. [2020-12-21]. <http://www.suzhou.gov.cn/szsrnzf/wsyjcl/202012/b7ad8428a7c44ef4b59d1a7ed1b53727.shtml>.
- [8] 深圳特区报. 《深圳市生活垃圾分类管理条例》实施100天 垃圾分流分类实效大幅提升[EB/OL]. [2020-12-23]. [http://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxgj/zwdt/content/post\\_8340547.html](http://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxgj/zwdt/content/post_8340547.html).
- [9] 北京日报. 生活垃圾管理条例实施8个月 家庭厨余垃圾分出量增长12.7倍[EB/OL]. [2020-12-23]. [http://www.beijing.gov.cn/ywdt/gzdt/202101/t20210106\\_2198985.html](http://www.beijing.gov.cn/ywdt/gzdt/202101/t20210106_2198985.html).
- [10] 央广网. 上海今年1-11月垃圾分类成效显著 有害垃圾分出量增加3.3倍[EB/OL]. [2020-12-23]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685698973759687018&wfr=spider&for=pc>.
- [11] 深圳商报. 直击深圳垃圾分类实施百日: 家庭厨余垃圾回收量升幅250%[EB/OL]. [2020-12-23]. <https://new.qq.com/rain/a/20201209A0HBC600>.
- [12] 奚慧. 上海市生活垃圾全程分类体系建设现状分析及对策建议[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(3): 80-85.
- [13] 韦建华, 杨远福. 浅谈厨余垃圾处理现状及对策建议——以广西壮族自治区为例[J]. 环境教育, 2020(5): 28-31.
- [14] 赵国莲. 城市生活垃圾分类收集处理的现状及对策[J]. 环境与发展, 2020, 32(10): 32-33, 35.
- [15] 国家统计局. 年度数据[EB/OL]. [2020-12-23]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.

- [16] 王天荣, 黄浩雯, 朱春妮, 等. 天津市垃圾分类现状调研及改进建议[J]. 经营与管理, 2020(8): 100-104.
- [17] 中国产业信息网. 2018年中国厨余垃圾产生量达10800万吨, 厨余垃圾处理器前景广阔[EB/OL]. [2020-12-23]. <https://www.chyxx.com/industry/201907/754371.html>.
- [18] 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.
- [19] 韦彩嫩. 广州市家庭厨余垃圾投放模式对生活垃圾分类推进影响研究[J]. 绿色科技, 2020(16): 24-25, 32.
- [20] 黄召亮, 乔杰, 万志刚. 生活垃圾分类机制下餐厨垃圾处置模式的发展趋势及短流程处置工艺探索[J]. 东方电气评论, 2020, 34(4): 84-88.
- [21] 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.
- [22] 刘伊, 彭灿, 吴然, 等. 厨余垃圾高温湿热水解预处理条件优化[J]. 绿色科技, 2018, 4: 74-77.
- [23] Zhen X F, Zhang X Y, Li S B, et al. Effect of micro-oxygen pretreatment on gas production characteristics of anaerobic digestion of kitchen waste[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2020, 22: 1852-1858.
- [24] 徐一雯, 蒋建国, 刘诺, 等. 预处理对厨余垃圾等有机废弃物联合厌氧发酵的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(7): 558-566.
- [25] 刘伊, 彭灿, 吴然, 等. 厨余垃圾高温湿热水解预处理条件优化[J]. 绿色科技, 2018, 4: 74-77.
- [26] Zhen X F, Zhang X Y, Li S B, et al. Effect of micro-oxygen pretreatment on gas production characteristics of anaerobic digestion of kitchen waste[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2020, 22: 1852-1858.
- [27] 徐一雯, 蒋建国, 刘诺, 等. 预处理对厨余垃圾等有机废弃物联合厌氧发酵的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(7): 558-566.
- [28] Li P C, Liu Z Y, Zhao M X, et al. Evaluation of biogas performance and process stability from food, kitchen, and fruit/vegetable waste by mono-, co-, and tridigestion[J]. Energy & Fuels, 2020, 34: 12734-12742.
- [29] Xing B S, Cao S F, Han Y L, et al. Stable and high-rate anaerobic co-digestion of food waste and cow manure: Optimisation of start-up conditions[J]. Bioresource Technology, 2020, 307: 123195.
- [30] Varsha S S V, Soomro A F, Baig Z T, et al. Methane production from anaerobic mono- and co-digestion of kitchen waste and sewage sludge: synergy study on cumulative methane production and biodegradability[J/OL]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2020, <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-020-00884-x>.
- [31] 任媛媛, 宋娜, 于森, 等. 厨余垃圾厌氧消化国际研究趋势的文献计量分析[J]. 环境卫生工程, 2020, 28(6): 36-42.
- [32] 徐立, 董蕾, 华建敏, 等. 国内厨余垃圾厌氧消化工艺的应用[J]. 环境保护与循环经济, 2020, 40(11): 33-37.
- [33] 上海市政总院中标上海老港湿垃圾资源化处理设施工程[EB/OL]. [2020-12-27]. <http://www.membranes.com.cn/xingyedongtai/gongyexinwen/2018-09-12/34131.html>.
- [34] 安晓霞, 金文涛. 杭州天子岭厨余垃圾处理工程实例分析[J]. 绿色科技, 2019, 8: 125-128.
- [35] 嘉定区湿垃圾资源化处理项目启动建设[EB/OL]. [2020-12-23]. [http://www.jiading.gov.cn/zwpd/zwdt/content\\_609260](http://www.jiading.gov.cn/zwpd/zwdt/content_609260).
- [36] 赵佳奇, 范晓丹, 邱春生, 等. 厨余垃圾厌氧消化处理难点及调控策略分析[J]. 环境工程, 2020, 1: 1-7.
- [37] 张春燕, 张玉茹, 魏锦锦, 等. 竹炭添加对厨余垃圾好氧堆肥过程的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(3): 656-660.
- [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): 199-205.
- [39] Chen Z, Li Y, Peng Y, et al. Effects of antibiotics on hydrolase activity and structure of microbial community during aerobic co-composting of food waste with sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2020, 321: 124506.
- [40] E20水网固废网. 北京垃圾分类厨余垃圾如何处理? 12月19日带您参观海淀区嘉博文餐厨厨余项目[EB/OL]. [2020-12-20]. <https://mp.weixin.qq.com/s/n20GW-om2TplJMiO5jqpHg>.
- [41] 徐杰, 唐军, 殷凤超, 等. 一种新型餐厨垃圾生物干化反应器的设计[J]. 资源节约与环保, 2014(5): 124.
- [42] 张智焯, 袁京, 王国英, 等. 辅料添加对厨余垃圾生物干化产品燃烧热特性的影响[J]. 环境工程学报, 2020, 14(5): 1365-1375.

- [43] 赵学, 何登科, 王里奥. 厨余垃圾燃烧特性研究[J]. 四川环境, 2019, 38(4): 152-155.
- [44] 向虹霖, 蒋建国, 高语晨, 等. 通风量对有机废弃物生物干化的影响[J]. 环境工程, 2020, 38(2): 128-134.
- [45] Ham G Y, Lee D H, Matsuto T, et al. Simultaneous effects of airflow and temperature increase on water removal in bio-drying[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2020, 22(4): 1056-1066.
- [46] 袁京, 张地方, 李赞, 等. 外加碳源对厨余垃圾生物干化效果的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 628-635.
- [47] 赵爽, 褚祺, 李文昱, 等. 一种厨余垃圾的机械生化处理技术的工程应用[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 143-147.
- [48] 杜峰涛, 任朋朋, 王荣宇, 等. 美洲大蠊人工养殖及经济价值的研究进展[J]. 养殖技术顾问, 2019, 3: 14-16, 21.
- [49] 蒋亮, 何俊. 蝇蛆及其提取物在动物生产中的应用[J]. 家畜生态学报, 2020, 41(5): 71-77.
- [50] Niu Y, Zheng D, Yao B, et al. A novel bioconversion for value-added products from food waste using *Musca domestica*[J]. *Waste Manag.* 2017, 61: 455-460.
- [51] Hussain N, Das S, Goswami L, et al. Intensification of vermiculture for kitchen vegetable waste and paddy straw employing earthworm consortium: Assessment of maturity time, microbial community structure, and economic benefit[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 414-426.
- [52] 汤云榕, 赵庆良, 王维业, 等. 高含固厨余垃圾垂直流厌氧处理系统的构建与启动[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10): 3629-3638.
- [53] Raksasat R, Lim J W, Kiatkittipong W, et al. A review of organic waste enrichment for inducing palatability of black soldier fly larvae: Wastes to valuable resources[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267: 115488.
- [54] Hasnol S, Kiatkittipong K, Kiatkittipong W, et al. A review on insights for green production of unconventional protein and energy sources derived from the larval biomass of black soldier fly[J]. *Processes*, 2020, 8(5): 523.
- [55] Wong C Y, Rosli S S, Uemura Y, et al. Potential protein and biodiesel sources from black soldier fly larvae: insights of larval harvesting instar and fermented feeding medium[J]. *Energies*, 2019, 12(8): 1570.
- [56] Ojha S, Bussler S, Schluter O K. Food waste valorisation and circular economy concepts in insect production and processing[J]. *Waste Manag.* 2020, 118: 600-609.
- [57] Tomberlin J K, Sheppard D C. Factors influencing mating and oviposition of black soldier flies (Diptera: Stratiomyidae) in a colony[J]. *Journal of entomological Science*, 2020, 37(4), 345-352.
- [58] 吴远远, Giwa Abdulmoseen Segun, 郑明霞, 等. 基于破碎处理的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.
- [59] Zan F, 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, 184:116155.
- [60] Zan F, Dai J, Jiang F, et al. Ground food waste discharge to sewer enhances methane gas emission: A lab-scale investigation[J]. *Water Research*, 2020, 174: 115616.
- [61] 李鹏峰, 隋克俭, 李家驹, 等. 破碎厨余垃圾进入市政污水管网的若干问题[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 35-39.
- [62] 邓兵. 基于干湿分离预处理的厨余垃圾处理模式研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

## Review of hotspots of kitchen waste treatment in context of garbage classification in China in 2020

JIANG Jianguo<sup>1</sup>, GENG Shubiao<sup>2</sup>, LUO Wei<sup>3</sup>, JIANG Yanhang<sup>4</sup>, GAO Yuchen<sup>1</sup>, CHEN Zhehong<sup>2</sup>, YANG Guodong<sup>4</sup>, LAN Tian<sup>1</sup>, MENG Yuan<sup>1</sup>, JU Tongyao<sup>1</sup>, HAN Siyu<sup>1</sup>, SHEN Pengfei<sup>2</sup>, XIANG Honglin<sup>1</sup>

1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China
2. China Tiegong Investment & Construction Group Co., Ltd, Beijing 101300, China
3. Urban Administration and Enforcement Bureau of Shenzhen Bao'an District, Shenzhen 518101, China
4. City Appearance and Environment Management & Service Center of Shenzhen Bao'an District, Shenzhen 518101, China

**Abstract** As China is advancing the cause of garbage classification, many problems have emerged in the process of kitchen waste classification, collection, treatment and disposal. This article introduces the current implementation of China's garbage classification policy as well as the generation and treatment of kitchen waste. Several research advances made in 2020 on kitchen waste treatment technologies are reviewed, such as anaerobic digestion, composting, bio-drying, scavenger breeding and physical pretreatment. At the same time, the article also compiles the research hotspots and engineering cases related to food waste treatment to attempt to provide guidance for further technology development and application in waste treatment.

**Keywords** garbage classification; kitchen waste; reduction; recycling ●



(责任编辑 祝叶华)