

# 中国厨余垃圾处理技术及资源化方案选择

靳晨曦<sup>1</sup>, 孙士强<sup>1</sup>, 盛维杰<sup>1</sup>, 杨殿海<sup>1</sup>, 马亚东<sup>2</sup>, 贺文智<sup>1</sup>, 李光明<sup>1\*</sup> (1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海壹柯环境科技有限公司, 上海 200062)

**摘要:** 介绍了中国厨余垃圾的产量及特征, 分析了厨余垃圾粉碎直排、填埋、焚烧、饲料、昆虫养殖、堆肥、转换能源和高值化利用处理技术的现状及优缺点, 表明厨余垃圾资源化处理是未来的发展趋势, 其中饲料化应是未来值得提倡的资源化技术之一。此外, 对比了厌氧消化和好氧堆肥两大主流资源化模式的特点, 厌氧消化和好氧堆肥分别适用于集中大规模处理和分散式、中小规模、源头减量处理的应用场景。最后, 提出了适合中国厨余垃圾资源化的废弃油脂炼制生物柴油+厌氧消化产甲烷+沼渣好氧堆肥组合工艺方案, 为厨余垃圾的高效资源化处理提供一定参考。

**关键词:** 厨余垃圾; 废物处理; 资源利用; 厌氧消化; 堆肥

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)03-1240-12

**Food waste treatment technology and resource solution options in China.** JIN Chen-xi<sup>1</sup>, SUN Shi-qiang<sup>1</sup>, SHENG Wei-jie<sup>1</sup>, YANG Dian-hai<sup>1</sup>, MA Ya-dong<sup>2</sup>, HE Wen-zhi<sup>1</sup>, LI Guang-ming<sup>1\*</sup> (1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Ecoacell Environment Technology Co., Ltd., Shanghai 200062, China). *China Environmental Science*, 2022, 42(3): 1240~1251

**Abstract:** This paper introduced the production and characteristics of food waste in China, and the current status, advantages and disadvantages of food waste treatment technologies including crushing and direct discharge, landfill, incineration, feed, insect farming, composting, energy conversion and high value utilization were analyzed. It was shown that the resource treatment of food waste was the future development trend, among which the feed method should be one of the resource treatment technologies to be promoted in the future. Besides, the characteristics of the two mainstream resource recovery modes, anaerobic digestion and composting, were compared. Anaerobic digestion and composting were suitable for centralised large scale treatment and decentralised, small to medium scale, source reduction treatment scenarios respectively. Finally, a combined technology solution of biodiesel from waste oil + methane production from anaerobic digestion + composting of digestate was proposed, which was suitable for the recycling of food waste in China, and provided some reference for the efficient resource treatment of food waste.

**Key words:** food waste; waste treatment; resource utilization; anaerobic digestion; composting

厨余垃圾是城市生活垃圾的一种, 是居民社区、食品生产加工和餐饮业在生活或生产过程中所产生的有机废弃物<sup>[1]</sup>。根据 2019 年 12 月中国住建部发布的《生活垃圾分类标志》规定, 垃圾分类产生的湿垃圾、餐厨垃圾或厨余垃圾被统一称为厨余垃圾, 其包括家庭厨余垃圾、餐厨垃圾和其他厨余垃圾(农贸市场等)<sup>[2]</sup>。根据联合国粮食及农业组织(FAO)统计, 全球约有 1/3 的食物被浪费在生产、流通和消费过程中, 其中大部分都被当做厨余垃圾处理, 每年的废物产生量高达 13 亿 t<sup>[3]</sup>。世界厨余垃圾的产量连年增长, 有学者预测从 2005~2025 年, 全球厨余垃圾产量将会增加 44%<sup>[4]</sup>, 其中中国厨余垃圾的产量位居世界首位<sup>[5]</sup>。2009~2019 年中国城市生活垃圾和厨余垃圾产量连年增长, 2019 年中国城市生活垃圾和厨余垃圾产量分别为 2.42<sup>[6]</sup>和 1.21 亿 t/a<sup>[5]</sup>, 并且厨余垃圾在城市生活垃圾中占比高达 50%~60%<sup>[7]</sup>。2019 年

5 月, 中国开始在 16 个城市开展“无废城市”试点建设工作<sup>[8]</sup>, 厨余垃圾的资源化和无害化越来越被重视。2019 年中国大力推行垃圾分类政策之后, 中国厨余垃圾的分出量急剧增加<sup>[9]</sup>。2020 年 6 月, 上海湿垃圾分出量达到 9632.1t/d, 同比增加 38.50%<sup>[10]</sup>。因此, 中国厨余垃圾急需适宜的无害化、资源化和规模化处理技术。

厨余垃圾具有含水率高、有机质高、含盐量高、含油量高和易腐烂等特点<sup>[11]</sup>, 若处理不及时则易产生恶臭, 并会滋生病原体微生物<sup>[12]</sup>, 引发环境污染问题。中国厨余垃圾的组分构成、营养成分和元素组成特征如表 1 所示。中国厨余垃圾主要由蔬菜、果皮、食物残渣、碎骨、蛋壳、贝类、果壳和果核等组成,

收稿日期: 2021-08-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1906000)

\* 责任作者, 教授, ligm@tongji.edu.cn

其含水量高达 74.94%~87.07%,且含有大量糖类、蛋白质、脂质等有机物,具有较好的可生化降解性.中国厨余垃圾较高的 N 含量导致其 C/N 较低(10~20),若采用生物法处理厨余垃圾,则需考虑将厨余垃圾与其他高 C/N 的有机废弃物进行协同处理<sup>[13]</sup>.此外,中国独特丰富的饮食习惯导致中国厨余垃圾具有高脂质(17.02%~31.80%)、高盐分(0.50%~5.00%)和高辣椒素(0%~2.50%)的特点.因此,在中国厨余垃圾的资源化处理过程中,应考虑高油、高盐和高辣椒素的影响<sup>[14]</sup>.

目前,厨余垃圾通常与城市生活垃圾一起进行垃圾填埋和焚烧处置,随之带来垃圾渗滤液污染、二噁英和温室气体排放等二次污染问题<sup>[15]</sup>.世界上越来越多的国家开始禁止厨余垃圾进入垃圾填埋场,

并将厨余垃圾从生活垃圾中分出,进而提高干垃圾焚烧发电的效率<sup>[5]</sup>.厨余垃圾具有较高的回收利用价值,其资源化回收逐渐成为最受欢迎的处理模式.

中国实行垃圾分类管理政策后,厨余垃圾的分出量剧增,从而导致中国厨余垃圾处理能力不足.目前,中国急需扩充厨余垃圾处理能力,同时也面临不同处理技术的选择问题.因此,有必要对中国厨余垃圾处理技术的现状和适用性进行详细回顾,并对适宜的资源化处理技术进行对比分析,进而指导中国厨余垃圾资源化方案的选择.本文分析了中国厨余垃圾处理技术的现状及优缺点,对比了厌氧消化和好氧堆肥两大主流资源化技术的特点,并明确了其应用场景,最后提出了适合中国厨余垃圾资源化的组合技术方案,为厨余垃圾的高效资源化处理提供一定参考.

表 1 中国厨余垃圾的特征

Table 1 Characteristics of food waste in China

| 组分构成 <sup>①</sup> (wt%) <sup>[16-19]</sup> |             | 营养成分(wt%) <sup>[20-26]</sup> |             | 元素组成 <sup>②</sup> (wt%) <sup>[15, 27-29]</sup> |             |
|--|-------------|------------------------------|-------------|--|-------------|
| 蔬菜   | 25.00~62.40 | 水分 <sup>①</sup>              | 74.94~87.07 | C  | 42.05~47.67 |
| 果皮   | 10.30~32.92 | 总固体物 <sup>①</sup>            | 12.93~25.06 | H  | 5.25~5.94   |
| 食物残渣                                       | 10.40~37.12 | 挥发性固体物 <sup>②</sup>          | 87.47~92.88 | O  | 30.22~34.87 |
| 碎骨、蛋壳、贝类等                                  | 4.51~9.61   | 糖类 <sup>②</sup>              | 35.47~38.63 | N  | 1.91~3.89   |
| 果壳、果核                                      | 3.80~5.50   | 蛋白质 <sup>②</sup>             | 14.42~16.46 | S  | 0.15~0.55   |
| 其他   | 0~1.00      | 脂质 <sup>②</sup>              | 17.02~31.80 | Cl   | 0.21        |
|  |             | 纤维素 <sup>②</sup>             | 4.70~9.68   | Ca   | >0.0048     |
|  |             | 盐分 <sup>①</sup>              | 0.50~5.00   | P  | >0.0042     |
|  |             | 辣椒 <sup>①</sup>              | 0~2.50      | K  | >0.0018     |
|  |             |                              |             | C/N  | 10~20       |

注:wt%为重量百分数,<sup>①</sup> 基于湿重,<sup>②</sup> 基于干重.

## 1 厨余垃圾处理技术

### 1.1 粉碎直排

粉碎直排法在欧美家庭厨房有一定的应用,其中粉碎直排设备在美国家庭安装率超过 95%<sup>[30]</sup>.粉碎直排法具有工艺简单、处理成本低等特点,常用于处理少量厨房厨余垃圾,适合人口分散的地区使用.粉碎直排法降低了城市生活垃圾的产量,并给城市市政污水处理增加了有机碳源<sup>[31]</sup>,但该方法会加重城市管网的压力,降低厨余垃圾的资源化率;厨余垃圾中的油脂在下水管道中容易凝结堆积成块,引发管网堵塞;此外,粉碎直排法需用大量水进行冲洗粉碎后的厨余垃圾,造成水资源浪费,其不适合缺水地区的应用.先前我国少量社区也尝试引入了该项处

理技术,但其与我国下水管道管网的匹配度低,若改造下水道管网则会增加高昂的投入成本.虽然粉碎直排法目前不适合中国厨余垃圾的处理,但中国应当鼓励与支持其在部分水资源充分、排水管网适宜和污水处理设施完善的地区进行试点探索.若粉碎直排法的试点应用效果较好,则可在后续的城市管网与污水处理设施的修建与升级改造中,考虑粉碎直排法的排放需求,补充中国厨余垃圾可选择的处理技术.

### 1.2 填埋

填埋法因其成本较低、简单方便,在早期的厨余垃圾处理中应用较多.但厨余垃圾的水分含量较高,厨余垃圾填埋场极易产生大量的垃圾渗滤液,这些垃圾渗滤液后续的处理成本较高,若处理不当则将

会对地下、地表水系造成污染,严重危害生态环境。此外,垃圾填埋场产生的填埋气排放至大气中会加剧全球变暖<sup>[32]</sup>。在中国无填埋气收集措施的生活垃圾填埋场中,温室气体排放量高达 641~998kg CO<sub>2</sub>-eq/t 城市生活垃圾<sup>[33]</sup>,虽然垃圾填埋场填埋气的收集利用越来越多,但其回收成本高、回收不完全等缺点导致越来越多的国家出合法令禁止易腐有机垃圾进入垃圾填埋场。1999年,欧盟出台的垃圾填埋法令明确规定了减少有机垃圾进入垃圾填埋场的三阶段目标,规划到2020年,欧盟进入垃圾填埋场的有机垃圾总量相比1995年减少65%<sup>[34]</sup>,韩国、德国和美国20多个州也开始禁止所有可生物降解废物进入垃圾填埋场<sup>[35-36]</sup>。此外,垃圾填埋场占地面积较大,该方法的初衷是达到垃圾的减量减容化,不能实现厨余垃圾的资源化,所以其不是厨余垃圾合适的处理方式。

### 1.3 焚烧

焚烧法主要有两种处理方式:第一种是直接将厨余垃圾与其它生活垃圾混合燃烧处理,这种处理方式产生的热量未能得到回收利用;第二种是采用热电站法,将厨余垃圾燃烧的热量回收利用为热能和电能,实现厨余垃圾的资源化<sup>[30]</sup>。但厨余垃圾含水量较高,其热值仅为2100kJ/kg左右<sup>[37]</sup>,需要添加如煤炭等辅助燃料,会增加额外资源的消耗和碳排放。2011年,世界首个厨余垃圾焚烧发电厂在英国投产运行,尽管其每天可将12万t厨余垃圾转化为150万kW·h的电能,但是其较高的运行成本也使得厨余垃圾焚烧发电技术难以推广应用<sup>[38]</sup>。因此,焚烧法也不是厨余垃圾合适的处理方法。

### 1.4 饲料

厨余垃圾中含有大量蛋白质和油脂,是优质的动物饲料原料。以往,我国约80%的厨余垃圾未经处理被直接用来饲养动物,极易造成病原体通过食物链传播疾病,现在我国已禁止将厨余垃圾直接用作动物饲料<sup>[39]</sup>,厨余垃圾需经过消毒、加工处理和生物转化过程,才可用作饲料资源。目前,厨余垃圾饲料资源化的方式有两种:高温消毒制法和生物处理制法。厨余垃圾被加工成蛋白含量20%~30%的动物饲料,可以替代玉米、大豆等粮食原料,节省大量资源<sup>[40]</sup>。郝东青等<sup>[41]</sup>采用蒸煮等高温手段处理厨余垃圾,可得到粗蛋白含量大于20%的高营养蛋白饲料。肖云

等<sup>[42]</sup>利用自制复合菌剂(黑曲霉:啤酒酵母:枯草芽孢杆菌=1:1:1)处理厨余垃圾,可得到粗蛋白含量28.35%的生物饲料。此外,厨余垃圾的饲料化过程中,其含有的如口蹄疫病毒、猪瘟病毒等病原体很难被完全灭活,存在源性污染的风险<sup>[43]</sup>。研究表明,用源性厨余垃圾饲料饲养动物的患病风险最高<sup>[39]</sup>。1985年英国爆发的疯牛病,就是因为喂食含有牛羊动物骨肉粉的饲料而引发的源性污染事件<sup>[44]</sup>。2002年欧盟出台的第1774/2002号条例中明令禁止使用源性动物蛋白饲养同种动物,禁止使用厨余垃圾饲养除毛皮动物之外的农场动物<sup>[45]</sup>。我国现行的《餐厨垃圾处理技术规范》(CJJ 184-2012)规定<sup>[46]</sup>,餐厨垃圾饲料化处理必须进行病原菌灭杀工艺;对于含有动物蛋白成分的餐厨垃圾,其饲料化工艺应设置生物转化环节,并且禁止生产反刍动物饲料。由此可见,厨余垃圾的饲料化应用还存在部分风险与阻力,但随着厨余垃圾饲料化风险评估的不断完善,政府逐步放开厨余垃圾饲料化的政策。2021年9月,欧盟颁布新法令解除了动物性饲料喂养供人类食用牲口的禁令,允许将加工动物蛋白用于猪和家禽的饲料中,但仍禁止用于饲养牛、羊等反刍动物<sup>[47]</sup>。目前,养殖业对动物饲料的需求量不断增加,豆粕、鱼粉等蛋白原料逐渐出现供应短缺和价格上涨的情况,给养殖业的发展带来一定压力<sup>[48]</sup>。据法国养猪协会统计,生猪养殖的70%成本为饲料成本<sup>[47]</sup>,厨余垃圾生产的饲料可大大降低养殖业的饲养成本。总之,厨余垃圾的饲料化不仅可获得较高价值的动物蛋白,提高厨余垃圾资源化产品的附加值,还解决了厨余垃圾的环境问题,具有较好的应用前景。未来,厨余垃圾应通过生物转化、固态发酵等技术来转化蛋白饲料,加强对蛋白饲料的安全风险评估,避免源性污染问题;中国政府需要建立相关的法律法规和标准许可,明确厨余垃圾动物饲料的应用范围,禁止采用厨余垃圾生产反刍动物饲料。

### 1.5 昆虫养殖

近些年,用厨余垃圾来养殖昆虫逐渐受到人们的关注,其中黑水虻养殖的应用最为广泛<sup>[43]</sup>。黑水虻具有易成活、适应性强、处理量大、营养价值高和生态安全性高等优点,是比较适合处理厨余垃圾的昆虫<sup>[49]</sup>。昆虫养殖法可快速降解厨余垃圾,避免了厨余垃圾滋生苍蝇、病菌和臭气污染等问题,最终成虫

经过筛分、烘干处理可得到优质昆虫蛋白和虫沙。昆虫蛋白后续可以将其加工为动物蛋白饲料<sup>[50]</sup>或转化为生物柴油<sup>[51]</sup>,虫沙可加工为有机肥料。此外,黑水虻还可以与堆肥工艺相结合,促进厨余垃圾的资源化处理。Liu 等<sup>[52]</sup>采用黑水虻促进厨余垃圾的好氧堆肥过程,结果表明黑水虻可以缩短堆肥周期,可将堆肥产物的发芽指数由 40.95%提高至 70.69%。因此,昆虫养殖是厨余垃圾适合的资源化处理技术。目前昆虫养殖法还存在昆虫育种技术不成熟、最终产品缺乏风险评估等不足,并且厨余垃圾中过高的盐分和油分不利于昆虫生长,因此该技术尚未得到大规模推广应用。

## 1.6 堆肥

**1.6.1 好氧堆肥** 好氧堆肥根据过程温度的变化,可分为“升温阶段-高温阶段-降温阶段-腐熟阶段”4 个阶段,每个阶段进行不同的生化反应,最终将厨余垃圾转化为腐殖质<sup>[39]</sup>。厨余垃圾中含有较多的有机质,且具有易腐化变质的特征,比较符合好氧堆肥工艺的物料要求。蓝俞静等<sup>[53]</sup>采用好氧堆肥法处理厨余垃圾,得到了满足 NY 525-2011 标准<sup>[54]</sup>的有机肥料。周莹等<sup>[55]</sup>利用厨余垃圾堆肥产物与无机肥共同制得复混肥,该复混肥不仅利于小白菜生长,还有利于土壤环境的改善。许文江等<sup>[56]</sup>采用二步堆肥法对厨余垃圾的快速堆肥及施肥降污技术进行了研究,得到的有机肥可促进丝瓜增产,并且可降低农田中的 N、P 淋失。

好氧堆肥过程是否成功,主要取决于堆肥物料的组成和堆肥条件参数。厨余垃圾堆肥过程中采用合适的曝气量、含水率、物料粒度、孔隙率、pH 值或其他有机废物进行共堆肥,都有利于好氧堆肥的进行。邹德勋等<sup>[57]</sup>将菌糠和厨余垃圾进行联合好氧堆肥,结果表明菌糠可促进厨余垃圾的好氧堆肥,可降低混合堆料产生的臭气量,并得到发芽指数为 55.6%的一次堆肥产品。好氧堆肥产品的质量受原料成分的影响较大,厨余垃圾中的油脂会在堆肥表面形成一层隔绝氧气的油膜,不利于好氧堆肥过程;厨余垃圾中盐分含量较高,长期使用高盐厨余垃圾堆肥产生的肥料会导致土地的盐碱化<sup>[58]</sup>。Li 等<sup>[59]</sup>分析了厨余垃圾中高糖、高盐、高油脂和高纤维组分与好氧发酵效率之间的关系,研究表明不同成分的厨余垃圾的理化性质和水解酶活性存在显著差

异,高油和高盐组分不利于厨余垃圾的好氧堆肥过程,堆肥之前应对厨余垃圾进行脱油和脱盐预处理。Gao 等<sup>[60]</sup>采用激发-发射矩阵光谱和傅里叶变换红外光谱分析手段研究了畜禽粪便和秸秆废物堆肥原料的腐殖酸形成机理,结果表明秸秆废物腐殖化产物的芳构化速率明显高于牲畜粪便腐殖化产物,这可能与堆肥原料成分不同有关。此外,传统堆肥过程存在的堆肥周期长、占地面积大、氮素损失多、臭气和渗滤液的二次污染等问题,限制了其工业应用与推广<sup>[58]</sup>。目前,国内外学者已经开始关注厨余垃圾好氧堆肥的提速、提质和源头减量研究。Zhou 等<sup>[61]</sup>采用小型家庭快速堆肥机对厨余垃圾进行 4d 好氧发酵后,得到了发芽指数为 89.7%、pH 值为 5.57、电导率为 1984 $\mu$ S/cm 的腐熟堆产品。王新杰等<sup>[62]</sup>采用超高温好氧发酵技术处理餐厨垃圾,堆体内 90 $^{\circ}$ C 以上的温度持续 21d,具有良好的杀菌效果。Xin 等<sup>[63]</sup>采用具有智能温度、气体流量控制系统的新型生物干化腐熟反应器来处理厨余垃圾,在通风频率为开 10min/关 20min、翻转频率为 3 次/d、智能加热的条件下,15d 就可获得发芽指数为 94.28%的腐熟产物。未来,厨余垃圾好氧堆肥应加强机械式堆肥、覆盖膜式堆肥和腐殖质产品应用的研究。

**1.6.2 蚯蚓堆肥** 蚯蚓堆肥是蚯蚓吞食厨余垃圾与土壤的混合有机物,在蚯蚓砂囊研磨和体内消化酶的共同作用下,混合物被分解成小分子物质,完成降解的过程。蚯蚓可吸收这些营养物质用于自身的生长,实现厨余垃圾向蛋白质转化,完成了厨余垃圾的资源化过程。蚯蚓堆肥法可以避免臭气的产生,蚯蚓本身富含蛋白质,可用作加工蛋白质饲料和医用药材等。早在 1991 年,法国 Lavoulte 市成功投产了世界上第一座城市垃圾蚯蚓处理厂,其处理量可达 20~30t/d,处理成本仅为 360 法郎/t<sup>[64]</sup>。曹瑞琪等<sup>[65]</sup>评估了蚯蚓堆肥法处理厨余垃圾的肥料资源化效果,结果表明采用蚯蚓堆肥产物作为肥料的绿豆长势最好,证明了蚯蚓对厨余垃圾堆肥产物的肥力提升有较大帮助。武佳韵等<sup>[66]</sup>研究了厨余垃圾与菌渣混合物的蚯蚓堆肥效果,结果表明蚓粪肥是一种优质的有机肥,其肥效高于牛粪组。由于厨余垃圾含有不利于蚯蚓的存活与生长的油脂和盐分,蚯蚓在厨余垃圾处理过程中的处理能力容易退化,蚯蚓种类也不够丰富,因此蚯蚓堆肥法具有

一定的局限性.未来,需要加强对蚯蚓品种和适应性条件的研究.

## 1.7 转化能源

**1.7.1 甲烷** 厨余垃圾可以通过厌氧消化获得清洁能源甲烷.有机物厌氧消化过程如图 1 所示,厨余垃圾在厌氧菌的作用下经过“水解-酸化-产乙酸-产甲烷”4 个发酵阶段<sup>[67]</sup>.有机质先水解氨基酸、长链脂肪酸等小分子化合物,再进入酸化阶段产生丙酸、丁酸等多种有机酸,有机酸再转化为乙酸和氢气,最终乙酸和氢气在产甲烷阶段转化为甲烷,完成厨余垃圾的资源化过程.Kastner 等<sup>[68]</sup>采用厌氧消化法处理食品工业的有机废弃物,得到了甲烷含量约为 60%的沼气,且沼气产率高达 670L/kg VS(搅拌式反应器)和 550L/kg VS(流化床反应器).厌氧消化的产气量与发酵条件、底物性质和工艺流程密切相关,采取共消化和预处理技术可提高甲烷产量.罗娟等<sup>[69]</sup>研究了甘蔗叶对厨余垃圾厌氧消化的影响,结果表明甘蔗叶可以提高厨余垃圾的甲烷产量.郝鑫等<sup>[70]</sup>研究了秸秆、污泥与厨余垃圾共消化的协同效果,结果表明“餐厨+污泥+秸秆”3 种物料共消化的产气量为 373mL/g VS,3 种底物共消化的产气量明显高于两种底物.刘研萍等<sup>[71]</sup>发现高温水解预处理可以促进厨余垃圾的水解,提高厌氧体系中的 VFAs 和 SCOD 含量,进而提高了甲烷产率.

厨余垃圾厌氧消化过程清洁且污染小,实现厨余垃圾减量化和无害化的同时,还获得清洁能源和沼渣肥料,符合绿色可持续发展理念.目前,我国已建成较多大型厨余垃圾厌氧消化处理厂.2020 年 6 月,全球最大的城市有机垃圾综合处理项目——广州东部固体资源再生中心生物质综合处理厂建成投产,该项目采用“预处理+共消化+综合利用”的厌氧工艺,总处理能力为 2040t/d(餐饮垃圾 400t/d+厨余垃圾 600t/d+动物固废 40t/d+粪污 1000t/d),最终可获得电能 1 亿度/a、生物柴油 10 万 t/a、有机肥料 14.6 万 t/a,实现了厨余垃圾的高效资源化<sup>[5]</sup>.因此,厌氧消化是厨余垃圾较合适的资源化处理技术.

**1.7.2 氢气** 氢气通常采用能耗较高的电解法或以煤、石油及天然气等矿物燃料为原料制取,而以厨余垃圾为原料生产氢气过程的能耗较低,是传统制氢工艺的替代方案之一.厨余垃圾生产氢气的主要工艺有厌氧消化产氢气和光合细菌产氢气,产氢效

果主要与产氢菌、发酵工艺条件和产氢抑制因子有关<sup>[72]</sup>.袁雨珍等<sup>[73]</sup>研究了 pH 值对厨余垃圾厌氧消化产氢的影响,结果表明厨余垃圾厌氧产氢的合适 pH 值为 9,此时氢气产量为 72.9mL/g.目前厨余垃圾生产氢气技术尚不成熟,难以连续、高效、稳定地运行,其研究大部分处于实验室阶段,部分达到中试试验水平.未来的研究应该集中在工艺优化、产氢菌株丰度的维持和高效厌氧反应器的开发,实现其连续、高效和稳定地运行.总之,厨余垃圾产氢气有较好的应用前景.

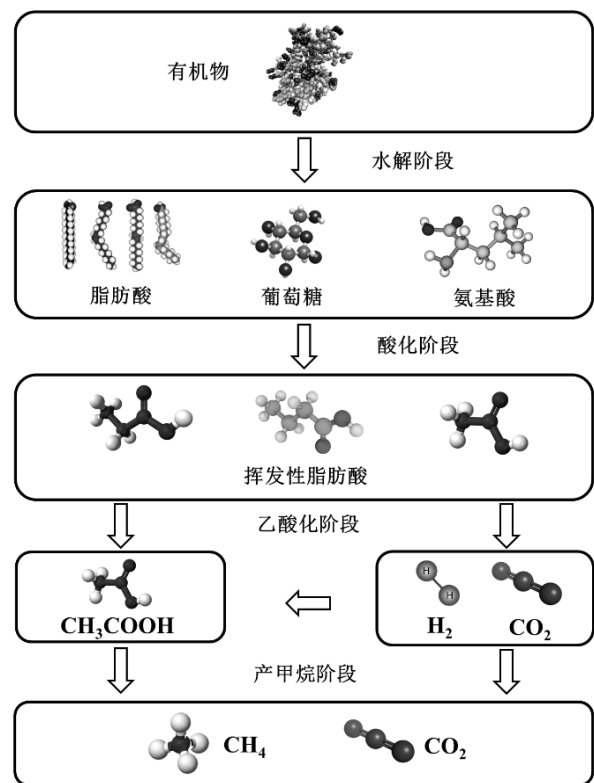


图 1 有机物厌氧消化过程

Fig.1 Anaerobic digestion process of organic matter

**1.7.3 乙醇** 乙醇作为优质的清洁燃料,通常由玉米、木薯等粮食作物发酵获得.目前,乙醇汽油已经开始普及推广.随着世界粮食危机问题的出现,采用粮食作物生产乙醇的合理性存在较大争议.厨余垃圾中含有大量的淀粉、纤维素等生产乙醇所需的有机物,采用厨余垃圾产乙醇丰富了乙醇生产的原料来源.厨余垃圾生产乙醇一般经过“预处理-水解-发酵-蒸馏-脱水”等工序<sup>[11]</sup>,预处理过程破坏淀粉、纤维素等多糖的结构,水解处理则将大分子多糖转化为较小的还原糖类,还原糖经过微生物发酵转化为

粗品乙醇,最后再经过蒸馏、脱水处理就可获得高纯度乙醇产品.刘爱民等<sup>[74]</sup>以校园厨余垃圾为原料进行了混合菌发酵制备乙醇燃料的研究,结果表明厨余垃圾在含量 15%的啤酒酵母作用下持续发酵 5d,可得到含量为 6.67%的乙醇产品.日本研发了以厨余垃圾和废纸为原料的生物乙醇发生装置,发酵底物在酵母和酶的作用下,仅需 3~4d 就可以将 1t 垃圾转化为 60L 乙醇燃料,发酵残渣还可继续产甲烷,具有较好的推广前景<sup>[75]</sup>.

**1.7.4 生物柴油** 生物柴油是动物油脂与醇类发生酯交换反应所制得的脂肪酸单烷基酯.1981 年,生物柴油的概念被南非科学家率先提出<sup>[11]</sup>,与传统的石化柴油相比,生物柴油具有较好的燃烧性能、较低的挥发性、较高的安全系数、较好的低温启动性和环境友好等优点.生物柴油的生产工艺可以分为酸碱催化法、超临界法和生物酶法,其中酸碱催化法较为成熟,其余两种方法还停留在实验室阶段.目前,制备生物柴油的原料主要采用高成本的食用油脂,若利用餐厨废弃油脂为原料制备生物柴油,可降低生物柴油的生产成本.此外,有研究表明厨余垃圾可直接转化为生物柴油,如钟昌东等<sup>[76]</sup>以厨余垃圾为原料,在微波的辅助下可获得质量分数为 97.03%的脂肪酸甲酯产品,其中酯交换反应转化率为 65.11%.目前,新型酯交换反应器技术、催化加氢技术和催化裂解技术等制备生物柴油的新技术得到了较好发展,但这些技术还处于起步阶段.未来,餐厨废弃油脂制备生物柴油具有广阔的应用前景.

## 1.8 高值化利用

厨余垃圾可通过水热液化技术或发酵技术生产乳酸和还原性糖,通过水热碳化技术生产功能炭材料.三种高附加值产品均可用作化工原料,实现厨余垃圾的高值化利用.

**1.8.1 乳酸** 乳酸又叫 2-羟基丙酸,其合成的聚乳酸主要用来生产新型生物可降解塑料,该塑料在环保、医药等领域具有较高的应用价值.厨余垃圾可通过发酵技术转化为乳酸,进而合成聚乳酸.姜华等<sup>[77]</sup>采用开放式乳酸发酵技术处理食物垃圾,可得到 36.29g/L 的乳酸.此外,厨余垃圾还可采用水热液化处理生产乳酸,同时会伴生乙酸.有研究表明,水热液化技术有机酸的产率较低,且生成的乳酸有向乙酸转化的趋势.Goto 等<sup>[78]</sup>采用兔粮作为城市有机固废

的模型物质,通过水热液化技术可从兔粮中得到产率为 3.2%的乳酸和 2.6%的乙酸.目前,厨余垃圾产乳酸的研究集中在工艺开发和菌株培养上,技术尚不完善,后续可多加强菌株筛选改造和高效产乳酸反应器等方面的研究.厨余垃圾转化乳酸,既可实现厨余垃圾的资源化利用,制得的乳酸还可生产可降解塑料,有利于解决白色污染问题.所以,厨余垃圾产乳酸也具有良好的应用前景.

**1.8.2 还原性糖** 厨余垃圾中淀粉和纤维素的水解产物葡萄糖是乙醇等物质的前驱体<sup>[79]</sup>,具有较高的工业利用价值.目前,厨余垃圾可通过水热法、酶促法和酸解法来生产还原性糖.Nagamori 等<sup>[80]</sup>采用水热法处理淀粉产葡萄糖,淀粉在 473K 的温度下反应 30min,可获得产率为 630g/kg 炭基的葡萄糖.陈梦等<sup>[81]</sup>研究表明厨余垃圾在 220U/g 糖化酶、55.8℃、起始 pH 值为 5.24 的反应条件下,得到了 68.02g/L 的还原性糖.Vavouraki 等<sup>[82]</sup>研究了酸解法对厨余垃圾水解产糖的促进作用,表明采用 1.12%的盐酸对厨余垃圾预处理 94min,可将可溶性糖的产率提高至 548mg eq.Glu/g.此外,在超临界条件下,厨余垃圾中的纤维素可水解为葡萄糖、果糖等还原性糖<sup>[83]</sup>.目前厨余垃圾生产还原性糖工艺的产糖量低、发展不成熟,后续可以加强产糖过程中不同组分的影响、选择性促进和有害组分去除的研究,糖类的后续分离提纯研究也至关重要.

**1.8.3 炭材料** 生物炭是生物质在高温缺氧环境下缓慢分解得到的一种富含碳元素的碳基材料<sup>[84]</sup>,其表面含有大量的活性氧官能团,可对其改性为新型功能材料.厨余垃圾可通过水热碳化和热解技术生产炭材料,所得生物炭材料可用于水质净化、吸附污染物、负载药物、催化剂和改良土壤等用途<sup>[85]</sup>.厨余垃圾生产炭材料可视为二氧化碳的封存过程,可减少 21%的碳排放<sup>[86]</sup>.张新旺等<sup>[87]</sup>采用高温热解方法和共沉淀法处理厨余垃圾,获得了对水中亚甲基蓝具有较好吸附效果的磁性生物质炭材料.金桃等<sup>[88]</sup>以水热碳化方法处理厨余垃圾,得到了热值及灰分均达到一级精煤标准的生物煤.吴倩芳等<sup>[89]</sup>以厨余垃圾作为原料,采用水热碳化方法制得了铁/炭纳米复合材料.虽然厨余垃圾水热法制备生物炭的转化效果较好,但是水热法存在反应复杂、副产物较多和反应精准控制不足等缺点,且得到的生物

炭为导电性较差的非晶态碳材料,限制了炭材料产品的应用范围.未来可加强热解制生物炭的工艺优化和生物炭产品的性能改进,扩大生物炭材料的应用领域.

## 2 厨余垃圾资源化方案选择

根据《中国统计年鉴》显示,2019 年我国城市生活垃圾填埋和焚烧处理占比分别为 45.59%和 50.47%<sup>[6]</sup>.但两种方法都存在环境污染、资源回收效率低等众多问题.因此,越来越多的国家不鼓励采用堆肥和焚烧来处理厨余垃圾,而资源化逐渐成为厨余垃圾最受欢迎的处理方式.目前,厨余垃圾资源化处理的主流技术为厌氧消化、好氧堆肥和饲料法,而其他如昆虫饲养和高值化利用等资源化技术,都因技术不成熟、成本较高和缺乏大规模、稳定的工业应用能力而无法得到广泛推广和应用<sup>[90]</sup>.目前,中国厨余垃圾资源化技术占比为厌氧消化(74.3%)、好氧堆肥(13.5%)和饲料(12.2%)<sup>[5]</sup>.中国“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划中规定,鼓励使用厨余垃圾生产油脂、沼气、有机肥、土壤改良剂和饲料添加剂等产品,可按照当地厨余垃圾的生产规模和性质来选择成熟可靠的肥料化、饲料化(饲料添加剂)和能源化等处理工艺<sup>[90]</sup>.中国“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划中规定,中国将继续完善垃圾分类体系,并计划到 2025 年底实现全国城市生活垃圾 60%左右的资源化率.因此,未来中国将面临厨余垃圾资源化方式的选择问题.为了明确厌氧消化、好氧堆肥和饲料法的研究趋势,本文采用文献计量学研究趋势分析方法,分析了 Web of Science 数据库中 2006~2020 年中国厨余垃圾三大资源化处理的发文研究趋势.由图 2 可知,近 15a 来我国对厨余垃圾三大资源化处理技术的研究均呈上升趋势,厌氧消化的研究占比和增速位居第一位,其次为好氧堆肥,而饲料法增长缓慢且占比较少.鉴于动物饲料的同源污染问题,目前饲料法还存在较多未知风险而不能大规模推广应用<sup>[91]</sup>,但中国应持续关注厨余垃圾饲料法的生物转化和应用风险评估研究,不断完善厨余垃圾饲料法的相关法律法规和标准许可,未来饲料化应是中国厨余垃圾资源化处理中值得提倡的技术之一.因此,目前中国在厨余垃圾资源化处理工业领域的技术选择应多关

注厌氧消化和好氧堆肥技术.

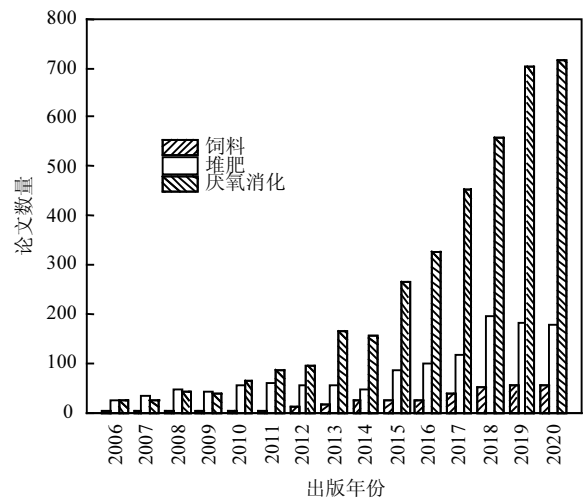


图 2 基于 Web of Science 搜索结果中带有关键词的出版物数量

Fig.2 Based on the number of publications with keywords in Web of Science

目前,中国最适合大规模工业应用的资源化处理技术为厌氧消化和好氧堆肥<sup>[92-93]</sup>.通过表 2 显示的厌氧消化和好氧堆肥处理方案对比可知,厌氧消化和好氧堆肥均有良好的资源化属性,并且在技术、经济上可互相补充.与厌氧消化相比,好氧堆肥更关注于缩短堆肥周期、提高产品腐质化程度、减少臭气和温室气体排放方面,其适合中小规模厨余垃圾的源头减量和分散式处理<sup>[94]</sup>.以往,中国对厨余垃圾堆肥生产的有机肥缺乏相应国家标准,缺乏销售和使用堆肥产物的有效市场,而 2021 年 5 月中华人民共和国农业农村部颁布的有机肥料行业标准(NY/T 525-2021)将厨余垃圾和沼渣/液纳入生产商品有机肥的评估类原料,这将极大推动了厨余垃圾好氧堆肥市场的发展<sup>[5]</sup>.与好氧堆肥相比,厌氧消化具有低碳排放、二次污染少、运行成本低、温室气体排放低和全球变暖潜能值低等优点,其适用于厨余垃圾的集中式、大规模处理<sup>[90]</sup>.近年来,较多研究采用生命周期评价方法来研究厨余垃圾不同处理方式的影响,以期选择更经济、环境影响小和高效的资源化处理方式.在环境保护和资源回收方面,厌氧消化和好氧堆肥优于垃圾填埋、焚烧和气化<sup>[95-96]</sup>;与好氧堆肥相比,厌氧消化具有较低的温室气体排放量、较小的环境影响和较高的经济效益<sup>[97-98]</sup>;而好氧堆肥因其工艺简单、周期相对较短和投资成本低等优点,

成为厨余垃圾分散式、源头减量等特定场景下合适的资源化处理技术.因此,大型城市厨余垃圾的集中处理适合采用厌氧消化方案;而机关单位、社区、菜

市场等小型场所和偏远地区适合采用快速好氧堆肥机进行源头减量;农村地区适合采用低成本的覆盖膜式静态好氧堆肥.

表 2 厨余垃圾厌氧消化与好氧堆肥处理方案对比<sup>[92]</sup>

Table 2 Comparison of anaerobic digestion and composting treatment options for food waste<sup>[92]</sup>

| 项目   | 厌氧消化  | 好氧堆肥   |
|------|---|--|
| 优点   | 处理量大,占地面积小,臭味小,获得清洁能源   | 降解速度较快,投资小,获得腐殖质产品                                     |
| 缺点   | 降解速度慢,系统稳定性差,投资成本高,沼液沼渣难处理  | 占地面积大,臭气和温室气体排放多,渗滤液污染,消耗能源多,堆肥产品市场有限                  |
| 产品利用 | 甲烷燃料,CNG;热电联产得到热能和电能,沼液/渣有机肥  | 腐殖质,土壤调理剂,热能   |
| 经济分析 | 资本投入多,运营成本低;总处理规模越大,单位处理量的资本运营成本越低                                      | 资本投入少,静态堆肥运行成本低,机械堆肥成本偏高,占地面积大                         |
| 环境影响 | 产沼气过程中温室气体排放较低;沼液沼渣在存储或施入土壤时会释放温室气体和臭气;沼气替代化石燃料、沼液沼渣有机肥替代矿物肥料具有显著的碳减排效益 | 堆肥过程中产生温室气体和臭气,并且好氧堆肥的碳排放高于厌氧消化;堆肥腐殖质产品替代矿物肥料有显著的碳减排效益 |
| 发展趋势 | 自动化程度高,适合集中式、大型处理规模   | 膜覆盖式堆肥和堆肥机,适合分散式、中小型处理规模                               |

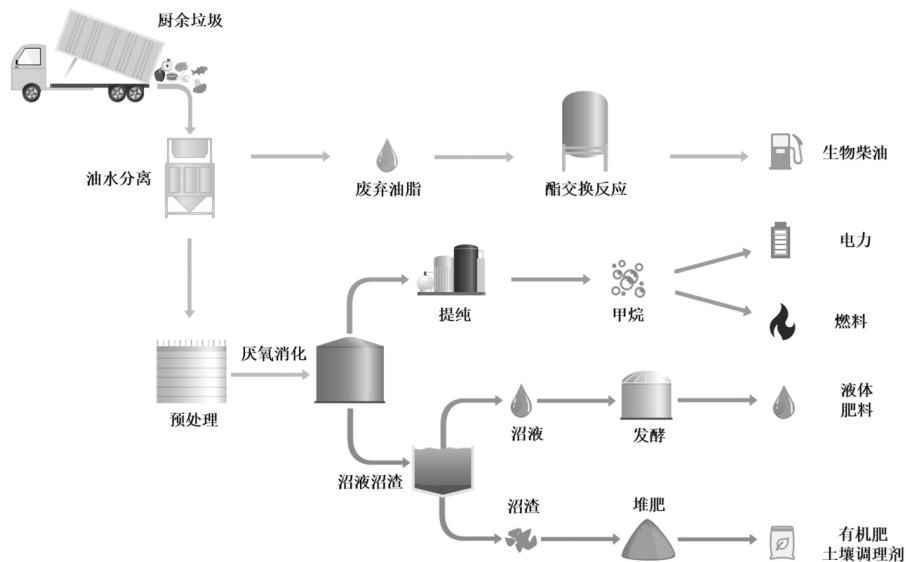


图 3 厨余垃圾资源化组合工艺

Fig.3 Combined process for the resource treatment of food waste

综合考虑经济、环境效益,图 3 所示的废弃油脂炼制生物柴油+厌氧消化产甲烷+沼渣好氧堆肥可能是中国厨余垃圾合适的资源化工艺.针对厨余垃圾厌氧消化过程存在的低 C/N、营养元素不均衡、消化周期长、易酸化和氨氮累积等问题,该组合工艺的厌氧消化阶段可采取预处理(机械研磨、超声、微波、热处理、冻融、高级氧化、酸处理、碱处理、微氧处理和酶处理等)、共消化(园林垃圾、污泥、畜禽粪便和农业废弃物等)、添加剂(生物炭、纳米材料、矿物材料、营养元素和生物填料等)和两相厌氧消化等手段<sup>[5,67,90,92]</sup>,来提高厨余垃圾的

可生化性和厌氧消化效率.针对厨余垃圾沼渣好氧堆肥过程存在的高含水率、低 C/N、堆肥周期长和臭气等问题,该组合工艺的好氧堆肥阶段可采取添加膨松剂(木屑、秸秆和稻壳等)、共堆肥(园林垃圾、污泥、畜禽粪便和农业废弃物等)、添加剂(微生物菌剂、生物炭、沸石和可形成鸟粪石的镁盐、磷酸盐等)、机械堆肥和覆盖膜式堆肥等手段<sup>[58,63,94]</sup>,来强化厨余垃圾厌氧沼渣的好氧堆肥过程.未来,在厨余垃圾资源化回收方案的选择上,应继续引入生命周期评价方法来评估厨余垃圾资源化回收方案的合理性,进而选择经济和环境效益双高的资源化解



决方案.

### 3 结论

3.1 我国厨余垃圾产量大,处理不当会对环境造成严重影响.通过对 8 种厨余垃圾处理方式的回顾分析,得出厨余垃圾的资源化处理(饲料、昆虫养殖、堆肥、转化能源和高值化利用)是未来的发展趋势,其中饲料化应是未来厨余垃圾资源化处理中值得提倡的技术之一.

3.2 厌氧消化和好氧堆肥作为工业应用最广的资源化技术,分别适用于集中大规模处理和分散式、中小规模、源头减量处理的应用场景,其中厌氧消化技术具有较好的经济环境效益.

3.3 废弃油脂炼制生物柴油+厌氧消化产甲烷+沼渣好氧堆肥的组合工艺可能是目前中国厨余垃圾合适的资源化处理工艺.

3.4 未来,应引入生命周期评价方法来评估厨余垃圾资源化回收方案的合理性,指导选择经济、环境效益较好的资源化解解决方案.

#### 参考文献:

- [1] 黄欣怡,张琚婷,王 凡,等.餐厨垃圾资源化利用及其过程污染控制研究进展 [J]. 化工进展, 2016,35(9):2945-2951.  
Huang X Y, Zhang J T, Wang F, et al. Research progress in resource utilization of kitchen waste and its process pollution control [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016,35(9):2945-2951.
- [2] GB/T 19095-2019 生活垃圾分类标志 [S].  
GB/T 19095-2019 Signs for classification of municipal solid waste [S].
- [3] FAO. Towards the future we want: End hunger and make the transition to sustainable agricultural and food systems[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.
- [4] Adhikari B K, Barrington S, Martinez J. Predicted growth of world urban food waste and methane production [J]. Waste Management & Research, 2006,24(5):421-433.
- [5] Jin C, Sun S, Yang D, et al. Anaerobic digestion: An alternative resource treatment option for food waste in China [J]. Science of the Total Environment, 2021,779:146397.
- [6] 国家统计局.中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2020: 12-16.  
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020:12-16.
- [7] Wang Y, Zang B, Li G, et al. Evaluation the anaerobic hydrolysis acidification stage of kitchen waste by pH regulation [J]. Waste Management, 2016,53:62-67.
- [8] 陈 瑛,滕婧杰,赵娜娜,等.“无废城市”试点建设的内涵、目标和建设路径 [J]. 环境保护, 2019,47(9):21-25.  
Chen Y, Teng J J, Zhao N N, et al. The content, objectives and path of "zero-waste cities" construction [J]. Environmental Protection, 2019, 47(9):21-25.
- [9] Chen S, Huang J, Xiao T, et al. Carbon emissions under different domestic waste treatment modes induced by garbage classification: Case study in pilot communities in Shanghai, China [J]. Science of the Total Environment, 2020,717:137193.
- [10] 中国质量报.上海生活垃圾全程分类体系基本建成 [EB/OL]. <http://epaper.cqn.com.cn/article/490380.html>2020-07-03/2022-01-01. China Quality News. Shanghai's whole-process garbage classification system has been basically completed. [EB/OL]. <http://epaper.cqn.com.cn/article/490380.html>2020-07-03/2022-01-01.
- [11] 李光明.城市餐厨垃圾收运管理与资源化技术 [M]. 上海:同济大学出版社, 2015:4-10.  
Li G M. Management and recycling technology of urban food waste [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015:4-10.
- [12] 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.
- [13] Xing B, Wang X C. High-rate mesophilic co-digestion with food waste and waste activated sludge through a low-magnitude increasing loading regime: Performance and microorganism characteristics [J]. Science of the Total Environment, 2021,777:146210.
- [14] Liu N, Wang Q, Jiang J, et al. Effects of salt and oil concentrations on volatile fatty acid generation in food waste fermentation [J]. Renewable Energy, 2017,113:1523-1528.
- [15] De Clercq D, Wen Z, Fan F, et al. Biomethane production potential from restaurant food waste in megacities and project level-bottlenecks: A case study in Beijing [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016,59:1676-1685.
- [16] Yuan J, Li Y, Wang G, et al. Biodrying performance and combustion characteristics related to bulking agent amendments during kitchen waste biodrying [J]. Bioresource Technology, 2019,284:56-64.
- [17] Zhang D, Xu Z, Wang G, et al. Insights into characteristics of organic matter during co-biodrying of sewage sludge and kitchen waste under different aeration intensities [J]. Environmental Technology & Innovation, 2020,20:101117.
- [18] Wang Y, Zang B, Li G, et al. Evaluation the anaerobic hydrolysis acidification stage of kitchen waste by pH regulation [J]. Waste Management, 2016,53:62-67.
- [19] Li Z, Wang Q, Zhang T, et al. A novel bulk density-based recognition method for kitchen and dry waste: A case study in Beijing, China [J]. Waste Management, 2020,114:89-95.
- [20] Zhang W, Lang Q, Fang M, et al. Combined effect of crude fat content and initial substrate concentration on batch anaerobic digestion characteristics of food waste [J]. Bioresource Technology, 2017,232: 304-312.
- [21] Jiang J, Wu P, Sun Y, et al. Comparison of microbial communities during anaerobic digestion of kitchen waste: Effect of substrate sources and temperatures [J]. Bioresource Technology, 2020,317: 124016.
- [22] Zhou Q, Yuan H, Liu Y, et al. Using feature objects aided strategy to

- evaluate the biomethane production of food waste and corn stalk anaerobic co-digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2015,179:611-614.
- [23] Li Y, Jin Y, Li J, et al. Current Situation and Development of Kitchen Waste Treatment in China [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2016,31:40-49.
- [24] He M, Sun Y, Zou D, et al. Influence of Temperature on Hydrolysis Acidification of Food Waste [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012,16:85-94.
- [25] Du M, Liu X, Wang D, et al. Understanding the fate and impact of capsaicin in anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2021,188:116539.
- [26] Zhao J, Liu Y, Wang D, et al. Potential impact of salinity on methane production from food waste anaerobic digestion [J]. *Waste Management*, 2017,67:308-314.
- [27] 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.
- [28] Zhang W, Chen B, Li A, et al. Mechanism of process imbalance of long-term anaerobic digestion of food waste and role of trace elements in maintaining anaerobic process stability [J]. *Bioresource Technology*, 2019,275:172-182.
- [29] Zhang W, Wu S, Guo J, et al. Performance and kinetic evaluation of semi-continuously fed anaerobic digesters treating food waste: Role of trace elements [J]. *Bioresource Technology*, 2015,178:297-305.
- [30] 丹 阡,司马小峰.我国餐厨垃圾分类现状及处理技术展望 [J]. *环境保护前沿*, 2020,10(1):8.  
Dan K, Sima X F. Classification status and technology outlook of kitchen waste in china [J]. *Advances in Environmental Protection*, 2020,10(1):8.
- [31] Lacovidou E, Ohandja D, 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.
- [32] 张 强,稽 冶,冀 伟.餐厨垃圾资源化研究进展 [J]. *化工进展*, 2013,32(3):558-562.  
Zhang Q, Ji Y, Ji W. Research progress of energy production from kitchen garbage [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013,32(3):558-562.
- [33] Yang N, Zhang H, Shao L, et al. Greenhouse gas emissions during MSW landfilling in China: Influence of waste characteristics and LFG treatment measures [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129:510-521.
- [34] Burnley S. The impact of the European landfill directive on waste management in the United Kingdom [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2001,32:349-358.
- [35] Cozzolino R, Lombardi L, Tribioli L. Use of biogas from biowaste in a solid oxide fuel cell stack: Application to an off-grid power plant [J]. *Renewable Energy*, 2017,111:781-791.
- [36] 宋 薇,蒲志红.美国生活垃圾分类管理现状研究 [J]. *中国环保产业*, 2017,12(7):63-65.  
Song W, Pu Z H. Study on Classification management status of domestic refuse in U.S.A [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2017,(7):63-65.
- [37] 徐 涛.厨余垃圾生命周期评价——以深圳市为例 [D]. 武汉:华中科技大学, 2013.  
Xu T. Food waste life cycle assessment - a Shenzhen case study [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [38] 曾 宇.城市餐厨垃圾处理现状概述 [J]. *科技经济导刊*, 2017,13(14):9-10.  
Zeng Y. An overview of the current situation of municipal kitchen waste treatment [J]. *Technology and Economic Guide*, 2017,(14):9-10.
- [39] 秦 学,李 宁,李贵霞,等.餐厨垃圾资源化处理技术现状及进展 [J]. *煤炭与化工*, 2015,38(7):35-40.  
Qin X, Li N, Li G X, et al. Status and development of resource processing technology of food waste [J]. *Coal and Chemical Industry*, 2015,38(7):35-40.
- [40] 王 莉,刘应宗.公共餐厨垃圾饲料化项目生产可行性分析 [J]. *工业工程*, 2009,12(5):50-53.  
Wang L, Liu Y Z. Feasibility analysis of the transforming public food waste to feed [J]. *Industrial Engineering Journal*, 2009,12(5):50-53.
- [41] 赫冬青,郝 勇,范 群,等.利用餐饮废物生产蛋白饲料 [J]. *环境保护科学*, 2003,18(3):31-32.  
He D Q, Hao Y, Fan W, et al. Producing albumen feedstuff by food' castoff [J]. *Environmental Protection Science*, 2003,(3):31-32.
- [42] 肖 云.餐厨垃圾微生物发酵生产蛋白质饲料的工艺条件研究 [J]. *安徽化工*, 2019,45(1):95-97.  
Xiao Y. Study on the technological conditions for the production of protein feed by microorganism fermentation of kitchen waste [J]. *Anhui Chemical Industry*, 2019,45(1):95-97.
- [43] 周 俊,王梦瑶,王改红,等.餐厨垃圾资源化利用技术研究现状及展望 [J]. *生物资源*, 2020,42(1):87-96.  
Zhou J, Wang M Y, Wang G H, et al. Research status and prospect of food waste utilization technology [J]. *Biotic Resources*, 2020,42(1): 87-96.
- [44] Torres J, Andreoletti O, Lacroux C, et al. Classical bovine spongiform encephalopathy by transmission of H-Type prion in homologous prion protein context [J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2011,17(9):1636-1644.
- [45] 徐长勇,宋 薇,赵树青,等.餐厨垃圾饲料化技术的同源性污染研究 [J]. *环境卫生工程*, 2011,19(1):9-10.  
Xu C Y, Song W, Zhao S Q, et al. Homologous pollution for transforming food residue to feed [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2011,19(1):9-10.
- [46] CJJ184-2012 餐厨垃圾处理技术规范 [S].  
CJJ184-2012 Technical specifications for food waste treatment [S].
- [47] 中国饲料行业信息网.欧盟解除动物蛋白用于喂养猪和家禽的禁令 [EB/OL]. <http://www.feedtrade.com.cn/news/international/2021-09-07/2037339.html>2021-09-07/2021-09-20.  
China feed industry information network. The European Union has lifted a ban on animal protein being fed to pigs and poultry[EB/OL]. <http://www.feedtrade.com.cn/news/international/2021-09-07/2037339.html>2021-09-07/2021-09-20.
- [48] 常燕青,黄慧敏,赵振振,等.餐厨垃圾资源化处理与高值化利用技术发展展望 [J]. *环境卫生工程*, 2021,29(1):44-51.  
Chang Y Q, Huang H M, Zhao Z Z, et al. Prospect for the development of recycling treatment and high-value utilization

- technologies of food waste [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021,29(1):44-51.
- [49] Sheppard D C, Newton G L, Thompson S A, et al. A value-added manure management-system using the black soldier fly [J]. *Bioresource Technology*, 1994,50(3):275-279.
- [50] Wang Y, Shelomi M. Review of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as Animal Feed and Human Food [J]. *Foods*, 2017,6:9110.
- [51] Zheng L, Li Q, Zhang J, et al. Double the biodiesel yield: Rearing black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, on solid residual fraction of restaurant waste after grease extraction for biodiesel production [J]. *Renewable Energy*, 2012,41:75-79.
- [52] Liu T, Awasthi S K, Qin S, et al. Conversion food waste and sawdust into compost employing black soldier fly larvae (diptera: Stratiomyidae) under the optimized condition [J]. *Chemosphere*, 2021, 272:129931.
- [53] 蓝俞静,刘玉德,张 媛,等.餐厨垃圾生物好氧堆肥的影响因素研究 [J]. *环境科学与技术*, 2013,36(S1):30-33.
- Lan Y J, Liu Y D, Zhang Y, et al. Study on the influencing factors of food waste biological aerobic composting [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,36(S1):30-33.
- [54] NY525-2011 有机肥料 [S].  
NY525-2011 Organic fertilizer [S].
- [55] 周 营.餐厨垃圾好氧堆肥微生物强化及复混肥制备的研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2018.
- Zhou Y. Study on the microorganism enhancement and organic-inorganic compound fertilizer of food waste composting [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [56] 许文江,章明清,郑晓倩,等.餐厨垃圾二步法堆肥发酵工艺及施肥技术的优化 [J]. *中国农学通报*, 2016,32(24):141-145.
- Xu W J, Zhang M Q, Zheng X Q, et al. Optimization of two-step compost of kitchen wastes and fertilization technique [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016,32(24):141-145.
- [57] 邹德勋,汪群慧,隋克俭,等.餐厨垃圾与菌糠混合好氧堆肥效果 [J]. *农业工程学报*, 2009,25(11):269-273.
- Zou D X, Wang Q H, Sui K J, et al. Aerobic composting effect of kitchen garbage and spent mushroom substrate [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009,25(11):269-273.
- [58] Cerda A, Artola A, Font X, et al. Composting of food wastes: Status and challenges [J]. *Bioresource Technology*, 2018,248(A):57-67.
- [59] Li Y, Chen Z, Peng Y, et al. Changes in aerobic fermentation and microbial community structure in food waste derived from different dietary regimes [J]. *Bioresource Technology*, 2020,317:123948.
- [60] Gao X, Tan W, Zhao Y, et al. Diversity in the mechanisms of humin formation during composting with different materials [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019,53(7):3653-3662.
- [61] Zhou X, Yang J, Xu S, et al. Rapid in-situ composting of household food waste [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 141:259-266.
- [62] 王新杰,郁 昂,黄韦辰,等.超高温好氧堆肥技术对隔离区餐厨垃圾处理的应用可行性分析 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2020, 59(3):354-359.
- Wang X J, Yu A, Huang W C, et al. Feasibility analysis of the ultra-high temperature aerobic composting technology to treat kitchen waste in isolated areas [J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2020,59(3):354-359.
- [63] Xin L, Li X, Bi F, et al. Accelerating food waste composting course with biodrying and maturity process: A pilot study [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021,9(1):224-235.
- [64] 王丹丹,李辉信,胡 锋,等.蚯蚓处理城市生活垃圾的现状与趋势 [J]. *江苏农业科学*, 2005,19(4):4-8.
- Wang D D, Li H X, Hu F, et al. Status and trend of earthworm treatment of municipal solid waste [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2005,19(4):4-8.
- [65] 曹瑞琪.蚯蚓堆肥对餐厨垃圾的肥料化处理和生态综合利用评估 [J]. *实验技术与管理*, 2013,30(11):83-86.
- Cao R Q. Evaluation on exxperiments of earthworm compost and food waste processing and ecological comprehensive utilization [J]. *Experimental Technology and Management*, 2013,30(11):83-86.
- [66] 武佳韵,赵智远,刘 明,等.餐厨垃圾与菌渣混合发酵养殖蚯蚓的试验研究 [J]. *生物学杂志*, 2016,33(2):110-112.
- Wu J Y, Zhao Z Y, Liu M, et al. Study on culturing earthworms by fermentation of food-waste and mushroom-residue [J]. *Journal of Biology*, 2016,33(2):110-112.
- [67] Zhang C, Su H, Baeyens J, et al. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014,38:383-392.
- [68] Kastner V, Somitsch W, Schnitzhofer W. The anaerobic fermentation of food waste: a comparison of two bioreactor systems [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2012,34(SI):82-90.
- [69] 罗 娟,赵立欣,姚宗路,等.甘蔗叶添加对餐厨垃圾厌氧消化性能的影响 [J]. *中国沼气*, 2017,35(4):21-26.
- Luo J, Zhao L X, Yao Z L, et al. The influences of adding sugarcane leaves on anaerobic fermentation of food waste [J]. *China Biogas*, 2017,35(4):21-26.
- [70] 郝 鑫,苏 婧,孙源媛,等.餐厨垃圾与污泥、秸秆不同配比联合厌氧发酵对产气性能的影响 [J]. *环境科学研究*, 2020,33(1):235-242.
- Hao X, Su J, Sun Y Y, et al. Biogas production of anaerobic co-digestion with different ratios of kitchen waste, sewage sludge and rice straw [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020,33(1):235-242.
- [71] 刘研萍,燕 艳,方 刚,等.高温水解预处理对餐厨垃圾厌氧消化的影响 [J]. *中国沼气*, 2014,32(1):43-48.
- Liu Y P, Yan Y, Fang G, et al. Influence of thermal hydrolysis pretreatment on the kitchen waste anaerobic digestion [J]. *China Biogas*, 2014,32(1):43-48.
- [72] 刘新媛,鲍振博,彭锦星,等.餐厨垃圾厌氧发酵制氢技术的研究进展 [J]. *天津农学院学报*, 2017,24(2):95-99.
- Liu X Y, Bao Z B, Peng J X, et al. Review of biohydrogen production by anaerobic fermentation of food waste [J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2017,24(2):95-99.
- [73] 袁雨珍,肖利平,刘传平,等.pH 对餐厨垃圾厌氧发酵产氢过程的影响 [J]. *生态环境学报*, 2017,26(4):687-692.
- Yuan Y Z, Xiao L P, Liu C P, et al. Effect of pH on hydrogen production during anaerobic fermentation of kitchen waste [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017,26(4):687-692.
- [74] 刘爱民,徐双锁,蔡 欣,等.餐厨垃圾混菌发酵制备燃料乙醇 [J]. *环境工程学报*, 2013,7(2):727-731.

- Liu A M, Xu S S, Cai X, et al. Fuel ethanol production from food waste by being mixed microbial fermentation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013,7(2):727-731.
- [75] 中华纸业. 日本建设以废纸和餐厨垃圾为原料的生物乙醇制造装置 [J]. *中华纸业*, 2015,36(15):77.
- China Pulp & Paper Industry. Bioethanol production from waste paper and food waste in Japan [J]. *China Pulp & Paper Industry*, 2015,36(15):77.
- [76] 钟昌东, 梁 客, 李爱蓉. 微波辅助餐厨垃圾制备生物柴油 [J]. *现代化工*, 2019,39(6):144-148.
- Zong C D, Liang K, Li A R. Preparation of biodiesel from kitchen waste assisted by microwave [J]. *Modern Chemical Industry*, 2019, 39(6):144-148.
- [77] 姜 华. 食物垃圾开放式乳酸发酵的实验研究 [J]. *环境科学研究*, 2008,16(4):48-51.
- Jiang H. Lactic acid production from food waste using an open fermentation mode [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008,(4):48-51.
- [78] Goto M, Obuchi R, Hiroshi T, et al. Hydrothermal conversion of municipal organic waste into resources [J]. *Bioresource Technology*, 2004,93(3):279-284.
- [79] 刘 力, 王 华, 贺文智, 等. 餐厨垃圾资源化产糖研究进展 [J]. *化工进展*, 2014,33(S1):279-285.
- Liu L, Wang H, He W Z, et al. Research progress in sugar production from kitchen waste [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2014,33(S1):279-285.
- [80] Nagamori M, Funazukuri T. Glucose production by hydrolysis of starch under hydrothermal conditions [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2004,79(3):229-233.
- [81] 陈 梦, 徐良铸, 于 萍, 等. 餐厨垃圾酶水解过程的优化 [J]. *可再生能源*, 2015,33(9):1409-1414.
- Chen M, Xu L Z, Yu P, et al. Optimization of kitchen waste enzymatic hydrolysis process [J]. *Renewable Energy Resources*, 2015,33(9): 1409-1414.
- [82] Vavouraki A I, Angelis E M, Kornaros M. Optimization of thermo-chemical hydrolysis of kitchen wastes [J]. *Waste Management*, 2013,33(3):740-745.
- [83] 包守庆, 孙剑飞, 银建中. 超/亚临界水中木质纤维素水解转化制化学品 [J]. *应用科技*, 2020,47(5):100-106.
- Bao S Q, Sun J F, Yin J Z. Chemicals preparation based on hydrolysis of lignocellulose in supercritical/subcritical water [J]. *Applied Science and Technology*, 2020,47(5):100-106.
- [84] 吴倩芳, 张付申. 水热炭化废弃生物质的研究进展 [J]. *环境污染与防治*, 2012,34(7):70-75.
- Wu Q F, Zhang F S. Progress on hydrothermal carbonization of waste biomass [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012,34(7):70-75.
- [85] 王 楠, 张珺婷, 朱辰辰, 等. 由餐厨垃圾制备生物炭的研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2016,39(S2):245-250.
- Wang N, Zhang J T, Zhu H C, et al. Research progress in producing biochar from food waste [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,39(S2):245-250.
- [86] 赵春芳, 张树朝, 褚丙武. 铝用炭素材料生产过程中二氧化碳排放量的计算方法 [J]. *轻金属*, 2011,46(12):37-38.
- Zhao C F, Zhang S C, Chu B W. Calculation method of carbon dioxide emissions from production processes of carbonaceous material used in the production of aluminium [J]. *Light Metals*, 2011,46(12): 37-38.
- [87] 张新旺, 李保鹏, 沈建国, 等. 餐厨垃圾生物质炭制备及其吸附水中亚甲基蓝性能 [J]. *农业资源与环境学报*, 2019,36(1):115-120.
- Zhang X W, Li B P, Shen J G, et al. Research on the adsorption performance of kitchen waste biochar for methylene blue [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019,36(1):115-120.
- [88] 金 桃, 颜 炯, Bottlinger Michael, 等. 餐厨垃圾制生物煤试验初探 [J]. *可再生能源*, 2014,32(4):505-511.
- Jin T, Yan J, Michael B, et al. Experimental study on making bio-coal from food waste by hydrothermal carbonization [J]. *Renewable Energy Resources*, 2014,32(4):505-511.
- [89] 吴倩芳, 吴建芝, 张付申. 水热炭化餐厨垃圾制备纳米铁/炭复合材料 [J]. *环境工程学报*, 2013,7(2):695-700.
- Wu Q F, Wu J Z, Zhang F S. Fe/C nano-materials development from kitchen garbage under hydrothermal condition [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013,7(2):695-700.
- [90] Li Y, Jin Y, Borrión A, et al. Current status of food waste generation and management in China [J]. *Bioresource Technology*, 2019,273: 654-665.
- [91] Chen T, Jin Y, Qiu X, et al. A hybrid fuzzy evaluation method for safety assessment of food-waste feed based on entropy and the analytic hierarchy process methods [J]. *Expert Systems with Applications*, 2014,41(16):7328-7337.
- [92] Lin L, Xu F, Ge X, et al. Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus: A comparative review of anaerobic digestion and composting [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018,89:151-167.
- [93] Khalid H, Zhang H, Liu C, et al. PEST (political, environmental, social & technical) analysis of the development of the waste-to-energy anaerobic digestion industry in China as a representative for developing countries [J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2020,4(3): 1048-1062.
- [94] Awasthi S K, Sarsaiya S, Awasthi M K, et al. Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities [J]. *Bioresource Technology*, 2020,299:122555.
- [95] Levis J W, Barlaz M A, Themelis N J, et al. Assessment of the state of food waste treatment in the United States and Canada [J]. *Waste Management*, 2010,30(8):1486-1494.
- [96] Arafat H A, Jijakli K, Ahsan A. Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015,105:233-240.
- [97] Hermann B G, Debeer L, De Wilde B, et al. To compost or not to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials' waste treatment [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2011,96(6): 1159-1171.
- [98] Oldfield T L, White E, Holden N M. An environmental analysis of options for utilising wasted food and food residue [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016,183:826-835.

**作者简介:** 靳晨曦(1992-),男,山东菏泽人,同济大学博士研究生,主要从事固体废物处理与资源化研究.发表论文6篇.