

厨余垃圾处理技术多维绩效评价 研究报告

中国科学院生态环境研究中心

2021 年 5 月

本研究得到万科公益基金会资助

项目负责人

周传斌	研究员	中国科学院生态环境研究中心
-----	-----	---------------

项目顾问

杨建新	研究员	中国科学院生态环境研究中心
-----	-----	---------------

项目组成员

吕 彬	副研究员	中国科学院生态环境研究中心
-----	------	---------------

丁 宁	副研究员	中国科学院生态环境研究中心
-----	------	---------------

赵志岚	助理研究员	中国科学院生态环境研究中心
-----	-------	---------------

杨 光	博士研究生	中国科学院生态环境研究中心
-----	-------	---------------

余琳璐	硕士研究生	荷兰瓦赫林根大学
-----	-------	----------

张亚敏	硕士研究生	中国科学院生态环境研究中心
-----	-------	---------------

闫志琪	硕士研究生	中国科学院生态环境研究中心
-----	-------	---------------

摘要

随着人口增长、经济发展以及城市化进程，我国的生活垃圾产量逐年递增。国家统计局数据显示，我国生活垃圾清运量由 2008 年的 1.53 亿吨增至 2019 年的 2.42 亿吨，年平均增长率约为 3.3%。厨余垃圾是生活垃圾的主要组成之一，约占生活垃圾产量的 50%，若未得到妥善处理会为生态环境带来二次污染并对人体健康产生不利的影响。长期以来，我国处理厨余垃圾的主要方式仍是与其他生活垃圾混合进行卫生填埋或焚烧，需要通过严格的过程控制来满足无害化处理的要求，但依然对生态环境存在潜在的危害并为生活垃圾管理系统带来沉重的负担。2017 年以来，随着我国生活垃圾分类管理工作的深入推进，分类后的厨余垃圾作为一种二次资源受到社会的广泛关注。目前，类型众多的处理技术为我国厨余垃圾的资源化利用提供了多种选择，在很多地区已有推广应用。厨余垃圾分类处理是垃圾分类新形势下的新需求，但目前已应用的技术路线存在不同类型的绩效短板，其可复制性和可持续运行存在一定问题。发现这些技术短板或应用层面的问题，需要对厨余垃圾处理技术进行综合性的评价，以提出建设性的解决方案。

2019 年 12 月，在万科公益基金会的资助下，中国科学院生态环境研究中心承担了“厨余垃圾处理技术的多维绩效评价研究”课题。本研究基于全生命周期评价框架，从资源、环境、经济、社会四个维度综合评价目前我国投入应用的厨余垃圾处理技术，旨在为厨余垃圾资源化的技术应用提供经验借鉴和科技支撑。本报告第一、二章基于文献和行业调研，分析了我国厨余垃圾管理及技术应用现状，为厨余垃圾处理技术的评价体系研究提供技术背景信息；第三章在现有厨余垃圾处理技术综述的基础上，提出本研究资源、环境、经济、社会四维评价方法及其指标体系；第四章采用上述方法对三大类、16 个实际案例进行测评研究；第五章对我国厨余垃圾处理技术评价进行了总结和展望。

目录

第一章 厨余垃圾及其管理现状	1
(一) 定义	1
(二) 产量及性质	2
(三) 处理现状与政策法规	2
第二章 厨余垃圾处理技术	5
(一) 厨余垃圾源头粉碎直排.....	5
(二) 厨余垃圾厌氧消化技术.....	7
1. 湿式厌氧	8
2. 干式厌氧	9
(三) 厨余垃圾好氧生物处理技术.....	10
1. 条垛式堆肥	11
2. 静态强制通风堆肥	12
3. 阳光堆肥房	13
4. 简易容器式堆肥	14
5. 生物处理机	15
(四) 厨余垃圾微小食腐动物处理技术.....	16
1. 蚯蚓堆肥	16
2. 黑水虻和蝇蛆处理	18
(五) 厨余垃圾资源化热处理技术.....	19
1. 生物质热解	19
2. 生物质气化	21
(六) 厨余垃圾饲料化技术	21
第三章 厨余垃圾处理技术绩效评价方法	23
(一) 研究进展	23
1. 生命周期评价	23
2. 技术经济分析	25
3. 研究进展小结	27
(二) 技术评价的生命周期框架.....	27
1. 系统边界	28
2. 功能单元	28
(三) 四维绩效评价指标体系.....	28
1. 指标遴选原则	28
2. 技术就绪度	29
3. 指标体系	30

3.1 资源利用指标	32
3.2 环境影响指标	38
3.3 经济指标	41
3.4 社会指标	43
4. 评价方法	46
4.1 指标无量纲化	46
4.2 综合评价指数的计算	47
4.3 技术资料采集表	48
第四章 厨余垃圾处理技术评价案例研究	51
（一）集中式处理技术	51
1. 厌氧消化	51
1.1 干式厌氧 A	52
1.2 湿式厌氧 A	54
1.3 湿式厌氧 B	56
2. 好氧生物处理	58
2.1 好氧生化处理 A	60
3. 微小食腐动物处理	62
3.1 微小食腐动物处理 A	62
（二）分散式处理技术	64
1. 阳光房静态堆肥	64
2. 生物处理机	66
2.1 好氧生物处理 B	66
2.2 好氧生物处理 C	67
2.3 好氧生物处理 D	69
3. 社区堆肥	71
3.1 社区堆肥 A	71
3.2 社区堆肥 B	73
3.3 社区堆肥 C	76
3.4 社区堆肥 D	79
3.5 社区堆肥 E	81
4. 微小食腐动物处理	84
4.1 微小食腐动物处理 B	84
（三）终端处置技术	85
1. 填埋处置 A	85
2. 焚烧处理 A	86
（四）厨余垃圾处理技术多维绩效评价	88
1. 各技术类型横向对比	88
1.1 指标计算结果	88

1.2 无量纲化得分	92
2. 各资源化技术类型内对比	95
第五章 总结与展望	99
(一) 研究总结	99
(二) 展望	101
参考文献	103
附件 1: 近年开展的厨余垃圾处理项目代表	112
附件 2: 社区厨余垃圾处理实践调研报告	115
附件 3: 报告中的技术代号对应的案例名称	140

第一章 厨余垃圾及其管理现状

（一）定义

随着人口增长、经济发展以及城镇化进程的推进，我国的城市生活垃圾产量逐年增长^[1,2]。厨余垃圾是生活垃圾的主要组成之一，约占生活垃圾产量的 50%^[3-6]。一般而言，厨余垃圾是指生活垃圾中的剩饭剩菜、食物下脚料等易腐烂组分，但由于在城市中其存在不同的产生源，在国家技术标准中对其定义和范畴也发生了一定的变化。在《餐厨垃圾处理技术规范 CJJ 184》中，家庭和社区产生的食物下脚料、剩饭剩菜和瓜果皮等有机垃圾被称作为家庭厨余垃圾；餐馆、食堂等产生的餐饮剩余物、食物加工废弃物等为餐饮垃圾；二者总和为餐厨垃圾，家庭厨余垃圾涵盖在餐厨垃圾之下。上述定义中未包括城市农贸市场、生鲜超市产生的易腐垃圾（湿垃圾）。2019 年，修订的国家标准《生活垃圾分类标志 GB/T 19095》中，厨余垃圾包括家庭厨余垃圾、餐厨垃圾和其他厨余垃圾。其中，家庭厨余垃圾的范畴同 CJJ 184 一致；餐馆、食堂产生的有机垃圾称为餐厨垃圾；农贸市场和生鲜商超产生的蔬菜瓜果垃圾、腐肉腐骨等称作为其他厨余垃圾（见图 1.1）。目前，在我国已开展的相关项目中，餐厨垃圾项目一般是指餐饮、食堂等单位产生的易腐垃圾。目前已开展的厨余垃圾处理项目，一般是在 2017 年垃圾分类工作开展后投入建设的，用于家庭、社区、农贸市场、商超产生的易腐垃圾处理。上述定义的范畴虽然存在差异，但其核心范畴基本相同。本研究采用《生活垃圾分类标准 GB/T 19095》定义，将家庭厨余垃圾、餐厨垃圾和其他厨余垃圾统称为厨余垃圾，以便纳入更多相关技术进行比较分析。



图 1.1 厨余垃圾的定义和范畴

（二）产量及性质

关于我国厨余垃圾的总产生量，目前尚缺乏官方统计数据。有研究估算，我国每年产生的厨余垃圾不低于 6000 万吨^[7]，也有研究表明 2017 年我国厨余垃圾产量可能达到 9500 万吨^[8]。课题组通过对我国 135 个城市的垃圾组分数据进行人工神经网络建模，并采用地级市精度的垃圾产量数据进行计算，得出我国城市厨余垃圾产量在 2017 年为 1.15 亿吨。我国生活垃圾分类工作处于起步阶段，相关管理部门未能对厨余垃圾的产量进行统计与公布^[8]，加之与我国厨余垃圾管理现状相关的系统研究较少^[8,9]，致使厨余垃圾产量数据差异较大。不管采用何种方法测算，我国厨余垃圾产生量和处理量需求巨大，这已经成为行业的共识。从人均厨余垃圾产生量看，已有研究得出的数据范围为 0.05-1.63kg/cap.d，因食物消费和废弃的水平不同，人均厨余垃圾产生量存在明显的地区差异^[10]。

厨余垃圾的理化特性因饮食结构、气候条件等影响因素的不同也存在地区差异，总体上具备以下特征^[6,9,11-15]：1）易腐性。厨余垃圾极易腐败、产生恶臭并容易滋生病菌，为疾病传播提供媒介。2）高含水率。水分占厨余垃圾比例高达 60-90%，收运和处理过程中水分容易渗出并对周围环境（如道路、土壤、地表水）造成污染。3）低热值。湿基厨余垃圾热值仅为 2100 -3100 kJ/kg，难以直接用于焚烧发电（热值要求在 5000 kJ/kg 以上）。4）富含营养物质。厨余垃圾中有大量碳水化合物、蛋白质、脂质和营养元素（N、P、K 等），总糖和蛋白质含量分别达到 35.5-69.0%和 3.9-21.9%。5）弱酸性。收集至处理厂的厨余垃圾 pH 值介于 4.5-6.5，是影响生物处理如厌氧消化和堆肥的重要因素。

总体而言，厨余垃圾的产量伴随生活垃圾的递增不断增加，为了减少其对环境的污染和人体健康的威胁，厨余垃圾的减量化、资源化和无害化处理备受关注^[14]；另一方面，厨余垃圾的理化性质使其具有作为生物质资源被二次利用、发展循环经济的价值^[12,15]。

（三）处理现状与政策法规

我国的厨余垃圾管理目前刚刚起步，大致可分为三种情况^[7,9,16-18]：1）在未有效开展垃圾分类收集的地区，厨余垃圾同其他生活垃圾混合投放，并由环卫部门收运后采用填埋、焚烧等方式处理处置；2）在较早开展生活垃圾分类的地区，

一些厨余垃圾被单独收集运输,由终端的厨余垃圾处理企业加工得到堆肥、沼气、沼渣等资源化产品;3)部分城市开展了厨余垃圾分散处理的探索,即不进入集中式的生活垃圾收运处理系统,在社区、家庭、农贸市场进行源头处理。我国农村厨余垃圾的管理相对落后,大部分采用就近堆放、填坑填塘、露天焚烧、简易填埋等方式处理^[19]。近年一些地区开展了农村垃圾分类与资源化利用的工作,为我国推广农村厨余垃圾分类处理提供了宝贵的实践经验^[20]。

从处理量看,卫生填埋和焚烧是我国处理厨余垃圾的主要技术途径,根据2020年中国统计年鉴数据,2019年全国生活垃圾无害化处理量达23122.2万吨(为清运量的95.52%),其中卫生填埋和焚烧处理量分别为10948.0万吨和12174.2万吨^[2]。然而,填埋和焚烧在我国面临环境污染和经济损失的双重压力^[11]:填埋占据了大量宝贵的土地资源并且容易产生渗滤液、恶臭等二次污染,厨余垃圾等有机质经填埋会产生温室气体排放;焚烧垃圾不充分时会释放二噁英污染大气,混合垃圾中的厨余垃圾由于含水量高、脱水性能差而降低了焚烧生活垃圾的热能利用并增加处理成本。根据课题组调研,广州市焚烧和填埋垃圾的年均净收益分别为-2538万元/年和-1465万元/年^[21]。传统的生活垃圾处置方式还造成了我国对厨余垃圾中生物质资源的浪费,一些发达国家如美国、德国和日本采取大量政策和措施避免对可生物降解有机垃圾的填埋和焚烧处理,经有效的源头分类对厨余垃圾的资源化利用形相对成熟的产业链条^[22]。

我国厨余垃圾资源化利用的起步与发达国家相比较晚。2000年后我国餐厨废弃物资源化处理工作开始启动,但主要是针对“地沟油”“垃圾猪”等餐饮行业的废弃物处理问题,鲜少涉及家庭、农贸市场产生的厨余垃圾^[9]。2005-2008年间,上海、北京、西宁及宁波先行开展餐厨垃圾资源化工作,利用新兴的生物技术处理餐厨垃圾并生产有机肥、饲料等产品^[7]。2008年国家发改委、住建委在浙江宁波召开的全国城市餐厨垃圾资源化利用现场交流暨研讨会明确指出我国需要开展餐厨垃圾的资源利用工作并制定相关政策法规。2011年国家发改委联合住建部、环保部、农业部及财政部相继发布了《关于组织开展城市餐厨废弃物资源化利用和无害化处理试点工作通知》和《循环经济发展专项资金支持餐厨废弃物资源化利用和无害化处理试点城市建设实施方案》。国家发改委资助了覆盖32个省级行政区共计100个试点城市建设餐厨垃圾处理项目,至2020年共有16个城市(区)被撤销试点城市。为规范化餐厨垃圾处理工程的设计、施工及运行管

理，住建部制定了《餐厨垃圾处理技术规范》（CJJ 184），并于 2013 年正式颁布实施。目前已有 63 个城市已出台餐厨垃圾管理办法或条例，在法规层面上形成了专项收运、无害化处理和资源化利用餐厨垃圾的大氛围^[23]。大多数餐厨垃圾管理办法明确指出所需处理的餐厨垃圾为“居民日常生活以外的食品加工、餐饮服务、单位供餐等活动中产生的厨余垃圾和废弃食用油脂”，即 CJJ 184 定义的餐饮垃圾，家庭和农贸市场产生的厨余垃圾暂未列入管理范围。

除了大型餐厨垃圾处理项目，我国一些城市鼓励在社区内对厨余垃圾进行减量预处理或就地资源化^[12,24]。2012 年实施的《北京市生活垃圾管理条例》中提倡有条件的居住区和家庭配置符合标准的厨余垃圾处理装置；同年实施的《上海市城市生活垃圾分类设施设备配置导则（试行）》鼓励在区域排污管道具备条件的地区以及新建的全装修住宅内安装厨余垃圾粉碎机。作为国内最早实施全方位餐厨垃圾管理的城市，上海市在住宅区投入使用家庭厨余垃圾粉碎设备^[25]；北京的万科西山庭院小区利用黑水虻处理技术将住户产生的厨余垃圾转化为肥料^[26]；福建首个垃圾分类试点小区（三盛果岭）鼓励居民将厨余垃圾带至设于小区内的厨余垃圾生物处理机处生产有机肥作为指定蔬菜基地的肥料^[12]。虽然社区厨余垃圾处理在我国已有应用，但目前尚处于摸索阶段，其处理效果以及商业运行模式还有待优化提升^[12]。

厨余垃圾分类程度不足是制约其后端资源化利用的原因之一^[7]。尽管我国开展垃圾分类工作已有多年，但仍存在法规标准不完善、分类投放和收运设施不配套、居民参与率低等问题^[15,27]，但也取得了一定成效。例如，2014 年 6 月，2927 个实行垃圾分类的小区中厨余垃圾分出量不到实际产生量的 10%^[15]。而据最新统计，2020 年北京市厨余垃圾分出率已在 20%左右。2017 年我国发布《生活垃圾分类制度实施方案》，共有 46 个试点城市试行生活垃圾强制分类。2019 年住建部等部委发布的《关于在全国地级及以上城市全面开展生活垃圾分类工作的通知》明确要求厨余垃圾要分开运输并处理。目前，多个省市已出台或修订生活垃圾管理条例（北京、上海、太原、长春、杭州、宁波等），都要求单独投放厨余垃圾。分流后的厨余垃圾在数量和质量上得到提升，但从北京、上海等城市的实践看，目前厨余垃圾资源化利用设施的处理能力已存在一定的缺口。

第二章 厨余垃圾处理技术

随着垃圾处理分类工作的推进,我国对于厨余垃圾处理技术应用的需求日渐急迫。在进行自主研发的同时,国外先进的厨余垃圾处理技术以各种形式的合作形式进入我国^[28]。本节在文献资料查阅的基础上主要介绍目前国内外应用较多的厨余垃圾处理技术(图 2.1)。

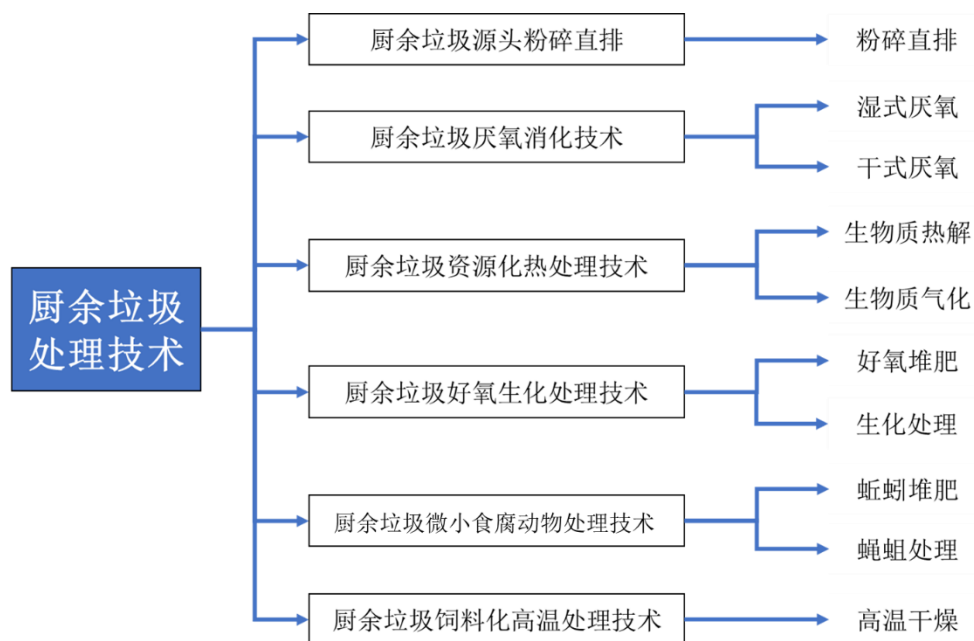


图 2.1 厨余垃圾处理的技术类型

(一) 厨余垃圾源头粉碎直排

厨余垃圾粉碎技术利用粉碎机将厨余垃圾研磨成细小颗粒,处理后的垃圾随污水排入下水管道,进入市政污水处理系统^[29]。厨余垃圾粉碎机一般安装在家庭厨房的水槽下方,由防腐研磨腔、研磨锤和研磨盘等部件构成,可广泛处理菜帮菜叶、果皮瓜壳、肉鱼骨刺、残羹剩饭等厨余垃圾^[17,29]。图 2.2.1 即为厨余垃圾粉碎机的三维剖面图,厨余垃圾进入到研磨腔后由刀片打碎,而后进入污水管网。

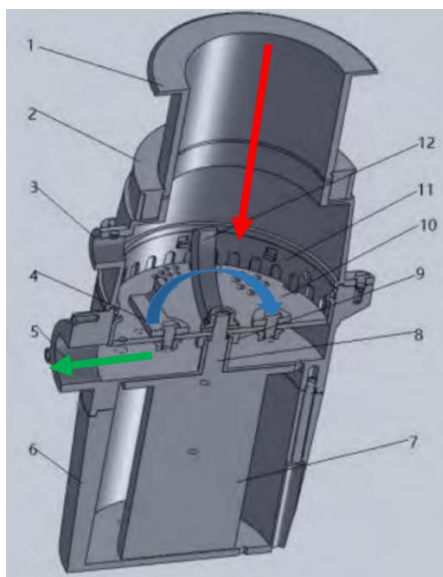


图 2.1.1 典型厨余垃圾粉碎机三维剖面图^[131]

(1、水槽凸缘法兰，2、装配环，3、外壳，4、旋转刀，5、外壳，6、外壳，7、电动机，8、转动轴，9、紧固件，10、旋转刀盘，11、固定刀，12、旋转刀片)

厨余垃圾粉碎技术作为一种源头减量处理具有以下优势^[12,17,29]：1) 降低生活垃圾分类收集、运输的难度和成本；2) 减少厨余垃圾的堆积和与外界环境的接触，从而减少臭味产生、蚊蝇滋生和病菌传播。但大面积应用厨余垃圾粉碎技术会为现有城市污水处理系统带来压力^[12,30]，可能存在以下问题：1) 对现有污水管网造成堵塞，除非管道具备充足空间或适当地改扩建；2) 城市污水中的有机质和油脂含量大大增加，终端处理设施富余的处理能力可能无法满足污水排放要求。对用户而言，厨余垃圾粉碎机存在购置费用高（均价 1200 元）以及噪音大等不足，若未正确进行厨余垃圾分类而将大骨棒、贝壳类等食物垃圾投入厨余垃圾粉碎机则易损坏设备^[12,17]。此外，我国的下水道存在雨水和污水管道混接的问题，厨余垃圾粉碎后可能被拍进河道，可能增加了病菌传播的风险。

美国是最早使用家庭厨余垃圾粉碎机的国家。1997 年以来即有不少家庭安装使用，多数是住宅开发商和市民自发行为，有一些城市进行了强制规定^[12]。欧盟于 2003 年鼓励其成员国根据自身实际情况如污水处理普及率进行厨余垃圾粉碎机的推广，丹麦、芬兰、挪威等国家要求新建住宅必须安装^[12]。我国住建部于 2001 年将家用厨余垃圾粉碎机列为住宅装修的重点发展项目和推荐配套产品，目前国内市场上品牌纷杂、型号各异。北京、上海、深圳有数百个中高档楼盘统一安装并加大住区排水管道管径，但存在因住户未完全掌握使用方法而导致使用率低的情况，另外也有个别家庭主动购买^[12,17]。刘荣杰等^[31]评估了深圳市污水厂对

家庭厨余垃圾粉碎直排的耐受能力,分析得出污水中固体悬浮物和有机质含量的增加超过终端污水处理设施的负荷余量,在现有市政污水官网的设计下,家庭厨余垃圾处理器的普及推广需要考虑住宅排水系统中的固液分离收集技术以降低污染物含量。

（二）厨余垃圾厌氧消化技术

厨余垃圾的厌氧消化技术是指在无氧或缺氧环境下利用厌氧微生物的新陈代谢对可生物降解的有机物质进行转化,最终生成以沼气、沼液和沼渣^[9]。其技术原理如图 2.2.1 所示,这一生物化学过程分为三个阶段^[12]: 1) 水解: 高分子有机聚合物如糖类、脂肪和蛋白质在消化细菌的酶解作用下被分解为可溶的中间代谢产物; 2) 产氢、产酸: 发酵菌群将水解产生的中间代谢产物分解为简单的无机物并将其降解为各种有机酸; 3) 产甲烷: 由产甲烷菌将部分简单有机物转化为沼气(主要由 CH_4 和 CO_2 组成)。沼气经净化提纯后可代替天然气供热或用于发电,是一种清洁能源; 发酵残余物通过固液分离产生沼液和沼渣,沼液经处理后排放或可制成液体肥料灌溉农田,沼渣被送至焚烧厂或填埋场处理或可通过好氧堆肥制成用于农作物的无公害基肥^[32]。厌氧消化系统的稳定性与沼气产量受到诸多复杂因素的影响,如进料的物化性质(含水量、碳氮比、pH、盐分等)、细菌接种物的数量和浓度、发酵温度、反应物料匀化程度等^[33]。根据目前已有应用的情况,常根据原料含固率差异将厨余垃圾厌氧消化技术路线处理分为湿式厌氧和干式厌氧两类^[34,35]。

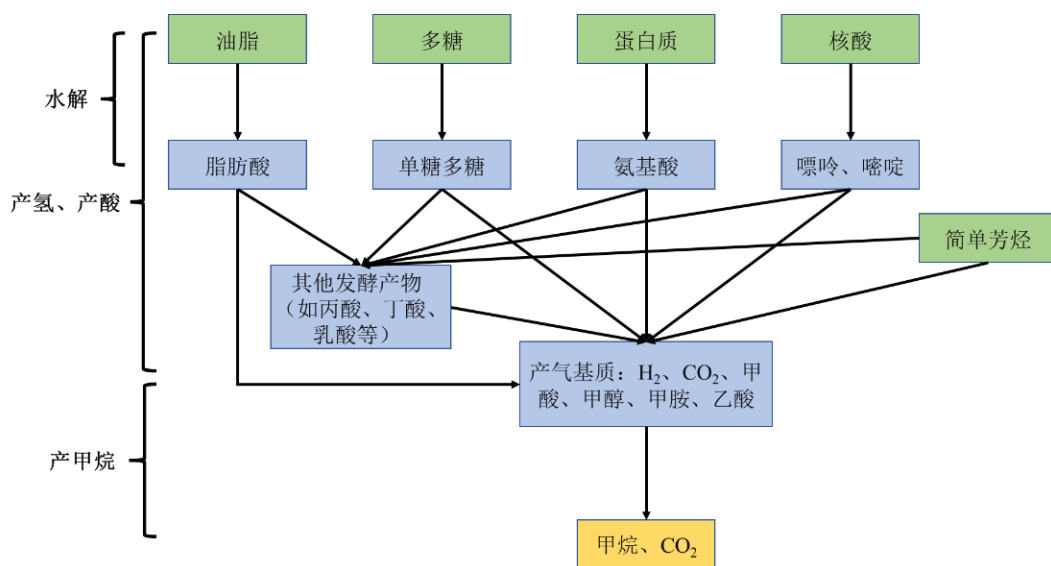


图 2.2.1 厌氧消化技术的基本原理

厌氧消化较早的应用在了较大规模的餐厨垃圾处理中,如山东青岛餐厨垃圾处理项目、浙江宁波厨余垃圾处理厂、广东广州南沙区餐厨垃圾处理项目等。近些年,多种有机易腐垃圾综合协同处理也受到关注,如蓝德环保公司在江苏泰州建设的餐厨废弃物资源化利用和无害化项目便将餐饮垃圾、厨余垃圾、市政污泥、粪便等物料协同进行厌氧消化,所需辅料小,易于调整各项参数,或可取得更好的经济和环境效益。

1. 湿式厌氧

湿式厌氧的发酵原料呈液态,固体含量一般在 10%以下。其主要优点在于原料液在搅拌下呈均相,易于质能传递从而提高生化反应速率,发酵罐内所需停留时间较短(约 10 天)^[35]。此外,虽然目前湿式厌氧消化工程稀释用水消耗量较大(约 1 吨水/1 吨垃圾)^[32],但经过多年餐厨垃圾项目的事件,湿式厌氧技术应用相对较为稳定。湿式厌氧处理厨余垃圾也存在以下不足^[32,36]: 1) 所需的发酵罐容积及设备占地面积大,不仅导致前期基建成本高,系统运行后搅拌设备的动力能耗也高,此外需要定期除渣避免沼气生产的间断; 2) 沼液处理投资高,湿式厌氧产气后分离出大量沼液,对沼液处理系统要求较高; 3) 难以满足垃圾分类收集逐步推进后新增厨余垃圾的处理需求。湿式厌氧消化器的有机负荷率较低,处理有机质的能力有限。

湿式厌氧是一种传统的厌氧消化技术,我国大型餐厨垃圾处理项目多采用湿式厌氧技术,工艺发展成熟^[35,37]。以普拉克环保公司为代表的重庆餐厨垃圾处理项目、长沙餐厨垃圾处理项目;以山东十方环保能源股份有限公司为代表的青岛餐厨废弃物收运处理项目、济南餐厨垃圾处理项目等均采用湿式厌氧技术^[35]。宁波作为我国第一个规模化处理餐厨废弃物的城市于 2009 年率先采用湿式厌氧处理餐厨垃圾,该工程由宁波开诚生态环保有限公司提供技术支持,总投资为 4000 万元,处理能力为 240 t/d,餐厨垃圾经压榨提油等预处理后产生的有机废水进入 2000 m³ 的升流式厌氧反应器进行发酵,年产沼气 260 万 m³,可发电 450 万 kWh^[38,39]。2009 年运行重庆黑石子餐厨垃圾湿式厌氧项目,总投资 27000 万元,使用 5 座高温厌氧消化罐(总容量 30200 m³),协同处理餐厨、厨余垃圾及市政污泥的能力达 1000 t/d,沼气产量为 7.2 万 m³/d,一半用于工厂内部发电,

一半制成压缩天然气^[40]。由山东十方环保能源股份有限公司建设运营（总投资 9000 万元）的青岛市餐厨垃圾湿式厌氧处理项目是全国首批餐厨废弃物处理试点城市中最早投产并进入商业化运营的项目，该项目占地 15000 m²，日处理能力为 200 t，于 2014 年进入商业化运营，产生的沼气提纯生产压缩天然气，发酵残渣堆肥生产营养土^[35]。湿式厌氧技术在我国有较多运行案例和经验可循，但实际处理对象多为餐饮企业、单位食堂产生的餐饮垃圾。

随着生活垃圾分类工作的推进，湿式厌氧也被应用到个别大型厨余垃圾处理项目中。由广州环投南沙环保能源有限公司投资建设的南沙区餐厨垃圾处理厂，设计处理能力 400 t/d，采用的工艺即为“预处理+厌氧消化”。于 2019 年建成的广州市李坑综合处理厂（占地 36000 m²）是目前我国已投产单体规模最大的厨余垃圾处理工程，该工程采用“大件分选+热水解+压榨制浆+湿式厌氧+废水处理+沼气发电”的工艺路线处理广州市中心六区的居民厨余垃圾以及农贸市场的厨余垃圾，处理能力达 1000 t/d^[41]。

2. 干式厌氧

干式厌氧技术旨在使固体原料保持原始状态进行发酵，消化底物的含固率通常为 20%左右^[32,36]。与传统湿式厌氧相比，干式厌氧的优势在于以下方面^[32,34,36]：1) 简化了处理流程，预处理无需制浆，处理过程中污水产生少，后期沼液处理需求小。2) 降低了基建成本和运行费用，进料体积的减少使得反应器所需占地面积小，沼液处理系统投入也相应减少。3) 由于发酵原料未经稀释，干式厌氧消化罐具有更高的有机负荷率，从而提高了沼气的生产能力。但厨余垃圾的高含水率会影响系统的稳定性，还会带来反应器进料有机物损失的问题^[28,35]。此外，由于反应基质浓度高、消化底物流动性差、反应器内传质缓慢，干式厌氧也面临着亟待解决的技术难题^[33,34,36]：1) 启动时间长；2) 搅拌不充分；3) 易积累过量挥发性脂肪酸（发酵中间产物）抑制产甲烷菌活性，从而影响产气速率；4) 整体工艺运行不稳定。

国外自 20 世纪 80 年代外就开始对干式厌氧消化进行研究，到 2002 年将该项技术投入工业级别应用，目前已经成功运行的规模化干式厌氧消化工艺以瑞士的 Kompogas 工艺、法国的 Valorga 工艺、比利时的 Dranco 工艺以及德国和芬兰的

Biocel 为代表^[34]。近年来我国在干式厌氧技术上取得的进展多数来自于理论性的小试研究,缺乏规模化、产业化的工程应用案例。为数不多的大型厨余垃圾干式厌氧处理项目主要从国外引进技术和设备^[32,34,36],例如,国内最大的厨余垃圾干式厌氧系统制造商德国泽尔曼公司与瑞士 INOVA 公司合作,2018 年相继向国内引进两座卧式单轴干式厌氧系统 Kompogas,分别用于重庆洛碛厨余垃圾处理工程(200 t/d)和南京江北区厨余垃圾处理工程(200 t/d);宁波市世行贷款厨余垃圾处理项目采用由首创环境公司引进的,按照“机械分选+立式干式厌氧+脱硫+变压吸附脱碳提纯”的工艺路线将厨余垃圾(400 t/d)转化为沼气;沈阳光大环保科技有限公司引进芬兰碧奥公司(BioGTS)的中温干式间歇有机垃圾厌氧消化工艺 Biocel,该工艺适合我国国情并具有发展潜力,目前处于立项研发阶段,此项技术最早于 1993 年被荷兰 Lelystad 处理厂采用,年处理能力为 5 万吨^[34]。虽然发达国家的干式厌氧工艺有一定的应用经验,但用于我国厨余垃圾的处理需要充分考虑本土适应性。上海普陀生活垃圾生化处理项目早在 2008 年引进法国 Valorga 干式厌氧技术,总投资 3.5 亿元,但难以保证项目的连续稳定运行;同样采用 Valorga 工艺的宁波厨余垃圾项目同样也存在稳定运行的问题^[42]。

(三) 厨余垃圾好氧生物处理技术

厨余垃圾的好氧生物处理技术是指利用自然界存在的好氧微生物或人工培育的复合微生物菌群对有机垃圾进行降解产肥,本节内容包括几种不同类型的好氧堆肥以及生化产肥。

好氧堆肥的基本原理是在氧气充足和有一定水分的条件下,借助好氧微生物(细菌、真菌及纤维素分解菌等)降解有机质,微生物的细胞壁和细胞膜能够直接吸收可溶性有机物,不溶性有机质由微生物分泌的胞外酶分解为可溶物质后渗入细胞。图 2.4.1 即为好氧堆肥的基本过程。这些被吸收的有机质进一步通过微生物的分解和合成代谢,被氧化为简单的无机物或转化为新的细胞物质供微生物生长繁殖^[12]。好氧生物处理可大致分为三个阶段^[12]: 1) 升温阶段,嗜温细菌利用淀粉、糖类等易分解的有机物进行繁殖并释放热量; 2) 嗜热阶段,随着温度升高(可达 70℃),各种嗜热微生物继续分解有机物形成不可降解的腐殖质,复杂的有机物如纤维素等开始被降解,同时高温环境致使虫卵及病原菌失活; 3) 腐熟阶段,微生物活动逐渐减弱,温度随之降低,腐殖质不断积累并稳定化。

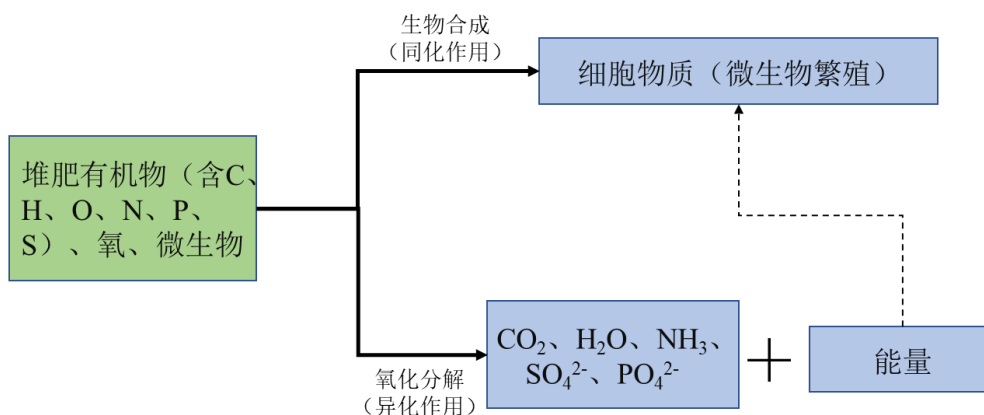


图 2.4.1 好氧堆肥原理

好氧堆肥的过程十分复杂，其效果受到各种物理、化学和生物因素的影响^[12]：

- 1) 适宜的堆肥温度在保证微生物生长代谢的同时起到杀灭病原菌的作用，通常以 55-60℃ 为宜；
- 2) 堆料含水量过高会造成局部厌氧，过低则降低微生物活性，一般需要维持在 40-60%；
- 3) 碳氮比 (C/N)，原料有机碳过多易释放 CO₂ 而引起有机碳的损失，过低会产生较多的氨而散发臭味并造成有机肥中氮素的损失，20:1-30:1 是较为合适的比值；
- 4) 通风是满足堆肥需氧量的一个重要控制条件，此外能够防止堆层体内温度过高。
- 5) 适宜的颗粒大小不仅增加物料与微生物的接触面积还有利于氧气流通。

好氧堆肥过程一般有四个步骤^[12,57,58]：1) 前处理。对垃圾进行分拣、筛分、切碎、和调节水分等，含水量高的如厨余垃圾需要与水分相对较低的如稻草、谷壳、干草、干树叶、木片等混合，否则产品质量受到厨余垃圾成分的制约。2) 高速阶段 (45-60 d)。耗氧速率高、温度高、挥发性有机物降解速率很高。3) 熟化阶段 (30-120 d)。温度低、耗氧速率低；4) 后处理阶段。对堆肥产品的筛分和储存。我国制定了《生活垃圾堆肥处理技术规范》(CJJ52)，对大型堆肥工程垃圾的收运、工厂选址、堆肥工艺参数、辅助设施、环境保护和安全生产等作了详细规定。根据文献查阅，好氧堆肥技术种类和形式多样，本节主要介绍条垛式堆肥、静态强制通风堆肥、动态容器式堆肥、阳光房堆肥和简易箱式堆肥。

1. 条垛式堆肥

条垛式堆肥是一种传统的堆肥技术，将混合均匀的原料在土质或水泥地面上堆制成长条形堆垛，通过定期使用人工或机械进行翻推来满足通风的需求^[59]。堆

垛的断面通常为梯形、三角形或不规则四边形，堆体规模以底宽 2-6 m、高 1-3 m 为适宜^[57,60]。堆体太小不仅占地面积大并且由于保温性差导致灭菌效果差，而堆体过大易形成局部厌氧区域^[61]。条垛式堆肥可用于社区（尤其是农村地区）和大中型堆肥厂的厨余垃圾处理，在社区的设置通常十分简易，而工业化条垛式堆肥系统则对排水系统、翻推设备、场地构造等有一定需求^[57]。

条垛式堆肥最突出的优点是操作简单、投资成本低，此外堆肥产品腐熟度高、稳定性较好^[60,62]。但条垛式堆肥的不足之处较多：1）占地面积大。受堆体高度的限制，条垛式堆肥的场地利用率较低；2）作业环境较差，污染难控制。定期翻推是一种间歇性供氧方式，条垛中心易形成厌氧区产生氨并在翻推过程中散发大量臭味，此外渗滤液的流出污染场地及周边环境；3）对于简易的露天堆肥，受降雨等不良天气的影响，难以保证堆肥效果；4）对于机械化程度高的条垛式堆肥系统，翻推设备耗能和投资高。

条垛式堆肥在美国和加拿大应用较多，其工业堆肥机械化程度高，研制出功能多样（翻推、曝气、搅拌、喷水等）、规格齐全的条垛翻推机设备，提高了堆肥效率^[59]。例如，美国 CT718 型条垛式翻抛机通过滚筒进行通风加氧的同时还可实时检测翻抛物料温度、湿度并根据需要及时调节，处理量为 3000 m³/h；德国生产的最大的翻推机配套动力达到 447 kw，处理量高达 6000-6800 m³/h；KOMTECH 等公司生产的大型机还配备可视操作系统，操作者能够随时评估机器的工作状态进行及时操作^[59]。目前我国绝大部分有机肥生产厂家采用的都是条垛堆肥，翻推设备以中小型的螺旋转鼓式为主，结构功能单一，并没有形成齐全的规格和种类^[60]。

2. 静态强制通风堆肥

静态强制通风堆肥通过鼓风机以及与之连接的通风管道对料堆进行强制通风供氧，维持好氧微生物的数量和多样性，防止堆体局部厌氧产生臭气，无需对料堆进行翻推^[57]。穿孔通风管道置于堆肥场地表面或地下，通风方式采取正压通风或负压通风或两者同时应用^[63]。静态强制通风能够灵活控制堆体的通气和温度，有利于减少堆体占地面积，缩短堆腐时间及有效杀菌和控制臭味^[64]。但鼓风机、管道等设备的安装和维护需要大量成本和技术支持，堆肥过程中无混合搅拌容易造成最终堆肥产品质地不均^[64]。

我国静态强制通风堆肥的实例有北京市南宫堆肥厂,该厂是目前国内连续运转时间最长、规模最大的垃圾堆肥厂,目前可处理有机垃圾 2000 t/d^[65,66]。堆料在密闭仓式隧道进行高温发酵,通过温度-通风反馈系统自动开启与关闭通风装置,控制通风量大小、调节温度和氧气,堆体温度以 55-65 °C 持续 7 d 以上,保证了微生物对氧气的需求以及灭菌效果^[67]。国外将静态强制通风技术与其他技术结合以改善作业环境和堆肥效果,Al-Alawi 等^[68]将静态强制通风堆肥与 GORE 膜覆盖系统结合进行工业规模堆肥,随着垃圾分解固定在堆料上的覆膜内侧会形成一层完好的水膜,堆肥产生的气体凝聚在水膜内,随后掉进堆层继续被细菌分解,有效控制了臭味和温室气体的散发。这种组合具有更长的嗜热阶段,加速了有机质的分解,将传统堆肥技术所需的 90 - 270 d 堆肥周期缩短至 30 d,目前全球有 150 多家工厂使用,处理量从 6500 - 600000 t/a 不等^[69]。

3. 阳光堆肥房

太阳能辅助静态仓式堆肥是一项近年来在我国农村地区较为流行的堆肥技术,通过安装在阳光堆肥房屋顶的采光玻璃对堆料进行太阳能辅助加温,具有建设成本和维护费用低、操作简单、处理环境密封性好等优点^[70,71]。该方法存在的主要问题是^[20]: 1) 保温效果受季节性影响显著,冬季低温下无法正常运行; 2) 处理周期长。由于缺乏对堆肥原料含水率等参数的调控,发酵周期一般在 60 d 以上; 3) 设施不够完善。不少阳光房没有破碎、翻推、曝气、喷淋排水设施等,影响整体堆肥效果。在管理过程中阳光堆肥房也存在一些问题,例如一村一建的建设布局面临整合使用的情况;垃圾分拣不到位延长了处理时间和出肥品相;堆肥产品质量保证以及宣传不到位,农民对堆肥产品的接纳程度不高^[72]。

浙江省金华市自 2014 年开展农村生活垃圾分类试点工作以来建设了 2047 座阳光堆肥房,单村阳光堆肥房建设投资 10-15 万元,堆肥时间 2 个月左右,目前约有一半运行良好^[73]。设施完整的阳光堆肥房配备采光玻璃聚热、多孔管道通风供氧、活性炭除臭、污水渗滤液收集处理等,并辅以人工菌种投放和加湿^[72,73]。2017 年浙江金华的“阳光堆肥房”就地资源化利用被住建部作为农村生活垃圾处理经验向全国推广。浙江杭州、江苏徐州沛县也较早推行阳光堆肥房,分别有 206 和 34 个站点^[20],如今福建、广东、湖北、云南等地均开始利用太阳能辅热堆肥处理农村及城市厨余垃圾(表 2.1)^[70,72-76],产出的肥料一般用于还田增肥。

2020 年国家标准《农村易腐垃圾太阳能辅助堆肥处理技术规范》征求意见稿，将处理规模划分为< 0.5 t/d, 0.5-1 t/d, 1-2 t/d 和> 2 t/d, 另外对易腐垃圾的收集运输、选址要求、处理单元设计、发酵过程、污染控制、质量检测、运行管理等要素做了详细规定。

表 2.1 我国部分城市阳光堆肥房案例

省份	地点	运行年份	处理能力	占地面积	服务范围
福建	福州市	2017 年	1.5 t/d	90 m ²	处理 13 个城市垃圾分类试点单位的厨余垃圾，包括大学、居民小区等
广东	信宜市北逻村	2017 年	—	90 m ²	满足社区 5000 多人人口的可堆肥垃圾处理需要
湖北	武汉市黄陂区祁家湾街	2018 年	500 kg/d	—	服务面积 29 km ² ，涉及 11 个行政村
江苏	连云港市江浦村	2018 年	—	—	—
云南	临翔区章驮乡户远村	2019 年	—	650 m ²	—

4. 简易容器式堆肥

简易容器式堆肥通常利用结构简单、能够与空气较好接触的堆肥容器对社区居民产生的厨余垃圾以及绿化区域的园林垃圾进行自然堆肥。堆肥容器根据材质、形状的不同有多种分类，最常见的是体积为 1 m³ 左右的木质堆肥箱。经过数月发酵所产生的有机肥可以用于改善社区绿化区域土壤的土质、提供给近郊的有机农场等。社区简易容器式堆肥可以作为一种社区环保教育鼓励居民亲自参与和见证厨余垃圾成为有机肥料的自然生态过程，此外，堆肥原料易得，操作简单，经济成本非常低，能够实现厨余垃圾源头减量和资源化并减少了厨余垃圾的收运。但社区简易容器式堆肥的推广应用要考虑多方面的因素：1) 管理模式。社区堆肥通常是小区自发行为，需要由具备堆肥知识或经过相关培训的居民自愿进行长期的专业管理；2) 宣传与教育。社区堆肥是一项需要居民积极参与的活动，厨余垃圾的正确分类和堆肥的正确操作是保证堆肥效果、减少堆肥对环境影响的重要因素，需要通过足够的宣传与教育引起居民的兴趣、重视和配合；3) 气候条件。尽管社区简易容器式堆肥几乎没有技术难度，但由于堆体体积小，寒冷天气

下的保温效果差，存在无法满足高温消毒灭菌要求的问题。

简易容器式堆肥在美国的社区有许多成案例以及详尽的技术和管理指南。纽约市的社区堆肥项目于 1993 年由纽约市卫生局发起，鼓励开展家庭和社区堆肥并为市民提供堆肥教育和技术支持，迄今纽约市已有超过 200 个社区堆肥点，每月处理家庭有机垃圾的容量从 5 kg 到 3 t 不等，如今这些堆肥点已形成一个提供经验共享的堆肥网络^[77]。南京大学（溧水）生态环境研究院在万科公益基金会的资助下启动“中国厨余堆肥试点项目”，旨在逐步形成具有中国特色的厨余垃圾分散式堆肥模式。青岛你我社会工作服务中心作为执行机构之一在青岛 3 个社区开展了简易箱式堆肥，堆肥成品经过育苗试验显示有机物含量和发芽率都达到相关要求^[78,79]。由万科公益基金会和北京沃启公益基金会支持的“堆肥花园在社区”项目于 2019 年在郑州市绿城社区启动，将厨余垃圾与落叶 1:1 混合在木质堆肥箱内堆肥，在四个月内得到约 9 t 的腐熟肥料，稀释后用于培育堆肥花园内种植的观赏性蔬菜^[78]。

5. 生物处理机

生物处理机堆肥技术通过添加高效降解功能菌种和控制反应条件在相对较短的时间内高效地将大部分有机物制成肥料，使用设备为资源型生物处理机，由机体、进/出料口、搅拌系统、机电系统、温控/通气/除臭/调湿装置等部件组成^[80,81]。在机体内，有机垃圾中的高分子化合物（纤维素、蛋白质、脂肪等）经过一系列复杂的生化反应转化为小分子物质如 CO_2 、 NH_3 、有机酸等，这些物质再经分解全部从处理机中蒸发排出，最终剩下无毒无臭且富含各种营养成分的肥料^[82]。生物处理机构造简单、操作方便、占地面积小、机型和处理能力多样，可根据有机垃圾特性和用户要求配备合适的处理机^[83-85]。但生物处理机的设备费用及运行成本较高，此外由于餐厨垃圾中的盐分在堆肥出料中仍有较高比例，产生的肥料可能会影响土壤质地和农作物生长^[83,84]。我国住建部发布了行业产品标准《有机垃圾生物处理机》（CJ/T227），对设备的关键性能指标（减重率、耗氧速率、结构、产物、污染物排放）做出说明以及要求。

北京市在 2010 年左右着手探索了生物处理机的应用。据报道，厨余垃圾、餐厨垃圾等有机废弃物在高温复合微生物菌群作用下，经过 8-10 小时 60-80℃ 温度下的降解、缩合、聚合反应被转化为安全级别较高的生物腐殖酸肥料^[86]。北京

朝阳高安屯餐厨废弃物资源化处理厂（400 t/d）是目前国内自动化程度最高的餐厨废弃物资源化处理站，该厂即采用嘉博文公司所产的 BGB-SCZ-3000 大型有机垃圾生物处理机，年消纳餐厨废弃物 13.2 万吨，生产生物腐殖酸 8 万吨，直接减排 CO₂ 至少 15 万吨以上。生物处理机在衢州市餐厨废弃物资源化处理厂（120 t/d）、成都中心城区餐厨垃圾处理厂（200 t/d）等均有应用，所生产的生物腐殖酸肥料在当地蔬菜瓜果等农业基地进行了应用示范。上海市十多年前就在一些垃圾集中处理点应用生化堆肥，多个厂家生产的生物处理机分布于不同的垃圾处理点^[87]。陈展等^[87]对上海市生物处理机使用现状进行调研发现不同厂家生产的生物处理机性能表现差异大，有的连续运转效果好、臭气问题不明显但有废水排放且菌种费较高，或采用废水循环利用但电费较高等。从生化处理的经济收益来看，上海金山生化处理站处于收支平衡状态，所生产的有机肥由原理绿化部门无偿使用，企业处理 1 t 垃圾政府补贴 80 元；上海普陀和长宁区年总投入 180.1 万元（厂房、设备折旧、水电、菌耗、人工等），政府补贴和有机肥销售总收入 192.64 万元，但未考虑运输成本，有机肥销路并不畅通^[87]。

（四）厨余垃圾微小食腐动物处理技术

微小食腐动物处理技术以厨余垃圾肥料化为导向，通过食物链将有机废弃物转化为其他生物种类的营养物质，先后发展出利用蚯蚓、蝇类、黄粉虫、面包虫、美洲大蠊等微小食腐动物处理技术路线，产物包括肥料以及虫体本身^[88,89]。本节主要介绍蚯蚓堆肥与蝇蛆处理技术。

1. 蚯蚓堆肥

蚯蚓堆肥是一项新兴的堆肥技术，利用蚯蚓自身丰富的各种有机物分解酶及其新陈代谢功能与环境微生物的协同作用对有机废弃物进行降解与腐熟^[89]。与普通堆肥不同，蚯蚓堆肥一般分为两个阶段^[89]：1）活跃期。有机质原料被蚯蚓嚼碎，从而增大微生物与底物作用的表面积、刺激微生物的生长代谢，同时蚯蚓内脏中的多种酶和肠道微生物菌落可加速分解有机质中的纤维素及蛋白质成分并促进胞外酶的分泌，加快有机碳、含氮化合物等的降解；2）类腐熟期。活跃期大量繁殖的微生物开始逐步代替蚯蚓对底物进行进一步降解与最终的稳定。蚯蚓堆肥的周期约为 75-250 d，产物除了可直接用作高效肥料的堆肥外还有富含高

蛋白的蚯蚓^[90]。适宜的温度（27-35℃）、湿度（40-55%）、C/N（约 30:1）及 pH（5-8）是保证蚯蚓堆肥效果的重要因素，此外，蚯蚓堆肥需要选择合适的蚯蚓品种以及接种密度^[90]。目前国内外研究最多的种类是爱胜属（*Eisenia*），其生长周期短（成熟期约为 4-6 周）、繁殖率高，该种蚯蚓的接种密度一般以 27-53 条蚯蚓每千克有机质底物为合适范围^[90,91]。

与一般堆肥相比，蚯蚓堆肥技术的优势主要在于^[89,92-94]：1）增加微生物的活性及多样性，提高有机肥生产速度；2）堆肥含有较高的氮磷等养分（普通堆肥嗜热过程的气体挥发易造成营养元素的流失）且更均质化（得益于蚯蚓的蠕动）；3）减少温室气体排放（ NO_x 和 CH_4 ）；4）蚯蚓可用于翻新土地、改良土壤，其本身具有作为高蛋白动物饲料的潜力，蚯蚓粪也能用作有机肥；5）成本较低，无需复杂设备，具有一定的经济效益。但蚯蚓堆肥的产品安全性能难以保障，由于反应体系温度通常在常温范围内变动，堆肥病原体去除的效果无法保障；同时由于生物富集作用，蚯蚓体内可能会积累重金属等有毒物质，从一定程度上影响了蚯蚓的再利用^[95]。此外，若堆肥有机底物含油脂量和盐分较高，可能造成蚯蚓生物降解能力的退化^[96]。

蚯蚓堆肥在许多发达国家流行较早并得到政府与社会团体的大力支持^[93]：加拿大于 1970 年建立了第一个商用蚯蚓垃圾处理厂；美国的市场上有成套蚯蚓堆肥工厂化设备出售，现有蚯蚓养殖场每天可以处理 150 t 垃圾，蚯蚓生物有机肥的售价比一般化肥高 2-3 倍；日本对 800 个市街村提供蚯蚓处理生活垃圾的大额补助金并面向儿童促进蚯蚓堆肥的普及教育；2000 年的悉尼奥运会利用 160 万条蚯蚓处理奥运村的生活垃圾，开启了绿色奥运的先河。国外小型蚯蚓生物反应器和蚯蚓垃圾箱的出现为将蚯蚓处理厨余垃圾普及到家庭以及推向市场提供了坚实的基础。日本开发的蚯蚓堆肥家庭厨余垃圾处理桶由再生塑料加工成型，桶内设有防止蚯蚓外跑的结构，同时还能对蚯蚓的粪便进行脱臭处理，基本无异味散发，可放置在阳台的位置^[97]。我国一些城市开展了利用蚯蚓堆肥处理餐厨垃圾的试验，例如，江苏省扬中市餐厨废弃物蚯蚓资源化处理技术项目于 2018 年通过专家技术评审，目前每天能够处理 3 t 餐厨垃圾^[98]；上海科林蚯蚓孵化养殖基地将普通堆肥需求与蚯蚓堆肥结合，每天消纳 120 t 嘉定区江杨农产品市场的有机废弃物以及黄浦区的餐厨垃圾^[99]。

不论是大规模应用或家庭、社区分散式处理，蚯蚓清生产、蚯蚓堆肥产物的

标准化、产业的一体化和规模化是一个长期发展的过程，将蚯蚓堆肥肥料引入生态农业还需要对如何便捷快速去除废弃物中的重金属以及蚯蚓对病原菌的灭活机理进行进一步研究。

2. 黑水虻和蝇蛆处理

黑水虻与蝇蛆处理技术的基本原理与蚯蚓堆肥类似，利用昆虫幼体生长代谢的过程在对有机废弃物进行转化，除了对基质有翻转、通风等物理作用，蝇蛆体内丰富的酶结构能够降解碳水化合物、蛋白质、脂肪等^[100]。蝇蛆处理技术的处理周期约为 4-27 d，产生的肥料需要再经过 2-4 周的熟化^[89]。

黑水虻(*Hermetia illucens*)又名亮斑扁角水虻，是一种腐生性的水虻科昆虫，能够取食禽畜粪便和生活垃圾，生产高价值的动物蛋白饲料，其繁殖迅速、生物量大、食性广泛、吸收转化率高、容易管理、饲养成本低、动物适口性好等特点，是一种典型的资源昆虫，已在全世界范围内得到推广。黑水虻具有特殊的生活习性 & 生长规律，在处理厨余垃圾上有一定的优势^[101-103]：1) 食谱广食量大、对油盐不敏感。黑水虻幼虫可摄取大量种类不同的食物垃圾，容易饲养；2) 发育周期适中，仅幼虫摄取食物。相对于其他蝇类品种 4-5 个月的养殖周期而言，黑水虻幼虫生长期仅为 2-3 周，可快速繁殖，场地、设施等需求等大幅降低。黑水虻处理餐厨垃圾所获得的虫蛹富含蛋白质(42%)和脂肪(29%)，既能被用于制作饲料以代替价格大幅上涨的常规动物饲料鱼粉和豆粕，还可作为新型优质原料提炼生物柴油，具有市场潜力和经济价值^[102]。目前黑水虻处理厨余垃圾的技术路线还处于探索和优化阶段，有以下问题有待进一步解决^[102,104,105]：1) 黑水虻处理厨余垃圾过程中病原菌的灭活规律尚待研究；2) 黑水虻适宜在温暖的环境下生存，气温大于 26℃才会产卵，寒冷气候条件下饲养黑水虻需要大大增加供暖成本；3) 回收后的黑水虻销售渠道不稳定，经济可行性、下游产业链构成、相关政策与法规还有待考量。

国内近几年对黑水虻处理技术的研究较多，也有企业进行生产性尝试。姜慧敏等^[100]研究发现厨余垃圾经过 18d 的黑水虻处理后减量率为 74%，大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌及金黄色葡萄球菌的灭活率达 99%，为黑水虻处理厨余垃圾的卫生安全性及可行性提供了实验依据。我国广东、四川、浙江等地均有利用黑水虻处置餐厨垃圾的生产案例，广州市花都区建立了日处理 2 t 的黑水虻幼虫处理

餐厨垃圾实验基地进行规模化繁殖技术的熟化^[106,107]；广东省惠东县铁涌镇一座于 2015 年建成的黑水虻养殖场每天可处理 7.8 t 餐厨垃圾并产生 1.3 t 幼虫，初步达到了规模化效应^[88]；位于浙江缙云县舒洪镇的洺圆生物科技有限公司从河南农大引进黑水虻虫卵进行繁育，每天有 4-5 t 农村厨余垃圾经粉碎制浆后喂养黑水虻幼虫^[108]；杭州市余杭区崇贤街道的垃圾处理中心使用黑水虻处理附近居民的厨余垃圾，2016-2017 一年共处置厨余垃圾 800 余吨，做到厨余垃圾不出街道就地消化^[109]；广州市白云区江高镇与于 2017 年运行黑水虻处理餐厨垃圾项目，总投资 3500 万，每天可处理 100 t 餐厨垃圾^[110]。

黑水虻作为动物蛋白饲料在一些发达国家受到地区法律的限制，例如欧洲食品安全局颁布的饲料禁令禁止使用昆虫的加工动物蛋白用作养殖动物的饲料。但美国食品与药物管理局（FDA）于 2016 年率先取消了食用昆虫作为动物饲料在法律上的壁垒，批准用黑水虻作为鲑鱼养殖饲料；加拿大公司用食物垃圾饲养的黑水虻在经过 4 年的产品安全性评估后被加拿大食品检验局（CFIA）于 2016 年批转作为家禽饲料^[111]。一些发展中国家在缺乏相关严格标准的情况下使用昆虫蛋白喂养动物，例如南非 AgriProtein 生产的黑水虻幼虫已获准在南非销售^[102]。AgriProtein 是全球最大的黑水虻工业饲料生产商，成立于 2008 并于 2014 年在开普敦建造了一座商业规模工厂（占地 9000 m²），每天处理 250 t 食物垃圾，产出 7 t 黑水虻幼虫、3 t 生物柴油以及 20 t 有机肥料^[102]。Bosch 等^[104]提出需要开展更多对黑水虻处理食物垃圾产物食品安全风险的评估以放宽欧盟法规，用黑水虻幼虫替代常规饲料，减少对环境影响大的常规饲料生产。

（五）厨余垃圾资源化热处理技术

资源化热处理技术使有机废弃物在高温下的物理化学过程中转变为不同产物，主要包括生物质热解和气化。

1. 生物质热解

生物质热解指在缺氧条件下采用高升温速率、短产物停留时间以及一定的反应温度将有机高聚物分子迅速断分解为短链组分，最终生成生物油、生物质炭以及不可凝气体^[43]。生物质热解可分为慢速热解和快速热解，慢速热解以 4 °C/min 左右的升温速率将温度升至 400 °C 并将反应时间控制在几小时内，产物主要为生

物质炭；快速热解在数秒内将反应温度升至 800-1300 °C，主要用于生产生物质油^[43]。热解的过程一般包括物料的脱水干燥、粉碎、热分解、产物和灰分的分离、气态生物油的冷却及收集等，通常要求物料的含水量在 10%以下，为了达到很高的升温速率，进料颗粒要小于一定尺寸^[43]。

利用生物质热解处理厨余垃圾有以下几项优点^[44,45]：1) 空气污染小。由于热解在缺氧条件下进行，垃圾中所含的氮、硫等在热解过程中保持还原状态，SO_x、NO_x 等污染性气体以及 CO₂ 排放量很少，反应过程中也几乎不产生二噁英；2) 重金属污染小。有机垃圾中的重金属大部分被固定在生物质炭中，可以从中回收金属；3) 产物具有多重利用价值。生物质炭可用于改良土壤、通过贮碳缓解气候变化或作为吸附剂用于污水处理，生物质油可以直接燃烧使用，精制提炼后可以作为内燃机等动力设备的燃油，另外还可作为化工原料使用；4) 可根据需要通过改变反应条件来调整不同产物的收率。但利用热解法处理厨余垃圾具有能量损耗大、难以控制反应参数、运行和维护成本高的问题^[43,46]。热解处理需要严格控制反应工艺以满足对产物的需求，否则会影响产物产出，例如，生物油在收集的过程中容易冷凝造成堵塞从而严重影响设备使用寿命，温度及挥发分的冷却是影响生物油产率的重要因素^[47]。此外，利用食物垃圾产生的生物质炭一般具有较高的盐分，可能不适合作为土壤改良剂^[48]。

目前利用生物质热解处理厨余垃圾的研究尚处于初步探索阶段，研究对象多为单一食物垃圾例如马铃薯皮、鱼骨等^[48]。一些研究着眼于热解法处理餐厨垃圾所含难以被厌氧微生物消化的物质，例如骨头、高纤维类以及混入餐厨垃圾的塑料等，此类物质目前主要处理方式是填埋和焚烧^[49,50]。黄博^[50]以餐厨垃圾厌氧消化预处理环节分选的有机废物为研究对象设计热解工艺流程，依托处理能力 50 t/d 的餐厨垃圾处理厂建设了示范工程。经预处理分选后的餐厨垃圾被送入热解反应炉进行反应（450-550°C），产生的热解气在燃烧室燃烧作为热解用热源；高温烟气进入余热利用系统回收热量，用于物料干燥；热解后的生物质炭通过密封水冷螺旋输送机冷却落入炭渣储罐。该工程设计每天热解处理 15 t 餐厨垃圾分选废弃有机物，热解设备处理量为 300 kg/h，项目的工程受益主要来自生物质炭产品销售收入、余热回收利用收入以及减少餐厨垃圾填埋带来的经济效益，从环境效益来看每天实现碳减排量至少 1.15 t。Elkhalifa 等^[51]指出用热解法处理食物垃圾来生产生物炭具有可行性以及优势，未来研究方向包括：1) 提高工艺过程的

可持续性和经济性；2）研究食物垃圾与不同类型有机垃圾的共热解；3）微波的辅助作用；4）借助建模和实验，优化工艺设计和反应条件（热解温度、停留时间等），以满足生物质炭特定用途（例如土壤改良剂、污染物吸附剂）所需的物化特性。Giroto 等^[52]认为利用热解法处理厨余垃圾具有相当的潜力，但该项技术的有效性在很大程度上取决于垃圾的成分，在我国的规模化应用较少。

2. 生物质气化

生物质气化是一个在高温有氧环境下将含碳有机质转化为合成气（CO 和 H₂）的热化学过程^[53]。反应温度为 700-900 °C 时，生物质与氧气或水蒸气发生部分氧化反应，气化后的残留物主要是灰分^[54]。有机垃圾气化可以产生富氢合成气，用作生产附加价值较高的产品，如化学药品（甲醇等）和燃料。此外，与一般的焚烧相比，气化成本较低^[55]。但食物垃圾的高含水量、低热值以及组成复杂的性质使气化这一热化学过程面临诸多技术难题以及经济适用性问题，此外气化的气体产物为作业环境带来了一定的风险，例如 H₂ 泄露容易爆炸^[55,56]。目前未见针对厨余处理专用气化技术工艺的报道^[55]。

（六）厨余垃圾饲料化技术

饲料化高温处理技术主要通过脱水处理和加热干燥对厨余垃圾进行消毒、通常利用脱水压榨机对物料进行压榨和脱水脱脂，脱出后的半干物料进行高温干燥灭菌以去除多余的水分和各种病原微生物，另外也有采用高温蒸煮、低温油炸等工艺进行灭菌处理^[112]。干燥除菌后的物料被粉碎、称重并包装。该技术处理厨余垃圾的优点是操作简单、成本低、占地面积小、饲料生产周期短；缺点是要求垃圾存放时间短，避免其腐烂变质，此外厨余垃圾脱水后热传导性能降低，容易因干燥灭菌过程受热不均导致碳水化合物组分发生褐变，从而影响饲料的营养价值^[113]。

餐厨垃圾饲料化在发达国家的应用有着比较明显的差别。日本和韩国分别有 36% 和 43% 的食物垃圾回收后被制成饲料；而欧盟在 2001 年英国口蹄疫事件爆发后禁止使用餐厨垃圾以一切形式制成的饲料^[114]。我国青海西宁市洁神餐厨垃圾处理厂于 2008 年投入运营，引进韩国技术将餐厨垃圾转化成高蛋白饲料母料，其主要工艺包括入料、破碎、脱水、干燥、冷却和包装，干燥过程中垃圾在 120°C

温度下加热 30 分钟,成品售价在 1000 元/吨左右^[115]。然而,作为一种新型饲料,餐厨垃圾生产的蛋白饲料并不在我国饲料生产经营许可范围内,洁神餐厨垃圾处理厂在生产蛋白饲料方面一直是无证经营,产品出路也存在问题,目前正在进行技术改造^[116]。我国餐厨垃圾成分复杂,受工艺条件限制,餐厨垃圾饲料产品中可能存在部分未被降解的餐厨动物源性成分,作为动物饲料使用时仍可能存在同源性污染的风险,目前也存在一定的争议^[117]。

第三章 厨余垃圾处理技术绩效评价方法

随着我国城市生活垃圾分类工作的深入推进和厨余垃圾处理设施需求的快速增长，已有多元化的厨余垃圾处理技术在我国投入运行，对已有技术的优化和新技术的行业引入也一直没有停止。从环境、经济、社会、资源利用对各类厨余垃圾处理技术进行多维绩效评价是检验垃圾减量化、无害化、资源化处理效果和模式可持续性的关键，也是政府、企业、NGO 组织等因地制宜推进厨余垃圾处理工作的依据。

（一）研究进展

1. 生命周期评价

生命周期（Life cycle）的概念应用广泛，特别是在政治、经济、环境、技术、社会等诸多领域经常出现，其基本涵义可以通俗地理解为产品或服务“从摇篮到坟墓”（Cradle to Grave）的整个过程。以此延伸出的生命周期评价（life cycle assessment, LCA）方法是应用最广泛的环境影响评价手段，早已应用在环境管理之中。

现有的厨余垃圾处理技术评价研究多集中采用生命周期分析（LCA），从环境影响的角度对厨余垃圾处理技术或项目进行评价^[3]。生命周期评价是一种较为成熟的用于环境分析的评价方法，利用标准的流程对系统进料（材料、能源等）到出料（产品、废物等）的过程进行跟踪和定量分析，其概念框架包括目标定义与范围确定、清单分析、生命周期影响评价、以及生命周期结果解释^[118,119]。通过使用统一度量，LCA 允许量化和比较资源化产品各个阶段的环境影响，包括原材料获取、加工和产品的分配、使用及废弃^[120]。杜欣等^[121]运用生命周期评价方法评价了两种典型资源化处理工艺（好氧堆肥和湿热处理）对环境的影响，通过实地考察北京市南宫餐厨垃圾处理厂和董村餐厨垃圾处理厂以及文献查阅调研了工艺参数，采用 IWM-2 模型计算大气、水体污染物环境排放量的生命周期清单，采用环境问题的当量因子法量化了两种工艺对全球变暖、生态毒性、酸化和富营养化的影响。源自生物作用产生的 CO₂ 是好氧堆肥和湿热处理工艺温室气体排放的来源（分别占 87.9%和 68.1%），若不考虑生物转化的 CO₂，餐厨垃圾

处理技术对全球变暖的影响主要取决于生产工艺中化石能源的消耗^[121]。

潘发存^[119]和肖锋^[122]在广西省南宁市餐厨垃圾处理项目的基础上,对垃圾的收运和各个处理单元进行实地考察,分别对厌氧消化产沼发电和提纯制车用燃气进行了 LCA 评价。潘发存^[119]以南宁市各个场所餐厨垃圾产生为起点,沼气经发电所产生的排放为终点,建立了餐厨垃圾资源化生产沼气发电的生命周期环境排放评价模型,计算了各个环节的环境排放和能耗,与传统火力发电进行比较,餐厨垃圾产沼发电具有良好的环境效益,其产生的 CO₂、NO_x、PM、SO₂、CH₄、VOC、CO 分别占传统火力发电的 47.76%、13.49%、0.83%、32.02%、2.07%、29.58%、66.45%。

肖锋^[122]将餐厨垃圾厌氧消化生产车用燃气与传统柴油生产进行对比分析,将生产过程分为上游阶段(原料收运、垃圾与处理、厌氧消化及沼气净化)和下游阶段(燃气投入车辆运行阶段),根据构建的生命周期分析模型对生物质车用燃气全生命周期的一次能源消耗与污染物排放进行了分析。由于生物质车用燃气生产的原料为废弃的餐厨垃圾,生产过程中一次能源消耗量比传统柴油低 73.44%,节能效果好。除能源消耗外,由污染物排放生命周期清单结果的归一化处理得到一次能源消耗、全球变暖(EU)、酸化潜力(AP)、人体毒性(HTP)、光化学烟雾(POCP)和气溶胶潜力(AQP)六种环境影响潜势,生物质车用燃气的全生命周期综合环境影响比传统柴油低 32.88%,其减排收益排序为 EU>HTP>AP>POCP>AQP>GWP。肖锋^[122]根据评价结果及敏感性分析提出改进建议:增大我国清洁能源电力的比例;提高生物质车用燃气生产效率;加强对生物质燃气汽车等新能源汽车的推广;改善并建立符合我国国情的生命周期评价方法及数据库。

Opatokun 等^[118]分别以食物垃圾进料、资源化产品最终利用为系统边界的起点和终点,使用 ReCiPe LCA 算法评估和比较了厌氧消化、热解或两者协同处理食物垃圾的环境绩效。其生命周期清单数据主要来自悉尼的一座食物垃圾厌氧消化厂,通过 Ecoinvent 3.1 数据库进行标准化,描述了处理 1 kg 厨余垃圾对气候变化、淡水富营养化、颗粒物排放等 14 类环境影响。根据计算结果分析得出厌氧消化与厌氧消化,但在厌氧消化沼渣利用受到病菌、质量管理等限制的情况下,协同处理中对沼渣的热解处理(生产生物油和生物质炭)具有提高能源和附加值产品的生产潜力。

Saer 等^[120]采用 LCA 评估了厨余垃圾条垛堆肥的环境效益, 研究系统包括进料的收运、堆肥产品的生产输出以及作为土壤调节剂的替代。评估所需的工艺参数来自宾夕法尼亚大学有机材料加工和教育中心 7 座连续十三个月运行的堆肥条垛, 数据采集期间处理了 2453 t 有机废物并生产 822 t 堆肥。微生物分解有机物造成的气体排放 (包括 CH₄、N₂O、NH₃, 不计入有机物降解产生的 CO₂) 由文献中的排放因子计算, 运输、电力和燃油消耗等排放使用美国生命周期清单数据库 (U.S. Life-Cycle Inventory Database) 或 Simapro 软件中包含的美国数据库进行计算。Saer 等^[120]指出当堆肥产品替代传统土壤调节剂被考虑进生命周期评估时, 食物垃圾堆肥系统在 9 个环境影响类别 (全球变暖, 臭氧消耗, 光化学污染, 酸化, 生态毒性等) 中都具有一定的环境收益, 但不同文献中堆肥有机物降解的气体排放因子有明显差异, 使用文献中的平均和最大排放因子数值时, 堆肥过程排放的 CH₄ 和 N₂O 对全球变暖潜势影响最大, NH₃ 对酸化、富营养化的影响最大。而在使用最小排放因子数值时, 机械筛选、堆肥机作业等的燃料和电力所造成的的排放成为所有影响类别的主要贡献。

通过获取以能源与原料消耗、污染物排放为主的数据信息, 厨余垃圾处理技术的生命周期评价侧重于: 1) 量化并标准化各环境影响类型潜势并具体分析处理技术各工艺阶段的环境影响; 2) 对厨余垃圾资源化处理及其对应产品的传统生产进行全生命周期比较, 以了解厨余垃圾资源化处理技术能够获得的环境效益。可以看出, 生命周期评价能够为厨余垃圾处理技术在环保方面的改进以及相关环境政策的制定提供参考依据。某些厨余垃圾处理技术成熟度较低, 目前缺乏对其二次污染和能源消耗的深入研究^[121], 利用生命周期方法评价其环境特性有利于厨余垃圾处理技术的合理推广应用。值得重视的是, 生命周期研究涉及到具体工艺流程的各个阶段, 需要获取的数据量较大, 但目前国内的数据库尚不完善, 需要通过查阅文献、实地考察、专家评定和实验测试等多种手段收集兼具时效性和全面性的本土化数据^[122]。

2. 技术经济分析

除了在环境影响这一维度上评价厨余垃圾处理技术, 一些研究从经济角度分析餐厨垃圾处理技术, 例如技术经济分析 (TEA)。TEA 通常将工程设计、过程建模和经济评估结合在一起, 在确定物质流的条件下对计划运营的项目进

行经济指标估算^[123]。Huiru 等^[124]利用 TEA 评估了一座用于处理大学校园食物垃圾的厌氧消化厂（由 Biowin 软件模拟运行），在经济分析软件 RETScreen 中输入建设成本、运营成本以及沼气发电收入相关数据后自动计算出一系列经济指标，包括价值性指标（净现值）、时间性指标（投资回收期、股权回收期）和效率性指标（内部收益率、效益成本比率），项目的经济效益累计在 8 年内与最初的投资费用持平。类似的，Bastidas-Oyanedel 和 Schmidt^[125]通过 TEA 比较了利用食物垃圾厌氧消化技术生产五种不同主产物（天然气、电力、乳酸、聚乳酸、氢气和天然气、乙酸和丁酸）的经济收益，假设处理能力为 50 t/d，项目运行时间 20 年，年利率为 5%。分析结果表明与目前应用较多的食物垃圾厌氧消化制天然气相比，生产高附加值有机物产生的利润可提高 4-16 倍，其中生产聚乳酸具有最优的投资回报率（98%）和投资回收期（7.8 年）。

技术经济评价方法为寻求技术和经济的最佳组合而服务，其主要目的是通过计算、分析和比较不同技术方案的经济效益，选择技术先进、经济合理、实践可行的技术方案^[126]。随着我国生活垃圾分类工作的深入开展，厨余垃圾处理设施作为（城市）基础设施将有大量需求，TEA 能够为各类处理技术在不同场景和规模下的应用提供经济可行性分析，从而为决策者和投资者提供科学依据。针对目前已有运行的厨余垃圾处理技术，TEA 所包含的经济学概念、相关指标计算以及其已有相关应用对评估厨余垃圾处理项目的经济绩效具有重要的借鉴意义。现阶段我国从事餐厨垃圾处理的企业多数需要依靠政府补贴，一些资源化处理技术的产品面临销路不畅的问题，利用技术和经济结合的方式评估现有项目的经济效益有助于分析处理过程中各环节存在的资金问题，从而在技术改进、政策法规等方面对症下药以提高项目的经济效益^[127,128]。

生命周期方法和技术经济评价分别注重于分析项目的环境影响和经济效益，难以实现对不同厨余垃圾处理技术的全面性评估，目前有研究将多准则决策分析（MCDA）应用到食物垃圾处理及其上下游供应链（垃圾收运、资源化产品输出等）的评价工作中。Taelman 等^[129]在欧盟固废管理系统评估项目 REPAiR 的背景下，通过调研大量文献和相关行业标准、与利益相关者及专家组共同讨论，制定了多维度（环境，经济，资源，社会）固废管理系统可持续性评估框架，涉及 29 个影响类别的五个领域（人类健康，经济发展，生态系统健康，人类福祉和自然资源）。在此基础上，Tonini 等^[130]在 Excel 中开发了一套评价厨余垃圾管理系统

的计算工具并将其应用到阿姆斯特丹地区的案例研究中,根据当地利益相关者确定的影响类别优先级,对使用不同处理技术(家庭/集中式堆肥、厌氧消化、机械生物处理、焚烧)的家庭食物垃圾管理方案产生的环境、社会、经济影响进行了量化,其中以现实中运行的焚烧处理方案为基准进行比较。

Clercq 等^[3]首次采用 MCDA 评价了我国餐厨垃圾厌氧消化处理项目(北京、苏州、海南),以 CO₂ 减排量(与填埋相比)、项目亏本可能性、单位投资成本、产品多样性、厌氧消化罐产率、单位沼气产量、共消化与否为指标,比较得出由于进料不足、沼气全部用于产热等原因,北京厨余垃圾处理项目综合绩效评分最低。此外,根据现有项目的具体参数分析(技术、经济、环境),Clercq 等^[3]针对我国餐厨垃圾厌氧消化处理提出了六项政策建议,例如政府应利用基于绩效的投资补贴激励企业提高沼气产率、鼓励企业多元化生产适销产品(沼气提纯产生物甲烷或热电联产、沼渣制液体肥料)以确保稳定的经济可行性。

3. 研究进展小结

从文献查阅的情况来看,目前对厨余垃圾相关处理技术的评价研究主要有以下几个特点:1)对单一处理技术/项目及其替代方案进行以环境影响或经济效益为主的评估;2)通过实地考察、文献调研和数据库使用获取大量评价指标所需数据,后两种渠道得到的数据受时效性和地域性限制较多;3)生命周期评价评价方法(即从垃圾进料到产品输出)已在餐厨垃圾处理技术领域得到应用,但研究案例不多,特别是基于实测的参数较少;4)对研究对象的功能单位定义不同,有单位进料垃圾、年生产垃圾、单位资源化产品等;5)评价过程尤其是指标的选取存在一定程度的主观性,对当地社会影响考虑较少。

(二) 技术评价的生命周期框架

在 LCA 基础上,本文从资源利用、环境影响、经济表现和社会影响四个方面构建了厨余垃圾多维绩效评价指标体系,对当前我国正在使用和推广的多项厨余技术做系统全面的评价。

1. 系统边界

统一的研究边界是厨余垃圾处理技术评价与比较的前提，也是 LCA 研究的基本要求。考虑到厨余垃圾本身的废弃物属性和资源属性，研究对象包含厨余垃圾进场到资源化产品和其他废弃物产出的过程。由于具体案例中厨余垃圾的收集方式、收运距离可能存在较大差异，在本研究中没有考虑具体案例收运环节的绩效表现。图 4.2.1 为厨余垃圾处理技术的系统边界。

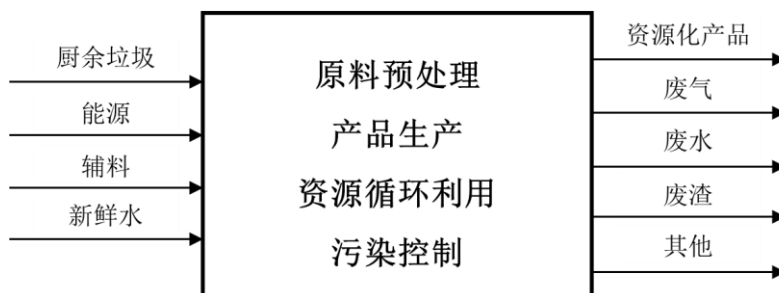


图 4.2.1 厨余垃圾处理技术的系统边界

2. 功能单元

本研究采用的厨余垃圾技术评价的基本单元(功能单元)为单位重量(每吨)的进场厨余垃圾。需要说明的是，各地厨余垃圾的含水率、含固率、元素含量等指标不尽相同，因此在本研究中不再考虑原料的物理、化学组成的差异。

(三) 四维绩效评价指标体系

1. 指标遴选原则

建立厨余垃圾资源化技术评价指标体系时，应在对厨余垃圾资源化技术深入研究基础上，统筹考虑资源、环境、经济和社会指标多维度指标，选取能够真实、准确、具有代表性的指标。

- 科学性原则：厨余垃圾资源化技术评价指标体系具体指标的选取，应建立在对厨余垃圾资源化技术进行科学认识、深入研究的基础上，选取可以真实、准确反映能够对厨余垃圾进行合理资源化的指标，具有代表性和合理性，并且有科学依据。

- 全面性原则：厨余资源化技术评价指标体系要求即涵盖技术就绪度，又要有反映资源消耗、能源消耗、直接污染物排放、全面环境影响的指标，同时也

要有反映经济成本和社会方面的指标。

- **独立性原则：**在构建指标体系时，各指标不能由其他指标替代，也不能由其他同级指标换算得来，各级指标尽量避免包含关系。同时，在指标选取的过程中，避免对比性指标。
- **层次性原则：**指标体系应设置分层级次，层次之间关系明确、权重合理，并且适合所选择的评价方法。只有建立多层次指标体系，才能对厨余垃圾资源化技术进行深入且科学的评价。
- **可操作性原则：**在构建指标体系时，在满足评价要求和决策信息前提下，应挑选易于计算、容易得到，并具有普适性以及代表性的指标，尽量减少指标个数，使整个指标体系具有较高的使用价值和操作性。指标分为测量指标和模型计算指标。

2. 技术就绪度

表 4.3.1 技术就绪度描述和分类

等级	等级描述	成果形式
第一级	未通过中试验证	基本原理报告、技术方案、实施方案、可行性报告或小试研究报告等
第二级	通过中试验证或技术示范/工程示范	中试研究报告，技术示范/工程示范报告、专利、软件著作权
第三级	通过第三方评估或用户验证认可	第三方评估报告，示范工程依托单位应用效益证明
第四级	通过专业技术评估和成果鉴定	成果鉴定报告、技术指南、规范
第五级	得到推广应用	推广应用证明

本研究将厨余垃圾资源化技术的技术就绪度分为如表 4.3.1 所示的五级，各级达到的技术就绪度水平（technical readiness level, TRL）描述如下：

第一级（TRL1）：未通过中试验证。处于本级的厨余垃圾资源化技术仍然停留在理论或试验阶段，包括处在发现基本原理、形成技术方案或实施方案、通过可行性讨论以及通过小试验证等各个阶段的厨余垃圾资源化技术。

第二级（TRL2）：通过中试验证并开展了技术示范/工程示范。处于本级的厨余垃圾资源化技术已经进行了中试，验证了放大规模后关键技术的可行性，已经在企业中进行了技术/工程示范，并达到预期目标。同 TRL1 的区别在于，TRL2 一般应有样机或样品。

第三级（TRL3）：通过第三方评估或用户验证认可。处于本级的厨余垃圾资源化技术已经通过了第三方的评估，或在实际应用中经用户试用，证明可行。同 TRL2 的区别在于，TRL3 已经过用户或第三方评估机构的检验。

第四级（TRL4）：通过专业技术评估和成果鉴定。处于本级的厨余垃圾资源化技术已经通过专业技术评估和成果鉴定，在地方厨余垃圾治理规划或可研中得到应用，或形成技术指南、规范。同 TRL3 的区别在于，TRL4 已在得到某地方政府的认可，并将该技术纳入厨余垃圾治理的相关规划或可行性研究中。

第五级（TRL5）：得到推广应用。处于本级的厨余垃圾资源化技术，已经在多个厨余垃圾处理企业或多个地区得到广泛应用。同 TRL4 的区别在于，TRL5 已在多地得到应用，已基本被行业接受和认可。

3. 指标体系

表 4.3.2 为厨余垃圾处理技术多维评价指标体系。在评估技术的某维度表现时候，约束性指标必须纳入，参考性指标可以显示某个维度的绩效，但同约束性指标可能存在重复，可作为评价或决策的辅助和补充，不计入评价结果；●表示在某个 TRL 分级下应该纳入的指标，○表示在某个 TRL 分级下如数据不充足可不纳入的指标。

表 4.3.2 厨余垃圾处理技术评价指标体系

维度	分类层	指标层	指标性质	正向/负向	定性/定量	基于技术就绪度的指标选择				
						TRL1	TRL2	TRL3	TRL4	TRL5
资源利用 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	约束性	负向	定量	●	●	●	●	●
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	约束性	负向	定量	●	●	●	●	●
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	约束性	负向	定量	●	●	●	●	●
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	约束性	负向	定量	○	○	●	●	●
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	约束性	正向	定量	●	●	●	●	●
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	参考性	正向	定量	●	●	●	●	●
		R ₇ .水循环利用率	参考性	正向	定量	○	○	○	●	●
		R ₈ .余热利用率	参考性	正向	定量	○	○	○	●	●
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响 (E _n)	E _{n1} .气候变化（温室气体排放）	约束性	负向	定量	●	●	●	●	●
		E _{n2} .酸化（二氧化硫排放）	约束性	负向	定量	●	●	●	●	●
		E _{n3} .富营养化	约束性	负向	定量	●	●	●	●	●
		E _{n4} .光化学污染	约束性	负向	定量	●	●	●	●	●
		E _{n5} .生态毒性	约束性	负向	定量	●	●	●	●	●
		E _{n6} .人体毒性	约束性	负向	定量	●	●	●	●	●
经济指标 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	约束性	正向	定量	○	○	●	●	●
		E _{c2} .净现值	约束性	正向	定量	○	○	●	●	●
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	参考性	负向	定量	○	○	●	●	●
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	参考性	负向	定量	○	○	●	●	●
社会指标 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	约束性	正向	定量	○	○	○	●	●
		S ₂ .循环经济示范性	参考性	正向	定性	●	●	●	●	●
		S ₃ .公众对技术实施的态度	参考性	正向	定性	○	○	○	●	●
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	约束性	负向	定性	○	○	●	●	●

3.1 资源利用指标

资源利用指标包括消耗和综合利用指标两类，消耗指标用来表征资源化单位厨余垃圾消耗资源情况；综合利用指标用来表征资源化技术实施过程所涉及资源的综合利用情况。

3.1.1 消耗指标

(1) R₁: 处理单位厨余垃圾原辅料消耗量

①指标解释

指在该厨余垃圾资源化技术应用过程中，对单位厨余垃圾进行资源化利用所消耗的原辅料的量。

②计算方法

$$\text{处理单位厨余垃圾原辅料消耗量 (t/t)} = \frac{\text{报告期内原辅料消耗总量 (t)}}{\text{报告期内处理厨余垃圾总量 (t)}}$$

③所需参数及相应数据获取：

1. 报告期内原辅料消耗总量：

填写《基础资料采集表》，上报报告期内（如一个生产周期或一年之内）该技术运行的原辅料消耗量，并上报各种原辅料的种类以及相应的消耗量。若企业无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的期限之内（如一天或一周，或资源化单位厨余垃圾）对技术生产所需的各种原料、辅料的种类与消耗量进行核算或测量。注意能源物质不要与物质消耗量重复计算。

2. 报告期内处理厨余垃圾总量

填写《基础资料采集表》，上报报告期内（如一年之内）该技术运行处理的厨余垃圾总量。若企业无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的短期之内（如一天或一周）对技术处理的厨余垃圾总量进行核算或测量，或相关数据测量直接以资源化单位厨余垃圾为基准。

④可行性与必要性分析：

《清洁生产评价指标体系编制通则（试行稿）》中，包含“单位产品原辅料消耗”指标，本指标体系立足于厨余垃圾的处理与资源化利用，因此将单位设置为“处理单位厨余垃圾”而非“单位产品”，设置指标为“处理单位厨余垃圾原辅料消耗量”，可以体现该技术在资源化利用厨余垃圾中的物质消耗水平。

（2）R₂：处理单位厨余垃圾综合能耗

①指标解释

指在该厨余垃圾资源化技术应用过程中，对单位厨余垃圾进行资源化利用所消耗的电、煤、燃油、天然气、蒸汽及其他能源之和（统一折标煤表示，ton of standard coal equivalent，tce）。

②计算方法

$$\text{处理单位厨余垃圾综合能耗 (tce/t)} = \frac{\text{报告期内能源消耗总量 (tce)}}{\text{报告期内处理厨余垃圾总量 (t)}}$$

③所需参数及相应数据获取：

1.报告期内能源消耗总量

填写《基础资料采集表》，上报报告期内（如一年之内）该技术运行的综合能耗，并上报各种能源的类型以及相应的消耗量。若企业无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的期限之内（如一天或一周，或资源化单位厨余垃圾）对技术生产所需的各种能源的类型与消耗量进行核算或测量。注意能源物质不要与物质消耗量重复计算。

各能源与标煤的转换系数参考中华人民共和国国家标准《GB/T2589-2008 综合能耗计算通则》计算。

2.报告期内资源化利用厨余垃圾总量

填写《基础资料采集表》，上报报告期内（如一年之内）该技术运行处理的厨余垃圾总量。若企业无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的短期之内（如一天或一周）对技术处理的厨余垃圾总量进行核算或测量，或相关数据测量直接以资源化单位厨余垃圾为基准。

④可行性与必要性分析：

《清洁生产评价指标体系编制通则（试行稿）》中，包含“单位产品综合能耗”指标，本指标体系立足于厨余垃圾的处理与资源化利用，因此将单位设置为“处理单位厨余垃圾”而非“单位产品”，设置指标为“处理单位厨余垃圾综合能耗”，可以体现该技术在资源化利用厨余垃圾中的能源消耗水平。

（3）R₃：处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量

①指标解释

指在该厨余垃圾资源化技术应用过程中，对单位厨余垃圾进行资源化利用所

消耗的新鲜水总量，包括取自地表水（以净水厂供水计量）、地下水、城镇供水工程及其他取水方式。

②计算方法

$$\text{处理单位厨余垃圾新鲜水消耗量 (m}^3\text{)} = \frac{\text{报告期内新鲜水消耗量 (m}^3\text{)}}{\text{报告期内处理厨余垃圾总量 (t)}}$$

③所需参数及相应数据获取：

1.报告期内厨余垃圾资源化技术新鲜水消耗量

填写《资料采集表》，上报报告期内（如一年之内）该技术运行的新鲜水消耗量，并上报各种新鲜水用水类型以及相应的消耗量。若企业无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的期限之内（如一天或一周，或资源化单位厨余垃圾）对技术生产所需的各种新鲜水用水的类型与消耗量进行核算或测量。

2.报告期内处理厨余垃圾总量

填写《资料采集表》，上报报告期内（如一年之内）该技术运行处理的厨余垃圾总量。若企业无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的短期之内（如一天或一周）对技术处理的厨余垃圾总量进行核算或测量，或相关数据测量直接以资源化单位厨余垃圾为基准。

④可行性与必要性分析：

我国行业清洁生产评价指标体系中一般包含“单位产品新鲜水消耗量”指标，本指标体系立足于厨余垃圾的处理与资源化利用，因此将单位设置为“处理单位厨余垃圾”而非“单位产品”，设置指标为“处理单位厨余垃圾新鲜水消耗量”，可以体现该技术在资源化利用厨余垃圾中的新鲜水消耗水平。

（4）R4：处理厨余垃圾的吨均土地占用

①指标解释

指在该厨余垃圾资源化技术应用过程中，对单位厨余垃圾进行资源化利用所占用的土地资源总量，主要指厂房、楼宇等建、构筑物 and 道路对土地的占用。

②计算方法

$$\text{处理厨余垃圾的吨均土地占用(m}^2\text{/(t/d))} = \frac{\text{报告期内的土地资源占用量 (m}^2\text{)}}{\text{每日处理厨余垃圾量 (t/d)}}$$

③所需参数及相应数据获取：

1.报告期内厨余垃圾资源化技术的土地占用量：

填写《资料采集表》，上报报告期内（如一年之内）该技术运行的土地占用量。若企业无法提供相应数据资源，则根据企业的总体规划或厂区建筑设计图纸测算。

2. 每日处理厨余垃圾量

填写《资料采集表》，上报每日该技术运行处理的厨余垃圾总量或根据项目环评、可行性研究报告等规范性文件获得相应信息。若企业无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的短期之内（如一天或一周）对技术处理的厨余垃圾总量进行核算或测量，或相关数据测量直接以资源化单位厨余垃圾为基准。

④可行性与必要性分析：

我国非常注重集约利用土地资源，本指标体系立足于厨余垃圾的处理与资源化利用，因此将单位设置为“处理单位厨余垃圾”而非“单位产品”，设置指标为“处理厨余垃圾的吨均土地占用”，可以体现该技术在资源化利用厨余垃圾中的土地资源利用水平，同时兼顾不同项目之间寿命的差异。

3.1.2 综合利用指标

（5）R₅：厨余垃圾资源化率

①指标解释：

指厨余垃圾资源化技术能将厨余垃圾有效资源化的比例，即进入资源化处理工艺环节的厨余垃圾量占被处理的厨余垃圾总量。

②计算方法：

$$\text{厨余垃圾资源化率} = \frac{\text{资源化利用的厨余垃圾量}}{\text{处理的厨余垃圾总量}} \times 100\%$$

③所需参数及相应数据获取：

1.处理的厨余垃圾总量

指企业获得的未经分拣、筛选、提取等操作处理的原始厨余垃圾的量，为一定时期内处理厨余垃圾总量。检测单位根据技术工艺与生产流程特点，确定规定的时间段内（如1年、1天、1h或生产流程运行一次），核算该时间段内处理的厨余垃圾总量。

2.资源化利用的厨余垃圾量。

指经过资源化技术的处理，厨余垃圾中最终能够被资源化利用的厨余垃圾量。

若企业了解技术工艺中资源化利用的厨余垃圾量,则通过填写《资料采集表》,上报规定时间内(如1年、1天、1h或生产流程运行一次)资源化利用的厨余垃圾量。

若企业对被资源化利用的厨余垃圾量不了解,则检测单位根据技术工艺与生产流程的特点,通过物料平衡等方式核算或通过技术手段实测确定规定时间内(如1年、1天、1h或生产流程运行一次)资源化利用的厨余垃圾量。

④可行性与必要性分析:

在厨余垃圾资源化技术中,部分技术并没有对厨余垃圾的所有部分进行利用,而是利用厨余垃圾当中含有的某一部分资源,剩下的部分则依然是厨余垃圾而没有被利用,因此有必要对厨余垃圾的资源化利用情况进行评估。

(6) R₆: 战略资源回收的稀缺性贡献

①指标解释

资源化单位厨余垃圾,根据该技术提取并资源化利用的各种战略能源资源以及金属资源的种类和数量,根据其与中国探明储量之比,计算出其稀缺性贡献。

②计算方法

战略资源回收的稀缺性贡献(kg Cu eq./t)

$$= \sum_{i=1}^n \frac{\text{提取并资源化利用的战略资源} a_i}{\text{资源} a_i \text{的探明储量}} \times \text{资源铜的探明储量}$$

③所需参数及相应数据获取:

1.厨余垃圾中提取并资源化利用的战略资源 a_i

根据其技术特征,主动上报其提取并资源化利用单位厨余垃圾的战略能源资源和战略金属资源的种类,并可提供资源化量的参考值,检测单位根据技术工艺对单位厨余垃圾资源化的相关能源资源和金属资源的量进行实测。

本指标考虑的战略资源为《全国矿产资源规划(2016-2020年)》中包括的能源矿产以及金属矿产,其中能源战略矿产包括:石油、天然气、页岩气、煤炭、煤层气、铀;金属矿产战略资源包括:铁、铬、铜、铝、金、镍、钨、锡、钼、锑、钴、锂、稀土、锆;非金属矿产磷、钾盐、晶质石墨、萤石。对于厨余垃圾的处理,天然气、磷、钾盐(后两项为肥料的主要成分)为主要考虑对象。根据厨余垃圾处理技术的特点,在本研究中考考虑天然气、磷、钾三类战略资源类型。

2. 资源 a_i 在我国的探明储量

资源 a_i 在我国的探明储量统一按照其在中国国家统计局国家数据网站 (<https://data.stats.gov.cn/>) 上公布的数据为准, 基准值以最近年份 2016 年为准。表 4.3.3 即为 2016 年我国天然气、磷矿和钾盐可开采探明储量。

表 4.3.3 2016 年我国天然气、磷矿和钾盐可开采探明储量

战略资源	可开采探明储量	单位
天然气 (以甲烷含量 85% 计)	54365.5	亿立方米
磷矿 (以 PCl_5 计)	32.4	亿吨
钾盐 (以 KCl 计)	56212	万吨
铜 (以 CuFeS_2 计)	2621	万吨

④ 可行性与必要性分析

2016 年, 经国务院批复同意, 《全国矿产资源规划 (2016-2020)》由国土资源部、国家发展和改革委员会、工业和信息化部、财政部、环境保护部和商务部正式发布实施, 其中将 24 种矿产列入了战略性矿产目录, 包括: 能源矿产石油、天然气、页岩气、煤炭、煤层气、铀; 金属矿产铁、铬、铜、铝、金、镍、钨、锡、钼、锑、钴、锂、稀土、锆; 非金属矿产磷、钾盐、晶质石墨、萤石。因此有必要对战略性矿产资源的利用进行针对性评价。

而不同的资源的价值受到其稀缺性的影响很大, 并且从资源安全与能源安全的角度来说, 稀有资源更加受到重视, 因此有必要对回收利用的资源根据其不同的稀缺性程度进行综合评价。

(7) R₇: 水循环利用率

① 指标解释

指厨余垃圾资源化技术应用过程中, 工业企业循环冷却水的循环利用量和废水利用量之和与外补新鲜水量、循环水利用量和废水利用量之和的比值。

② 计算方法

$$\text{水循环利用率} = \frac{\text{循环水利用量} + \text{废水利用量}}{\text{外部新鲜水量} + \text{循环水利用量} + \text{废水利用量}} \times 100\%$$

③ 所需参数及相应数据获取:

填写《资料采集表》, 上报其水循环利用率, 并上报一定期限内总用水量 and 各个用水单元的用水量及其用水来源。若企业无法提供相应统计数据, 则根据技术的实际运行情况, 在统一规定的期限之内 (如一天、一周或一个生产周期等)

对各个用水单元的用水量和用水来源进行核算或实测。

④可行性与必要性分析：

指标“水循环利用率”在《清洁生产评价指标体系编制通则（试行稿）》《硫酸行业清洁生产评价指标体系（试行）》《黄磷工业清洁生产评价指标体系》《再生铜行业清洁生产评价指标体系》等多个标准中得到应用，是评价水资源综合利用水平的重要指标。

（8）R₈：余热利用率

①指标解释

指系统已利用余热量占生产中可利用余热总量的百分比。

②计算方式

$$\text{余热利用率(100\%)} = \frac{\text{已利用余热}}{\text{可利用预热}}$$

③参数数据获取

企业主动填写《资料采集表》，上报报告期内（如一年之内）其可利用余热总量和已利用余热总量，并上报各个涉及余热利用的工艺单元的可利用余热量和已利用余热量。若企业无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的期限之内（如一天、一周或一个生产周期等）对各个涉及余热利用的工艺单元的可利用余热量和已利用余热量进行核算或实测。

④可行性与必要性分析

该指标已在《硫酸行业清洁生产评价指标体系（试行）》、《绿色园区评价要求》等标准和文件中得到应用，可以体现热能的回收利用水平。

3.2 环境影响指标

环境影响的评价边界为从原材料开采一直到资源化产品生产的生命周期过程，设置的指标包括气候变化、臭氧层破坏、放射性、臭氧形成对人体健康的影响、臭氧形成对陆生生态系统的影响、微小颗粒物形成、陆地酸化、淡水富营养化、海洋富营养化、陆生生态毒性、淡水生态毒性、海洋生态毒性、人体致癌毒性、人体非致癌毒性、土地使用，直接采用生命周期评价模型进行计算。

3.2.1 指标解释

(9) E_{n1} : 气候变化 (二氧化碳排放当量)

这里主要指全球气候变暖, 由于温室效应不断积累, 导致地气系统吸收与发射的能量不平衡, 能量不断在地气系统累积, 从而导致温度上升, 造成全球气候变暖。主要影响物质包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等, 单位为 $\text{kg CO}_2 \text{ eq/t}$ 。

(10) E_{n2} : 酸化 (二氧化硫排放当量)

大气遭受人为污染形成的酸性降水落到地表后造成的或直接污染造成的陆地环境功能衰退的现象, 主要影响物质包括氮氧化物、二氧化硫和氨气等单位为 $\text{kg SO}_2 \text{ eq/t}$ 。

(11) E_{n3} : 富营养化

一种氮、磷等植物营养物质含量过多所引起的水质污染现象, 本文主要指淡水富营养化, 单位为 kg P eq/t 。

(12) E_{n4} : 光化学污染

烯烃类碳氢化合物、二氧化氮 (NO_2)、臭氧等被排放到大气中后发生反应形成有毒性的光化学烟雾, 包括: 1) 烯烃类碳氢化合物、二氧化氮 (NO_2) 的光化学污染; 2) 臭氧形成对陆生生态系统的影响。单位为 kg NMVOC eq/t 。

(13) E_{n5} : 生态毒性

生态毒性, 是指外源化学物质进入生态系统后对系统中非人类生物体的受伤能力, 包括: 1) 陆生生态毒性; 2) 淡水生态毒性; 3) 海洋生态毒性。单位为 kg 1,4-DB eq/t 。

(14) E_{n6} : 人体毒性

指外源化学物、大气颗粒物、放射性物质等可能对人体造成伤害, 包括 1) 人体致癌毒性, 指外源化学物对诱发人体癌症造成伤害的能力; 2) 放射性物质, 指某些元素的原子通过核衰变自发地放出 α 射线或 β 射线(有时还放出 γ 射线)的性质; 3) 微小颗粒物, 指包括 PM_{10} 、TSP、 $\text{PM}_{2.5}$ 等各种微小颗粒物的产生, 其污染会对人体健康和生态系统造成危害; 4) 臭氧形成对人体健康的影响。单位为 kg P eq/t 。

3.2.2 计算方式

直接采用 LCA 软件及模型计算处理单位厨余垃圾造成的各类环境影响, 评

价模型采用 ReCiPe 2016 Midpoint (E) 1.08 版，部分数据来源为 Ecoinvent 数据库。评价的功能单元为每吨厨余垃圾，边界与技术评价的边界保持一致。

3.2.3 所需参数与数据来源

1. 报告期内原辅料消耗总量

填写《资料采集表》，上报报告期内（如一年之内）该技术运行的原辅料消耗量，并上报各种原辅料的种类以及相应的消耗量。若无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的期限之内（如一天或一周，或资源化单位厨余垃圾）对技术生产所需的各种原料、辅料的种类与消耗量进行核算。

2. 报告期内能源消耗总量

填写《资料采集表》，上报报告期内（如一年之内）该技术运行的综合能耗，并上报各种能源的类型以及相应的消耗量。若企业无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的期限之内（如一天或一周，或资源化单位厨余垃圾）对技术生产所需的各种能源的类型与消耗量进行核算或测量。能源物质不与物质消耗量重复计算。

3. 报告期内处理厨余垃圾总量

填写《资料采集表》，上报报告期内（如一年之内）该技术运行处理的厨余垃圾总量。若企业无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的短期之内（如一天或一周）对技术处理的厨余垃圾总量进行核算，或相关数据测量直接以资源化单位厨余垃圾为基准。

4. 报告期内排放到环境中的各种污染物的量

填写《资料采集表》，上报报告期内（如一年或一天之内）该技术运行排放到环境中的各种污染物的种类和量，并提供相关证明材料。检测单位根据技术特征对技术生产过程中排放到环境中的各种污染物的量进行核算与实测，包括常规污染物与该技术的特征污染物。需测量的大气污染物参照《大气污染物综合排放标准 GB16297-1996》，除此以外，还需测量甲烷、一氧化二氮、四氯甲烷等。水环境污染物参照《污水综合排放标准 GB8978-1996》《城镇污水处理厂污染物排放标准》。

5. 厨余垃圾资源化技术产生的新厨余垃圾种类与数量

填写《资料采集表》，上报报告期内（如一年或一天之内）该技术运行产生

的新厨余垃圾的量以及相关的处理方式，并提供相关证明材料。检测单位进行相关核算。

6.环境影响背景数据库

生命周期评价背景数据主要应用中国科学院生态环境研究中心建立的中国本土化 LCA 专业数据库 CAS-RCEES，并参照国际认可的 Ecoinvent 数据库和 Gabi 数据库进行补充。

3.3 经济指标

3.3.1 经济可持续性

(15) E_{c1}: 销售净利润率

①指标解释

销售净利润率是指经营所得的净利润占销售收入的百分比。

②计算方式

$$\text{销售净利润率} = \frac{\text{净利润}}{\text{销售收入}} \times 100\%$$

③所需参数及数据获取：

填写《资料采集表》进行上报，并主动披露相关成本、销售收入、税收、利润等相关资料。

④可行性分析：

销售净利润率能综合反映经营效率与盈利能力，是非常重要的财务指标。

(16) E_{c2}: 净现值

①指标解释

净现值是一项投资所产生的未来现金流的折现值与项目投资成本之间的差值。

②计算方式

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{B_t - C_t}{(1-i)^t}$$

式中：NPV—净现值；*i*—折现率；统一按照 8%取值；*B_t*—第 *t* 年的总收益；*C_t*—第 *t* 年的总成本；*T*—该项目计算期，对于没有明确说明寿命的项目，大型项目按照 20 年计算，小型社区项目按照 10 年计算。

③所需参数与数据获取：

填写《资料采集表》进行上报，并主动披露各年的投入成本、收益和未来预估各个计算期的情况，以及相应的折现率。

④可行性与必要性分析：

净现值是项目评估中的一个基本指标，是评价方案优劣的一种基本方法。《节能项目技术经济评价指标和方法研究》《绿色建筑的技术经济评价体系研究》等都提出采用净现值的指标进行评价。本指标适合于进行投资建设的技术的评价。

(17) E_{c3}：每日处理厨余垃圾的吨均投资建设费用

①指标解释

指该厨余垃圾资源化技术的相关设备或工厂从开始筹建到整体竣工投产为止所发生的全部建设及设备资金投入，与该技术寿命期内预计可处理的厨余垃圾总量之比。

②计算方法

$$\begin{aligned} & \text{每日处理厨余垃圾的吨均投资建设费用 (万元/(t/d))} \\ &= \frac{\text{总投资建设费用 (万元)}}{\text{技术寿命期内预计每日可处理厨余垃圾量 (t/d)}} \end{aligned}$$

③所需参数与数据来源：

1. 总投资建设费用

填写《资料采集表》，上报其技术运行的总投资建设费用，并上报各种投资建设子项目类别以及相应的费用。

2. 技术寿命期内预计可处理厨余垃圾总量

填写《资料采集表》，上报其技术运行寿命期内预计可处理的厨余垃圾总量，并提供相关的计算方式与证明。

④可行性分析：

投资建设成本是常规财务指标，《中国农村生物质能利用技术和经济评价》《矿产节约与综合利用技术经济评价方法初探》等采用了投资建设费用这一指标评价相关费用。本指标体系立足与对厨余垃圾进行资源化处理，因此将单位设置为“每日处理厨余垃圾的吨均投资建设费用”。

(18) E_{c4}：处理单位厨余垃圾的运行成本

①指标解释

对单位厨余垃圾的资源化利用的运作过程中，厨余垃圾的运输、处理及其产生的水费、电费、气费、人工费、原辅材料费、设备维护与修理费、设备折旧费等相关运行费用。

②计算方法

$$\text{处理单位厨余垃圾运行成本(元/吨)} = \frac{\text{报告期内总运行成本(元)}}{\text{报告期内处理厨余垃圾总量(吨)}}$$

③所需参数与数据获取：

1.报告期内总运行成本

填写《资料采集表》进行上报，并上报各种子类别及其相应的费用，包括但不限于报告期内厨余垃圾资源化技术实施过程中所涉及的水费、电费、气费、人工费、原辅材料费、设备维护与修理费、仓储费、废物处理费、设备折旧费等相关运行费用。

2.报告期内处理厨余垃圾总量

填写《资料采集表》，上报报告期内（如一年之内）该技术运行处理的厨余垃圾总量。若企业无法提供相应统计数据，则根据技术的实际运行情况，在统一规定的短期之内（如一天或一周）对技术处理的厨余垃圾总量进行核算或测量，或相关数据测量直接以资源化单位厨余垃圾为基准。

④可行性分析：

运行成本是常规财务指标，《中国农村生物质能利用技术和经济评价》一文中，在评价中国农村生物质能利用技术时，也采用了运行成本这一指标。本指标体系立足与对厨余垃圾进行资源化处理，将本指标设置为“处理单位厨余垃圾的运行成本”。

3.4 社会指标

社会指标包括当地社区与社会影响、职工安全与福利两部分，对厨余垃圾资源化技术的社会影响进行评价。

3.4.1 当地社区与社会影响

（19）S₁：单位投资提供的就业岗位

①指标解释

指投资运行该厨余垃圾资源化技术，单位投资额下创造的工作岗位。

② 计算方式

$$\text{单位投资提供的就业岗位(个/万元)} = \frac{\text{技术运行提供的总就业岗位数(个)}}{\text{总投资建设费用(万元)}}$$

③ 所需参数与数据来源:

1. 总投资建设费用

填写《资料采集表》进行上报,并主动上报投资建设的各个子项目及其相关费用,检测单位进行核实。

2. 技术运行提供的总就业岗位数

填写《资料采集表》进行上报,并主动上报所有的就业岗位类型以及相应的人数,检测单位进行核实。

④ 可行性与必要性分析:

该指标能够反映技术的实施对当地就业的贡献。文献《科技项目社会经济效益综合评价研究》也提出采用该指标评价科技项目带来的社会效益。

(20) S₂: 循环经济示范性

① 指标解释

该技术是否属于国家或地方鼓励的发展方向或重点推荐的技术。

② 计算方式

根据该技术是否属于国家或地方鼓励的发展方向,或是否属于国家重点推荐的技术,若是,则得分为1,若否,则得分为0。

③ 所需参数与数据获得:

根据已有国家或地方官方文件判定,鼓励的发展方向或重点推荐的技术是否包含该资源化技术。企业也可以主动提供相关证明。

参考官方文件有《工业厨余垃圾综合利用先进适用技术目录》《国家工业资源综合利用先进适用技术装备目录》等。

④ 可行性分析:

循环经济示范性指标可以衡量技术对国家政策的符合性,即其对国家、地区政策方针和发展方向符合程度的分析与认定。文献《秸秆人造板项目的社会效益评价》也提出该指标对秸秆人造板项目进行评价,反映其技术项目的社会效益。

(21) S₃: 公众对技术实施的态度

① 指标解释

指当地民众对该厨余垃圾资源化技术相关项目在当地投资运行的态度。

② 计算方式

对该指标进行定性分级，对当地民众进行问卷调查，获得当地民众态度。

③ 所需参数与数据获得：

通过问卷调查，了解当地居民该技术的态度以及该技术在当地实施的态度。

④ 可行性与必要性分析：

公众对技术实施的态度能够反映该技术在当地的实施是否受欢迎，一定程度上体现“邻避效应”的风险，从在居民的反应这一角度出发衡量该技术实施的社会效益。就如同环境影响评价需要公众参与一样，厨余垃圾资源化技术的实施也需要公众参与。

3.4.2 职工安全与福利

（22）S4：职业暴露风险

① 指标解释

指员工是否有直接暴露在不良工作环境条件的情况，以及何种类的不良工作环境。

② 计算方式

根据员工的工作环境进行定性评级，共分为 8 级，下列 8 种情况存在一种累计加一级，最低 0 级，最高 8 级。具体包括 a.暴露在腐蚀/有毒化学品环境下、b.暴露在高温表面、c.暴露在高速部件、d.暴露在泼溅条件下、e.暴露在高压电下、f.暴露在高分贝噪音下、g.暴露在难闻气味下、h.暴露在充满灰尘工作条件下。

根据在工作环境中涉及的暴露风险种类的数量，进行打分，打分准则如下表 4.3.4 所示，打分范围在 0-1 之间。

表 4.3.4 工作环境暴露风险评分准则

存在暴露风险种类的数量（个）	0	1	2	3	4	5	6	7	8
得分（0-1）	1	0.875	0.75	0.625	0.5	0.375	0.25	0.125	0

③ 所需参数与数据获得：

检测单位到技术实施现场进行实地考察，根据该技术具体的工作环境，是否涉及上述 8 个暴露风险，来进行评级打分。

④可行性与必要性分析：

该指标能够一定程度上反映该技术的实施对员工带来的安全健康风险，在员工水平上体现其社会效益。文献《A Framework and Metrics for Sustainable Manufacturing Performance Evaluation at the Production Line, Plant and Enterprise Levels》提出了“暴露在腐蚀性/有毒化学品”“暴露在高温表面”“暴露在高速部件和飞溅”“暴露在高压电下”“暴露在高分贝噪音下”5个指标衡量对员工的安全风险，本指标进行相应的整理与改善，更好的反映员工角度下的社会效益。

4. 评价方法

4.1 指标无量纲化

各指标因量纲不同，不能直接比较，需建立原始指标无量纲化的函数。

4.1.1 定量指标无量纲化

若指标为正向指标：

$$y = \begin{cases} 1, & a_2 \leq x \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 < x < a_2 \\ 0, & 0 \leq x \leq a_1 \end{cases}$$

若指标为负向指标：

$$y = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a_1 \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & a_1 < x < a_2 \\ 0, & a_2 \leq x \end{cases}$$

式中， a_1 和 a_2 分别为该指标的上下限值； x 为原始指标值， y 为无量纲化后的指标值。

注： a_1 、 a_2 设置的方式有三种：（1）针对本指标体系，每个指标设置一个统一的 a_1 和 a_2 ，对所有类型厨余垃圾均采用该上下限；（2）针对每一种特定厨余垃圾，每个指标设置一个专属 a_1 和 a_2 ，即不同的厨余垃圾类型对应的上下限值不同；（3）对于进行比较的几种厨余垃圾资源化技术，对每个指标，各技术最高值为上限 a_2 ，最低值为下限 a_1 。

4.1.2 定性指标的无量纲化

定性指标本身在定量化计算时，取值就在 $[0, 1]$ 之间，无需再进行无量纲化，即 $y = x$ 。

4.2 综合评价指数的计算

通过加权平均、逐层收敛可以得到待评价技术在第*i*维度下的得分 D_i 。

$$D_i = \sum_{j=1}^m (W_{i,j} \sum_{k=1}^n w_{i,j,k} y_{i,j,k})$$

式中， $W_{i,j}$ 为第*i*维度第*j*分类层的权重； $y_{i,j,k}$ ——第*i*个维度第*j*个分类层第*k*个指标无量纲化出来后的值； $w_{i,j,k}$ 为第*i*个维度第*j*分类层第*k*个指标的权重，拟采用双重均一权重分析，即各维度下各指标权重相同，各维度之间权重相同。

对各个维度的值进行加权平均后可得到评价对象的总分 S 。

$$S = \sum_{i=1}^n D_i$$

4.3 技术资料采集表

在本研究中，采用以下技术资料采集表对某项技术的相关信息收集。

填报基本信息						
填报单位						
技术信息采集责任人		联系方式				
技术应用单位（企业）						
技术应用单位地址						
厨余垃圾资源化技术名称						
填报时间		项目投产时间				
报告期及时间跨度		起始：_____ 结束：_____ 周期：_____				
厨余垃圾类型 ¹		编号：	大类		小类	
资源化产品类型 ¹		编号：	大类		小类	
厨余垃圾资源化技术类型 ¹						
厨余垃圾设计处理规模		吨/年				
技术就绪度自评 ²		TRL1	TRL2	TRL3	TRL4	TRL5
报告期处理厨余垃圾总量		吨/日				
建筑面积（m ² ）（用于厨余垃圾处理的车间占地面积）						
数据收集表						
指标维度	对应指标名称	物质清单		必要性 （★必填；☆选填）	数值	单位
资源利用	处理单位厨余垃圾原辅料消耗量	原辅料 1		★		千克/吨（厨余垃圾）
		原辅料 2		★		千克/吨（厨余垃圾）
		原辅料 3		★		千克/吨（厨余垃圾）
				★		千克/吨（厨余垃圾）
	处理单位厨余垃圾综合能耗	电消耗量		★		千瓦时/吨（厨余垃圾）
		煤消耗量		★		吨/吨（厨余垃圾）
		天然气消耗量		★		立方米/吨（厨余垃圾）
		蒸汽消耗量		★		吨/吨（厨余垃圾）
		其他能源消耗量		★		____/吨（厨余垃圾）
		综合能耗量		★		标准煤/吨（厨余垃圾）
	处理单位厨余垃圾新鲜水消耗量	新鲜水消耗量		★		千克/吨（厨余垃圾）
	厨余垃圾整体利用率	进入到资源化生产过程中的厨余垃圾量		★		吨/吨（厨余垃圾）
	战略资源利用率	厨余垃圾含有的战略矿产资源种类	必要性	厨余垃圾中含有的质量	技术提取并资源化利用的质量	单位

		天然气	★			立方米/吨（厨余垃圾）
		磷	★			吨/吨（厨余垃圾）
		钾盐	★			吨/吨（厨余垃圾）
	处理单位厨余垃圾回收资源的稀缺性贡献	技术提取并资源化利用的其他资源种类		必要性	数值	单位
		资源 1		☆		吨/吨（厨余垃圾）
		资源 2		☆		吨/吨（厨余垃圾）
		资源 3		☆		吨/吨（厨余垃圾）
				☆		吨/吨（厨余垃圾）
	水循环利用率	循环水利用量		☆		千克/吨（厨余垃圾）
		废水利用量		☆		千克/吨（厨余垃圾）
	余热利用率	利用余热量		☆		标准煤/吨（厨余垃圾）
环境影响	对应指标名称	经过正规机构检测的各种污染物排放与新厨余垃圾产生类型（1 个报告期）		必要性	环境污染 物排放强度	单位
	大气污染物	SO ₂		★		千克/吨
		NO _x		★		千克/吨
		CO ₂		★		千克/吨
		其他：_____		★		千克/吨
	污水	污水		★		千克/吨
	水污染物	COD		★		千克/吨
		BOD		★		千克/吨
		NH ₃ -N		★		千克/吨
		TP		★		千克/吨
		其他：_____		★		千克/吨
	固体废物	固体废物种类 1：_____		★		
		固体废物种类 2：_____		★		
		固体废物种类 3：_____		★		
	其他污染物	污染物种类：_____		★		
经济指标	对应指标名称	数据清单		必要性	数值	单位
	净利润率	销售净利润率		★		%
	净现值	净现值		★		--
	处理单位厨余垃圾的投资建设费用	投资建设费用		☆		万元/吨
	单位运行成本	单位运行成本		☆		元/吨
	专利价值	专利价值		☆	____件 相关专利价值____万元	
社会指标	对应指标名称	数据清单		必要性	数值	单位
	单位投资提供的就业岗位	提供就业岗位数		★		个/万元
	循环经济示范性 ³	循环经济示范性		☆	具备	不具备
	公众对技术实施的态度 ⁴	公众对该技术的满意度占比		☆		%

	职业暴露风险 ⁵	职业暴露风险	★	共__项潜在职业暴露风险，评价为__级
说明	1. 根据本项目确定的《厨余垃圾资源化技术分类表》搜索并输入； 2. 根据《技术就绪度分级表》提供相应的推广应用证明、技术鉴定书等证明材料，在评价系统中，选择了TRL分级会自动筛选必须提交的数据，也会自动去除不必要的表格； 3. 需提供循环经济领域相关的符合性文件； 4. 通过问卷调查或项目环境影响评价的公众参与报告获得； 5. 测评机构参阅环评、安评报告并到技术应用现场进行评价，职业暴露风险包括：a.暴露在腐蚀/有毒化学品环境下；b.暴露在高温表面；c.暴露在高速部件；d.暴露在泼溅条件下；e.暴露在高压电下；f.暴露在高分贝噪音下；g.暴露在难闻气味下；h.暴露在充满灰尘工作条件下。			

第四章 厨余垃圾处理技术评价案例研究

结合当前我国已有的厨余垃圾处理实践，本研究按照集中式、分散式、终端处置三大类划分的方式，并根据技术原理、规模、分布模式等进行细分，共筛选了 16 个技术应用案例进行研究。当前我国厨余垃圾处理行业的主要企业、技术和项目梳理见附件 1，表 5.1.1 为我国已投入应用的厨余垃圾处理技术分类说明。本研究大中型规模厨余垃圾处理技术资料主要来源于项目可行性研究报告、环境影响评价报告，中小型规模的厨余垃圾处理技术资料主要来源于现场调研和实测采样分析。因为技术在应用过程中可能存在建设、运行等方面的差异，而本研究的主要目的是为了评价各类技术特点并提出优化方向。因此在实际运行中，部分技术的运行参数和可研报告存在一定的差异，在本研究以可研报告提供的数据为准，并在讨论部分对运行现状的不足进行了分析。

表 5.1.1 我国已投入应用的厨余垃圾处理技术分类

类型	原理	技术细分	规模	模式	就绪度	技术名称
资源化	厌氧	干式	大型	集中	4	大型集中干式厌氧消化技术
资源化	厌氧	湿式	大型	集中	5	大型集中式厌氧消化技术
资源化	好氧	翻抛	小型	分散	4	小型分散堆肥桶技术
资源化	好氧	堆肥桶	大型	集中	3	大型集中好氧生物堆肥技术
资源化	好氧	生物处理机	中型	分散	4	中型分散好氧生物处理及技术
资源化	好氧	生物处理机	小型	分散	4	小型分散好氧生物处理及技术
资源化	好氧	翻抛	小型	分散	5	小型分散好氧简易堆肥技术
资源化	微小食腐动物处理	黑水虻	大型	集中	3	大型黑水虻集中微小食腐动物处理技术
资源化	微小食腐动物处理	黑水虻	小型	分散	4	小型黑水虻集中微小食腐动物处理技术
无害化	热处理	焚烧	大型	集中	5	大型集中焚烧处理技术
无害化	热处理	热解	中型	分散	2	中型分散热处理技术
无害化	填埋处置	卫生填埋	大型	集中	5	大型集中填埋处置技术

（一）集中式处理技术

1. 厌氧消化

厌氧消化是应用最广泛的厨余垃圾处理技术之一。按照厌氧反应器的操作条件，如进料的含固率、运行温度等，厌氧消化处理技术可以分为以下几类：1）按照固体含量分为湿式、干式（前者一般在 10%-15%，后者一般在 20%-40%）；

2) 按照反应温度分为中温、高温(前者一般在 35-40℃, 后者一般在 50-60℃)。本文选取 1 项干式厌氧和 2 项湿式厌氧消化技术评测其多维绩效。

1.1 干式厌氧 A

(1) 案例介绍

我国在建的大型厨余垃圾处理厂中, 干式厌氧消化是应用的较多的技术类型。干式厌氧 A 项目是近些年典型的大型中温干式厌氧消化技术应用项目。2013-2017 年, 当地与世界银行合作实施了“世行贷款城镇生活废弃物收集循环利用示范项目”, 该项目旨在建设创新型的生活垃圾分类回收循环利用示范体系, 实现城市生活垃圾分类回收、循环利用的可持续发展, 进而最大程度上实现城市生活垃圾无害化、减量化和资源化。项目所在地发改委和世界银行以此为基础, 分别于 2012 年 10 月和 2013 年 5 月批复了厨余垃圾处理项目, 工程设计处理规模为 800 t/d, 一期为 400 t/d, 占地面积(建构筑物 and 道路面积, 下同) 30115 m², 主要负责处理城市中心城区的厨余垃圾。

图 5.1.1 为干式厌氧 A 项目物料平衡图。项目所在地的厨余垃圾含固率约为 16.5%。在预处理阶段, 竹木、织物和金属等被人工或磁选等工艺分离出, 而后厨余垃圾在搅拌后进入厌氧消化罐中发酵处理, 其中沼液可循环利用。厌氧消化的产物主要是沼气(32000 m³/d)和沼渣(334 t/d)。部分沼气被用于锅炉房发热产生蒸汽进入返混料箱, 其余沼气精制后储存于沼气罐中外运售卖。沼渣经过旋流出砂、离心脱水和螺旋压榨后进入焚烧厂处理。离心和压榨而出的废水由污水处理站负责处理。该工艺的主要投入包括: 1) 厨余垃圾 400 t/d, TS (total solids, 含固率, 下同) 约为 16.5%; 2) 自来水 83 t/d, 来自市政供水。主要产出为: 1) 竹木、织物、金属等固废 62 t/d, 主要去往填埋场或外售; 2) 废水 295.5 t/d, 去往污水处理厂; 3) 脱水沼渣 70 t/d, 去往生活垃圾焚烧厂; 4) 沼气 27125 m³/d, 外售。

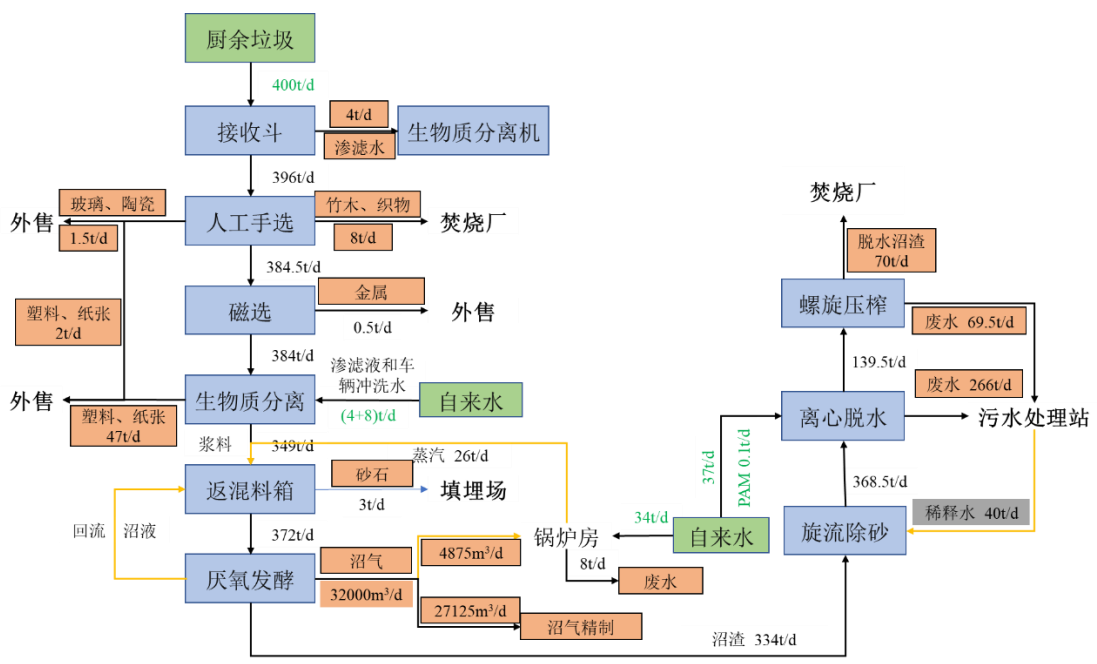


图 5.1.1 干式厌氧 A 项目物料平衡图

(2) 评价指标

表 5.1.2 即为干式厌氧 A 项目技术的评价指标计算结果。

表 5.1.2 干式厌氧 A 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.198
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.019
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.198
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	75.3
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	83.5
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.104
		R ₇ .水循环利用率	%	40.3
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	112.8
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	0.437
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.304
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	7.274
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	0.011
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	0.450
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	30.9
		E _{c2} .净现值比率	--	31349.7
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	64.1
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	170.1
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0023
		S ₂ .循环经济示范性	分	1.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.625

1.2 湿式厌氧 A

(1) 案例介绍

湿式厌氧消化多用于含水率较高的餐饮垃圾大型处理厂，目前也有将餐饮垃圾和厨余垃圾协同进行处理的湿式厌氧消化项目。本文以湿式厌氧 A 项目为典型案例介绍相关情况。2007 年，项目所在地主城区的餐厨垃圾产量约为 235 吨/日，折合万人日产餐厨垃圾 1.26 吨，TS 约为 22.61%。到 2017 年，当地中心城区餐厨垃圾产量超过 500 吨/日。

项目所在地主城区餐厨垃圾含水率高，适合采用湿式厌氧消化工艺；考虑到成本和维护费用，采用高温、单相厌氧消化路线，设计处理能力为 200 t/d。该项目投资预算为 1228.28 万元，占地面积为 13268 m²，劳动人员定额 53 人。餐厨垃圾经过预处理分选出杂质（3 t）后，进入缓冲罐中，此时将园区洗车废水和循

环使用的发酵废水与餐厨垃圾在缓冲罐搅拌混合均匀，然后进行重物质分离，由泵打入发酵罐中进行厌氧消化（430.8 t/d, TS=9.8%）。发酵罐采用连续方式进料，正常情况下每日进料 10 小时。发酵过程中产生的沼气经过净化处理后储存于沼气储罐，发酵过程中的热源来自于燃气燃油两用锅炉以保证发酵罐 55 °C，部分沼气作为厌氧消化罐热源。发酵后的沼渣与少量园林垃圾混合后利用现有的堆肥设施进行堆肥，最终产出肥料。根据物料平衡图（图 5.1.2），该处理厂的高温湿式厌氧消化的投入物料为：厨余垃圾 200 t/d、园林垃圾 5 t/d、洗车废水 32 t/d。产出物料为：固废 3 t/d、沼气 31 t/d、肥料 31 t/d、絮凝液 27.5 t/d 和废水 190.9 t/d。

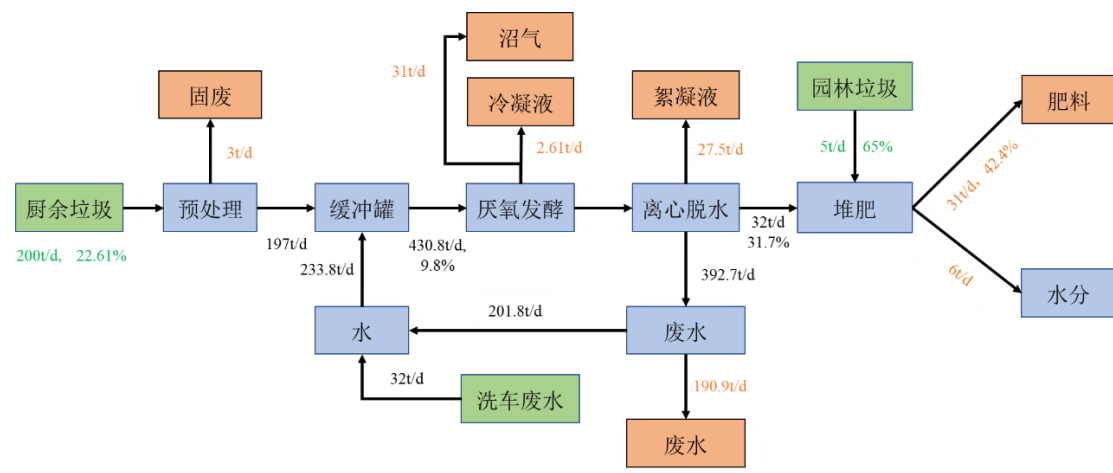


图 5.1.2 湿式厌氧 A 项目物料平衡图

(2) 评价指标

表 5.1.3 为湿式厌氧 A 项目技术的评价指标计算结果。

表 5.1.3 湿式厌氧 A 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.323
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.004
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.298
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	66.3
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	1.0
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.067
		R ₇ .水循环利用率	%	77.2
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	27.9
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	1.546
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.275
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-9.939
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	0.010
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	-0.319
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	25.7
		E _{c2} .净现值比率	--	7419.1
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	50.9
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	111.4
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0051
		S ₂ .循环经济示范性	分	1.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.625

1.3 湿式厌氧 B

(1) 案例介绍

湿式厌氧 B 项目为近年典型中温湿式厌氧消化案例，占地 15765.27 m²，总投资 28966.85 万元，承担当地 9 个街镇的餐饮垃圾和厨余垃圾处理处置。此项目同时处理餐饮垃圾和厨余垃圾，含水量较高，故采用湿式厌氧消化路线。在预处理阶段，餐饮垃圾采用“大物质分选—制浆分选—除渣—油脂提纯”路线，厨余垃圾采用“粗破碎—磁选—滚筒筛—生物物质分离—挤压脱水—调浆除砂”路线。经预处理后的浆液进行厌氧消化，产生的沼气经过脱硫、脱碳净化提纯处理后，制备生物天然气；沼渣脱水后送至焚烧厂处理，沼液由污水处理厂高浓度污水处理系统协同处理。

图 5.1.3 即为该项目物料平衡图。厨余垃圾（200 t/d，TS=30%）经过预处理

和生物质分离机后，进入挤压机去除难以破碎的固废，完成预处理（97.8 t/d，TS=21.46%）。同时，餐饮垃圾（200 t/d，TS=15%）经过大分子分离、精分制浆等后进入油水分离阶段（313 t/d，TS=8.89%）。油水分离需要额外的蒸汽输入（8.93 t/d）。而后混合回用水后（184.43 t/d，TS=11.0%），与厨余垃圾混合。进入发酵罐的物质为 423.23 t/d，TS=9.9%，经过发酵后，主要产物为沼气，次要产物为沼渣和沼液。

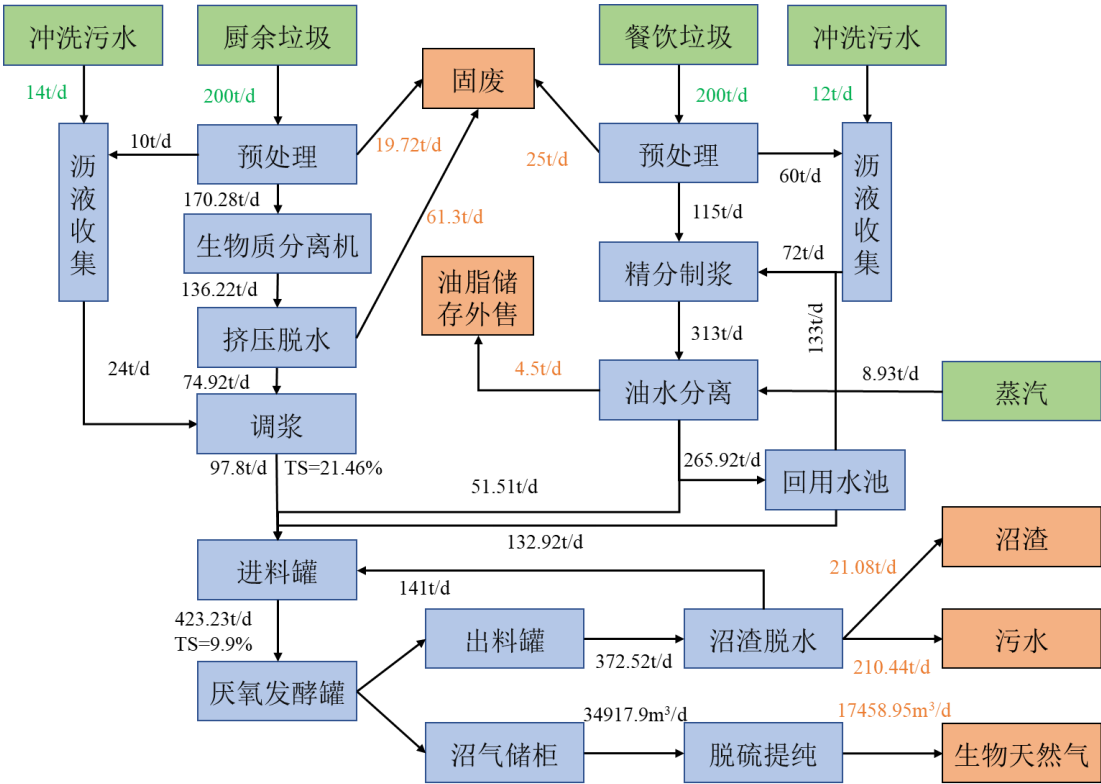


图 5.1.3 湿式厌氧 B 项目物料平衡

（2）评价指标

表 5.1.4 即为湿式厌氧 B 项目的评价指标计算结果。该项目的能耗相对于湿式厌氧 A 项目较小的原因在于自产沼气的回用，且处于热带与亚热带交界处，环境温度较高，有利于发酵过程，节约能耗。

表 5.1.4 湿式厌氧 B 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.066
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.012
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.065
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	39.4
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	0.6
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.021
		R ₇ .水循环利用率	%	84.2
		R ₈ .余热利用率	%	25.0
环境影响 (En)	全生命周期环境影响(En)	En ₁ .气候变化	kg CO ₂ eq/t	54.0
		En ₂ .酸化	kg SO ₂ eq/t	0.096
		En ₃ .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.057
		En ₄ .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-2.881
		En ₅ .生态毒性	kg P eq/t	0.001
		En ₆ .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	-0.297
经济影响 (Ec)	经济可持续性	Ec ₁ .销售净利润率	%	21.2
		Ec ₂ .净现值比率	--	29899.6
		Ec ₃ .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	68.8
		Ec ₄ .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	277.4
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0015
		S ₂ .循环经济示范性	分	1.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	4.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.625

2. 好氧生物处理

好氧堆肥是在有氧的条件下，借助好氧微生物进行的。在堆肥过程中，有机废物中的可溶性物质透过微生物的细胞壁和细胞膜被微生物吸收。固体和胶体也可由微生物分泌的胞外分解酶等物质分解后进入微生物内。微生物通过自身的生命活动（氧化还原和生物合成），把一部分有机物氧化成简单的无机物，并释放出生命活动所需的能量，把剩余有机物合成新的细胞物质，用于微生物生长繁殖，产生更多的生物体。

好氧发酵过程可按照反应不同大致划分为三个阶段：1）中温阶段。这是堆肥化的初期，嗜温微生物（包括真菌、细菌和放线菌等）较为活跃，主要以淀粉类和糖类等可溶性有机物为基质，进行自身的新陈代谢过程。2）高温阶段。当堆温升高至 45℃ 以上时，即为高温阶段。在这个阶段，嗜温微生物受到抑制甚至死亡，嗜热微生物成为主导。堆料中的残留有机物继续被氧化分解。3）降温阶

段。在堆肥后期，残余部分和新形成的腐殖质逐渐稳定下来，进入腐熟阶段，堆肥过程基本结束。

相对于集中式大型好氧发酵处理厨余垃圾，小型好氧堆肥避免了厨余垃圾的长距离收运，做到及时就地处理。此类技术的建设周期较短、单体投资较小，还可以利用现有的生活垃圾转运站用地，目前已成为厨余垃圾处理的主流技术之一。小型好氧堆肥在原理上与集中式大型好氧堆肥并无明显区别，但因为缺乏工业化组合分选线，因此此类技术的应用对居民的厨余垃圾的分类投放（包括破袋等）提出了更高要求。在供氧充足的条件下，产生的主要温室气体是 CO₂、CH₄、N₂O。其中生物碳代谢产生的 CO₂ 在政府间气候变化专门委员会（IPCC）的定义中按碳中性（carbon neutral）计算，因此仅考虑后两项的温室气体排放。但实际过程中，就地堆肥减量往往难以避免厌氧过程的发生，还会产生 H₂S 和 NH₃ 等恶臭气体。由于小型好氧堆肥大多应用于社区，规模较小，往往无气体、液体等污染物排放检测设备，对于其环境影响需类似案例的实际监测结果计算。以美国为例，美国环保署（USEPA）发布的报告《Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks, 1990-2018》中专门对垃圾堆肥的温室气体排放进行了核算，见表 5.1.5^[132]，可作为参考值。其他典型厨余垃圾堆肥的文献整理参见表 5.1.6，本报告中对各缺乏实际监测的好氧堆肥案例环境影响评价按照文献报道的平均数计算。

表 5.1.5 美国有机垃圾堆肥温室气体产量估算^[132]

Year	合计 (kt)			GHG 排放 (kg/t)	
	CH ₄	N ₂ O	堆肥处理的垃圾量	CH ₄	N ₂ O
1990	15	1	3810	3.9370	0.2625
2005	75	6	18643	4.0230	0.3218
2014	84	6	20884	4.0222	0.2873
2015	85	6	21219	4.0058	0.2828
2016	91	7	22780	3.9947	0.3073
2017	98	7	24485	4.0025	0.2859
2018	98	7	24594	3.9847	0.2846

表 5.1.6 厨余垃圾堆肥的温室气体 (GHG) 排放文献综述

GHG (kg/t)	N ₂ O	CH ₄	NH ₃	H ₂ S
文献 ^[133]	0.4190	1.3200		
文献 ^[134]	0.3840	0.0960		
文献 ^[135]	0.2226	1.7880		
文献 ^[136]	0.2750	0.0020		
文献 ^[137]	0.3058	1.4720		
文献 ^[138]	0.0520		2.4683	
文献 ^[139]	0.1355	0.5515	0.3443	
文献 ^[140]				0.0964
文献 ^[141]			3.8023	0.5186
文献 ^[142]			3.5001	0.6666
文献 ^[143]			2.2833	0.2040
文献 ^[144]			1.0428	0.0593
文献 ^[145]			1.0425	0.0921
文献 ^[146]			1.5227	0.3740
文献 ^[147]			2.6100	0.8388
文献 ^[148]			1.3023	0.3542
文献 ^[149]			2.4675	2.3925
文献 ^[150]			0.6050	3.5125

2.1 好氧生化处理 A

(1) 案例介绍

2015 年，项目所在地居民区厨余果皮、集贸市场果蔬皮分类收集量约为 2000 t/d，餐厨废弃物日均收运量 812 t/d。好氧生化处理 A 项目的特点是将厨余垃圾和餐饮垃圾进行协同好氧堆肥处理（生物处理机）。处理厂占地面积为 25351 m²，总投资 31029 万元。

技术路线与物质平衡图见图 5.1.5。厨余和餐饮垃圾各自经过预处理后进入生物处理机进行好氧发酵，制成土壤调理剂；餐饮垃圾预处理过程中产生的渗滤液经油水分离后，回收废油脂，其余废液与厨余垃圾预处理分离出来的渗滤液等一并送到污水处理系统处理后达标排放。污水处理系统采用“厌氧处理+MBR+纳滤”的处理工艺。此项目投入物料包括：1) 餐饮、厨余垃圾各 200 t/d；2) 干料（主要为稻壳和菌剂）128.36 t/d；3) 蒸汽 14.89 t/d，产出为：1) 固体杂质 65.35 t/d；2) 粗油脂 2.17 t/d；3) 污水 129.85 t/d；4) 尾气 39.93 t/d；5) 冷凝水 130 t/d；6) 土壤调理剂 173.95 t/d。

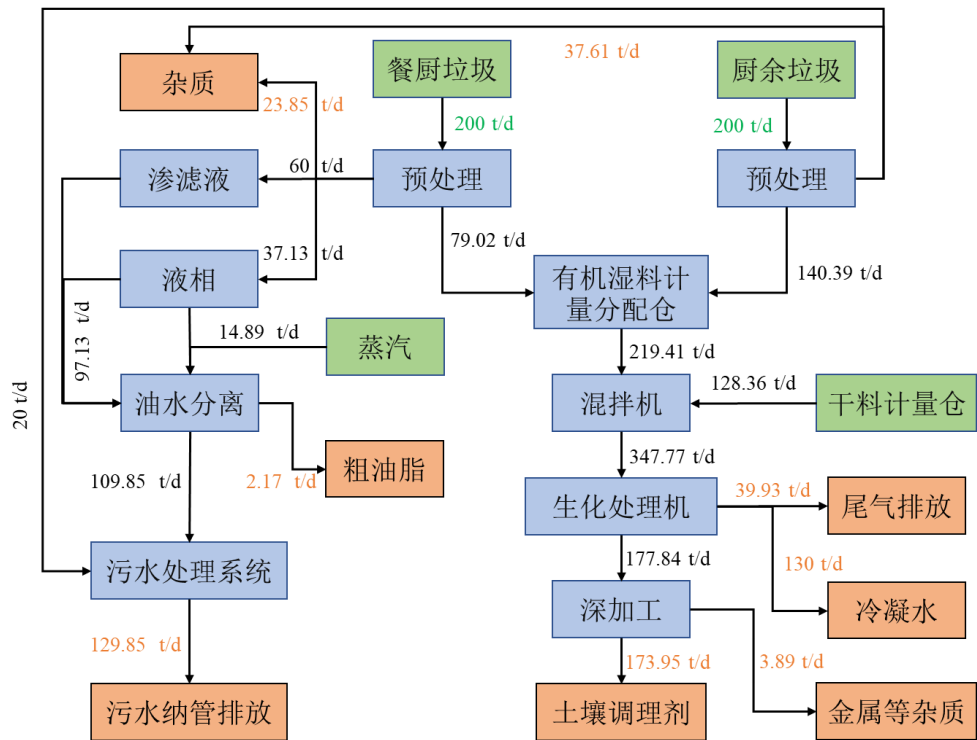


图 5.1.5 好氧生化处理 A 项目物料平衡

(2) 评价指标

表 5.1.7 即为好氧生化处理 A 项目的评价指标计算结果。该计算结果基于好氧生化处理 A 项目的环境影响评价报告。

表 5.1.7 好氧生化处理 A 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.326
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.075
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.586
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	63.4
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	0.6
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.107
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (En)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	404.9
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	0.724
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.647
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	15.754
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	0.016
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	0.829
经济影响 (Ec)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	22.1
		E _{c2} .净现值比率	--	-8823.9
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	77.6
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	615.8
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0015
		S ₂ .循环经济示范性	分	1.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.750

3. 微小食腐动物处理

本研究采用典型的微小食腐动物处理昆虫——黑水虻，评估微小食腐动物处理技术类型。黑水虻的生命周期约为 35 天，包含卵、幼虫、蛹和成虫四个阶段，有机易腐垃圾的处理阶段主要是幼虫阶段，约为 7-10 天。这一阶段的黑水虻食谱相当广泛，包括水果、蔬菜、咖啡渣、动物尸体、粪便等等，且具备较好的耐油耐盐能力。利用黑水虻处理餐厨垃圾具备以下优势：1）可减少前期预处理的难度和工作量，简化处理工序和设备投资；2）将餐厨垃圾转化为昆虫蛋白、昆虫油脂后，在一定程度上降低了食物链风险，虫卵蛋白和油脂等是高附加值的产品。

3.1 微小食腐动物处理 A

(1) 案例介绍

微小食腐动物处理 A 项目是国内较大型的黑水虻应用案例。项目所在地是全国百强县和国家级生态县。当地 2013 年餐厨垃圾总产生量为 35.9 万吨，另有 5.07 万吨居民厨余垃圾产生量。基于环境保护和生态文明建设的考量，当地决定兴建餐厨垃圾处理厂，占地约 8338.6 m²，设计处理能力 50 t/d，采用工艺为黑水虻生物处理法。

如图 5.1.6，含固率为 15% 的餐厨垃圾进入处理厂后，首先经过预处理分拣出难以处理的固废和部分油水。而后在混料器中添加菌剂和麦麸等，含固率达到 35%，完成搅拌后进入黑水虻生物处理装置处理，一至两周后完成全部代谢。主要投入为：1) 餐厨垃圾 50 t/d；2) 菌剂、麦麸等 4.84 t/d。主要产出为：1) 油脂 1.0 t/d；2) 固废 4.84 t/d；3) 污水 14.25 t/d；4) 有机肥 10.34 t/d；5) 黑水虻鲜虫 6.0 t/d；6) 虫干 0.65 t/d。详细过程见图 5.5.1。

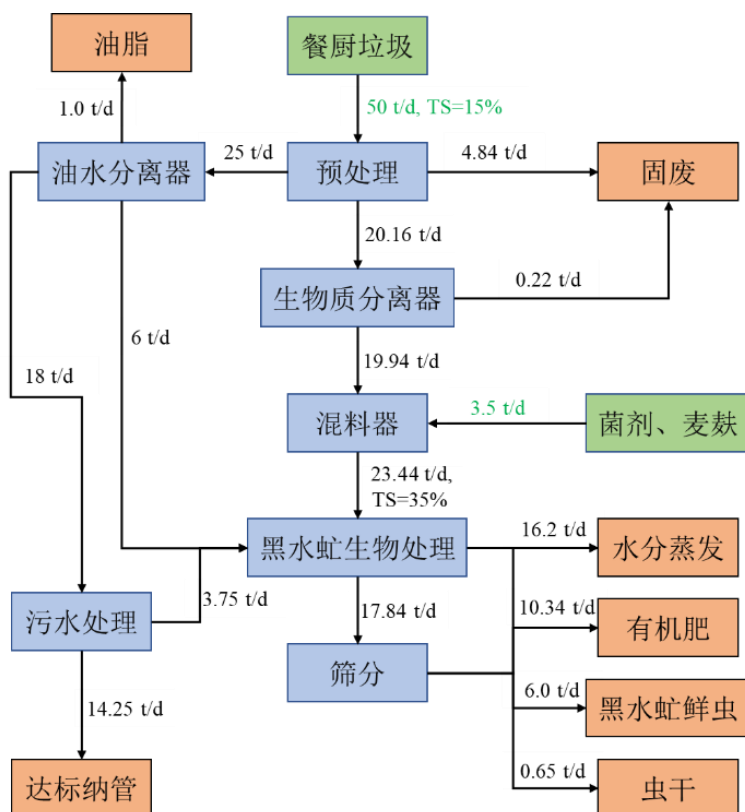


图 5.1.6 微小食腐动物处理 A 项目物料平衡

（2）评价指标

表 5.1.8 即为微小食腐动物处理 A 项目黑水虻生物处理技术的评价指标计算结果。其中，参考尹靖凯等人的工作，鲜虫中蛋白质含量按照 45.1%、脂肪按照

48.1%计算；有机肥中，蛋白含量按照 28.3%、脂肪按照 7.35%计算；虫干中，蛋白质含量按照 50.2%、脂肪 12.62%计算^[15]。

表 5.1.8 微小食腐动物处理 A 项目黑水虻生物处理多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.070
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.010
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.440
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	106.8
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	0.6
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq/t	0.223
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (En)	全生命周期环境影响(En)	En ₁ .气候变化	kg CO ₂ eq/t	41.7
		En ₂ .酸化	kg SO ₂ eq/t	0.031
		En ₃ .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.029
		En ₄ .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-7.453
		En ₅ .生态毒性	kg P eq/t	0.000
		En ₆ .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	0.033
经济影响 (Ec)	经济可持续性	Ec ₁ .销售净利润率	%	51.3
		Ec ₂ .净现值比率	--	-76.4
		Ec ₃ .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	68.0
		Ec ₄ .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	170.5
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0041
		S ₂ .循环经济示范性	分	1.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.875

(二) 分散式处理技术

1. 阳光房静态堆肥

(1) 案例介绍

静态堆肥是分散式厨余垃圾处理最常见的技术之一，其主要过程也为好氧反应，但由于物料缺乏搅动和空气接触，有时也呈现厌氧反应的特征，容易产生恶臭气体。一般而言，阳光房堆肥的生物反应所需时间较长，占地面积大，大多建于乡村。近年来，阳光房式静态堆肥在浙江金华、江苏南京等地大范围开展，是对传统堆肥技术的改进，主要体现在充分利用可再生能源（太阳能）上，且采用

设备较为简单、故障率低，对建设场地的要求也较低。

本研究以阳光房 A 项目为案例评价阳光房静态堆肥的技术表现。收集自居民的厨余垃圾经过预处理，分选出不宜堆肥的组分，而后投入到阳光房中，经过约 1 个月的静态堆肥后产出有机肥。图 5.2.1 为厨余垃圾静态堆肥示范设施，其有机肥的产出率约为 44%。



图 5.2.1 阳光房 A 项目静态堆肥示范装置

（2）评价指标

表 5.2.1 即为阳光房 A 项目静态堆肥的评价指标计算结果。该项目为较典型的乡村厨余垃圾处理技术的应用，用于减量化、资源化处理村民日常生活产生的厨余垃圾，其产物也应用到农田中。

表 5.2.1 阳光房 A 项目静态堆肥多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.056
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.000
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.000
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	3650.0
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	0.9
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.031
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	50.0
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	1.245
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.046
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-11.200
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	0.004
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	0.473
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	0.0
		E _{c2} .净现值比率	--	-201.4
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	1216.7
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	666.7
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0050
		S ₂ .循环经济示范性	分	0.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.875

2. 生物处理机

2.1 好氧生物处理 B

(1) 案例介绍

本文以好氧生化处理 B 项目为典型代表之一评价分散式好氧生物处理机的技术表现。厨余垃圾收集到转运站后,经过分选得到适宜堆肥的组分,进入到生化处理设备(图 5.2.2)中,资源化产品为有机肥,产出率约为 10%。



图 5.2.2 好氧生物处理 B 项目实景

(2) 评价指标

表 5.2.2 即为好氧生化处理 B 项目评价结果。

表 5.2.2 好氧生化处理 B 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.200
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.006
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.200
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	44.0
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	1.0
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.007
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	29.7
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	0.068
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.032
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-2.101
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	0.000
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	-0.017
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	0.0
		E _{c2} .净现值比率	--	-80.0
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	16.0
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	191.8
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0625
		S ₂ .循环经济示范性	分	1.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.875

2.2 好氧生物处理 C

好氧生化处理 C 项目是另一典型好氧生物处理机应用项目，其技术路线与

好氧生化处理 A 项目一致，但规模有较大差别。厨余垃圾经过预处理分选后的厨余垃圾由破碎机粉碎，加入木屑、菌剂等进入生物处理机好氧发酵，最终产物为土壤调理剂（含水率约为 37.5%）。图 5.2.4 既是好氧生化处理 C 项目的物料平衡。

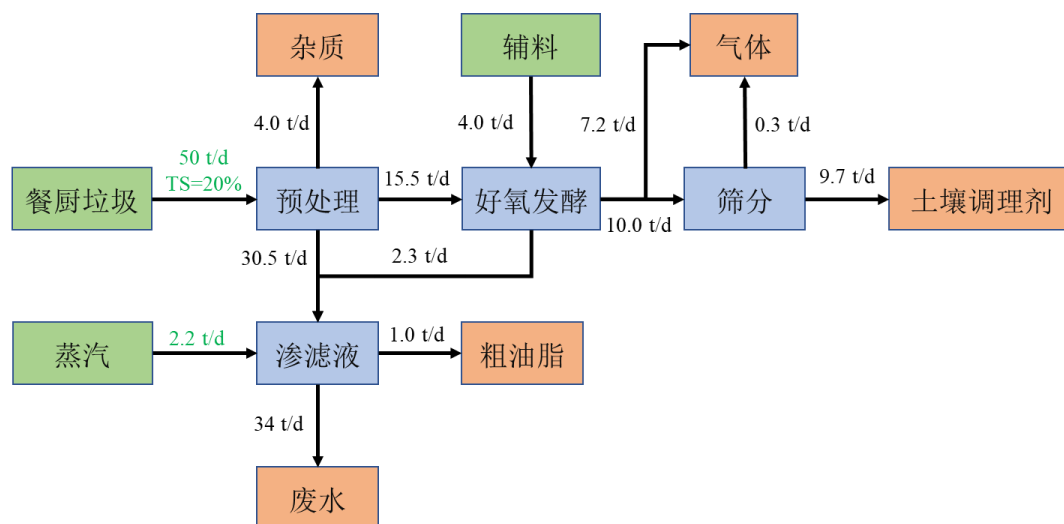


图 5.2.3 好氧生物处理 C 项目物料平衡

(2) 评价指标

表 5.2.3 即为好氧生化处理 C 项目的指标计算结果。

表 5.2.3 好氧生物处理 C 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.237
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.024
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.154
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	104.6
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	0.3
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.109
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (En)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	120.3
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	0.172
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.146
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-0.343
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	0.002
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	0.170
经济影响 (Ec)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	31.6
		E _{c2} .净现值比率	--	-1762.3
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	51.4
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	94.6
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0070
		S ₂ .循环经济示范性	分	1.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.750

2.3 好氧生物处理 D

当前，在部分地区也存在将机械预处理和好氧生化处理结合的案例。机械预处理的作用在于将厨余垃圾中的大量水分及油盐组分就地去除减量，仅保留干基物质进入生活垃圾收运处置阶段，节省运输和处置费用。本文以好氧生化处理 D 项目为例评价该技术类型。

(1) 案例介绍

好氧生物处理 D 项目主要用于处理当地产生的餐厨垃圾和农贸市场垃圾，处理量约为 720 吨/年。如图 5.2.4，好氧生化处理 D 项目的主要过程为：1) 预处理分选出非有机组分，占比约为 10%；2) 进一步机械粉碎、除油除水；3) 主要产出蛋白饲料 120 吨/年。餐厨垃圾渗滤液由小型 eMBR 垃圾渗滤液处理系统

处置达标排放。

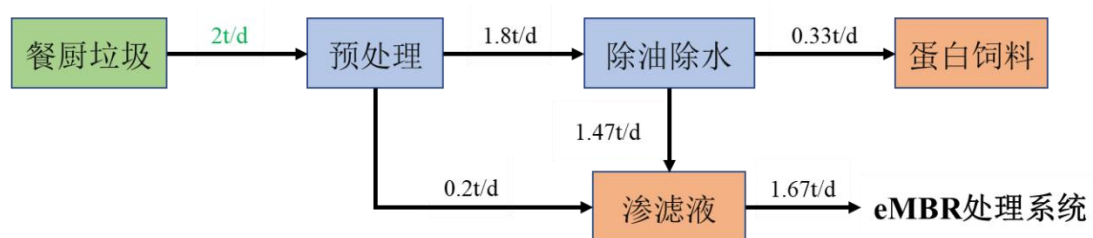


图 5.2.4 好氧生化处理 D 项目处理流程和实景

(2) 评价指标

表 5.2.4 即为好氧生化处理 D 项目的评价指标计算结果。该项目为较典型的小型化餐厨垃圾处理技术的应用，用于减量化、资源化处理中转站接收的餐厨垃圾，占地面积小，减量化程度高。

表 5.2.4 好氧生物处理 D 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.000
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.007
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.500
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	100.0
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	0.9
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.000
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	37.1
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	0.522
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.028
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	0.281
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	0.002
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	0.294
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	0.0
		E _{c2} .净现值比率	--	-40.0
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	20.3
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	62.5
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0750
		S ₂ .循环经济示范性	分	0.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	4.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.875

3. 社区堆肥

本研究对当前正在开展的厨余垃圾社区堆肥实践进行了详细调研,主要调研地点包括北京、西安、成都、绵竹和杭州等地,主要的处理手段为好氧堆肥和黑水虻微小食腐动物处理,详细调研内容见附件 2。

3.1 社区堆肥 A

(1) 案例介绍

2019 年 9 月开始,万科公益基金会对社区堆肥 A 所在社区的生活垃圾规范化管理工作进行支持,厨余垃圾的社区堆肥也借此开展。截止到 2020 年 11 月,该社区的有机垃圾社区堆肥减量工作主要在园林绿化垃圾和 10 户示范住户的厨

余垃圾中开展。园林绿化垃圾主要由物业收集处理，示范户的厨余垃圾在家中过滤后，采用定点不定时不破袋的模式投放。每户居民的厨余垃圾产量在夏季约为 2 千克/天，在冬季约为 1 千克/天，主要成分是蔬果类和剩饭，约各占 50%。该社区的堆肥设施目前为 4 个堆肥池，占地面积共约 10 平方米，基建投资 3681 元，一年的运行成本约为 15000 元。

图 5.2.5 为社区堆肥 A 项目堆肥流程。厨余垃圾被收集后，经过破袋、粉碎等，与园林绿化、老肥按照 1: 1: 1 的比例堆叠，按照 50 g/kg 的标准混入 EM 菌（Effective Microorganisms）。堆肥过程中需要一次翻堆，夏季堆肥 2-3 个月，冬季堆肥 3-4 个月后，产出有机肥。堆肥的整个过程无渗滤液产出。堆肥过程中的环境影响主要是气体的释放，将根据厨余垃圾组分和文献数据核算。该社区厨余垃圾组分中，主要是果蔬和剩饭，各占 50%。

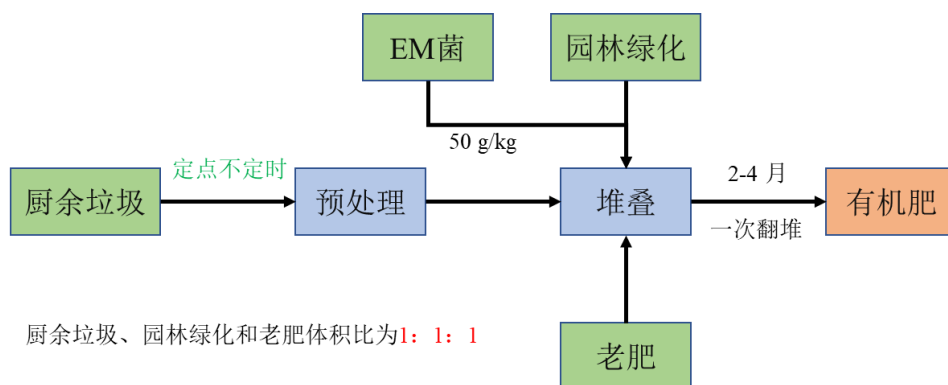


图 5.2.5 社区堆肥 A 项目堆肥流程

（2）评价指标

表 5.2.5 为社区堆肥 A 项目的评价指标计算结果。其中，堆肥过程需要厨余垃圾、园林绿化垃圾和老肥按照 1: 1: 1 的“三明治”形状堆叠，在本文计算过程中，后两者被视为辅料投入，且不计算其环境影响。此外，该案例的每日吨均土地占用较高源于其当前堆肥实践主要是基于少数试点家庭，尚未大范围推广开来。

表 5.2.5 社区堆肥 A 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	2.000
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.000
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.000
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	100.0
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	1.0
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.108
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	160.3
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	4.198
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.011
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-7.188
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	-0.002
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	-0.148
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	0.0
		E _{c2} .净现值比率	--	-0.4
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	3.7
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	411.0
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	5.43
		S ₂ .循环经济示范性	分	0.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.875

3.2 社区堆肥 B

(1) 案例介绍

社区堆肥 B 所在小区住户约 200 户，共计 700 余人，其中老年人约为 180 人。在当地爱生活家等公益组织的帮助下，该社区较早地开展了瓜果废弃物制环保酵素的实践，在社区中有较好的垃圾分类和减量的基础（图 5.2.6）。在万科公益基金会的支持下，该社区修建了 4 组（8 个）1.25*1*1 立方米/个的堆肥池，并于 2020 年 8 月 20 日开始堆肥。该堆肥设施的设计处理能力为 200-300 kg/天，但目前为止主要对园林绿化垃圾和农贸市场、商超的餐前厨余垃圾进行处理。



图 5.2.6 社区堆肥 B 所在社区环保酵素的制作和厨余垃圾堆肥池

餐前厨余垃圾和老肥混合后，与园林绿化垃圾按照 1:2 的比例混合，而后以酵素淋湿，湿度保持在 50-60%。酵素本身富含各种微生物，可部分代替菌剂。翻堆时间点保持在 1-2 个月后，总共堆肥时间约为 3-4 个月（图 5.2.6 左，因树叶未曾粉碎，当前堆肥效果不佳）。对于堆肥过程可能产生的渗滤液，该社区已经配套建设了人工湿地（图 5.2.6 右）。图 5.2.7 是社区堆肥 B 项目有机垃圾堆肥的实际产物。左图堆肥原料主要是树叶，4 个月后仍然可见较为清晰的落叶轮廓，右图是展示的堆肥最终产物，呈黑褐色，粒度较为均匀。



图 5.2.7 社区堆肥 B 项目堆肥池实际情况和人工湿地



图 5.2.8 社区堆肥 B 项目实际产物（左：堆肥 4 个月，右：堆肥完成）

（2）评价指标

表 5.2.6 即为社区堆肥 B 项目的评价指标计算结果。原辅料消耗量和每日吨均土地占用较高的原因与社区堆肥 A 项目相同。

表 5.2.6 社区堆肥 B 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	2.000
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.000
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.000
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	66.7
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	1.0
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.108
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (En)	全生命周期环境影响(En)	En1.气候变化	kg CO ₂ eq/t	160.3
		En2.酸化	kg SO ₂ eq/t	4.198
		En3.富营养化	kg NMVOC eq/t	0.011
		En4.光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-7.188
		En5.生态毒性	kg P eq/t	-0.002
		En6.人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	-0.148
经济影响 (Ec)	经济可持续性	Ec1.销售净利润率	%	0.0
		Ec2.净现值比率	--	-5.0
		Ec3.厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	16.7
		Ec4.处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	33.3
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.6000
		S ₂ .循环经济示范性	分	0.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.875

3.3 社区堆肥 C

(1) 案例介绍

社区堆肥 C 项目所在镇常住人口约为 1500 户，近 2000 人。2019 年 3 月 8 日起，当地正式开展垃圾分类工作(图 5.2.9 左)。厨余垃圾作为一项单独的分类，收集模式由定时定点转变为定时上门收集(图 5.2.9 右)。根据当地提供的有机垃圾收集、堆肥记录，该地每年处理厨余垃圾约 50.91 吨，平均每月 4.24 吨；每年处理园林绿化垃圾 13.42 吨，月均 1.12 吨(图 5.2.10)。需要说明的是，当地农户家中大多自养家禽，有相当部分的厨余垃圾在居民家中消纳。



图 5.2.9 社区堆肥 C 项目所在地 2019 年开始垃圾分类（厨余垃圾定时上门收集）

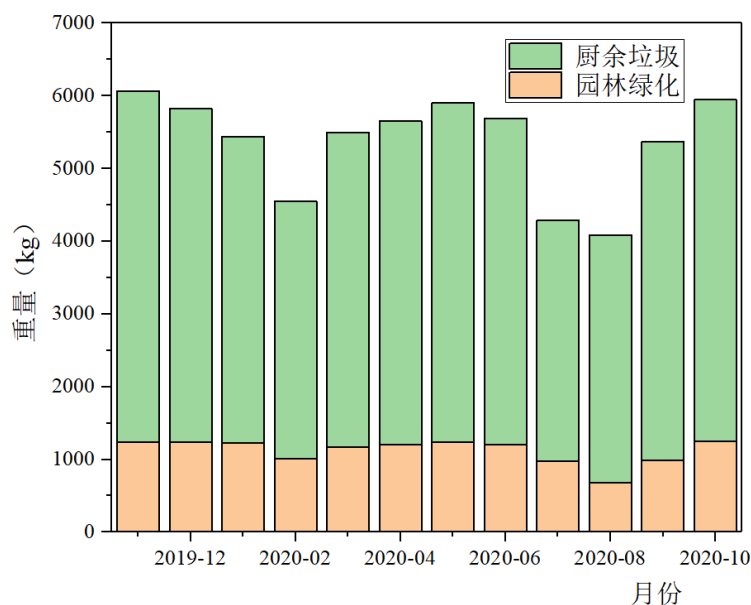


图 5.2.10 社区堆肥 C 项目所在地一年度的厨余垃圾和园林绿化垃圾处理量

该社区的厨余垃圾处理工艺也是好氧堆肥。厨余垃圾经由专门的餐厨垃圾收集车运到堆肥点（图 5.2.11）。堆肥点依托生活垃圾转运站建设，现存共 16 个 $1 \times 1 \times 1$ 立方米的好氧堆肥池。收集的厨余垃圾和粉碎后的园林绿化垃圾混合后发酵，夏季时堆肥时间约为 60 天，冬季延长 1 个月，堆肥过程的最高温度均能达到 65°C 以上。但实地调研发现，该社区的堆肥点蚊蝇众多，气味较大。可能的原因是堆肥池的建设和日常管理存在不足，渗滤液缺少相应的收集、处理设施，通风通氧的作业管理不完善。



图 5.2.11 社区堆肥 C 项目所在地生活垃圾转运站和堆肥场地

(2) 评价指标

表 5.2.7 为社区堆肥 C 项目的评价指标计算结果。

表 5.2.7 社区堆肥 C 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.500
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.000
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.000
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	40.0
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	1.0
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.108
		R ₇ .水循环利用率	%	100.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	160.3
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	4.198
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.011
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-7.188
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	-0.002
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	-0.148
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	0.0
		E _{c2} .净现值比率	--	-20.0
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	26.7
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	217.0
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.1500
		S ₂ .循环经济示范性	分	0.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.750

3.4 社区堆肥 D

(1) 案例介绍

社区堆肥 D 项目位于当地水源保护区，自然条件优良。冬季日均最低气温 0℃ 以上，植物茂密，居住条件良好。当地住户 181 户，约 500 人，多开办农家乐、花卉苗圃基地。当地公益组织城市河流研究会在此地的垃圾分类推广已经开展了数年，分类方式为四分，定点不定时。在万科公益基金会的支持下，该公益组织在此地修建了 10 个（5 组）1*1*1.25 立方米的堆肥池，总花费约 6 万元。每年 4-6 月份是该村园林绿化垃圾产量最高的时候，专职人员将其收集后储存在堆肥点。厨余垃圾每天收集量约为 100 kg，夏季的瓜果蔬菜更多，冬季由酒席、农家乐产生的高油高盐餐厨垃圾较多，整体上季节产生量没有很大变化。堆肥点有三名村民专职负责堆肥、粉碎和可回收物收集、整理，每月薪酬为 1300-1400

元。

如图 5.2.12，厨余垃圾由居民送过来后，经过分拣将塑料袋等杂质取出，而后类似“三明治”堆叠，分别为粉碎的园林绿化垃圾、厨余垃圾和老肥，每层厚度约为 5 cm。堆肥设施兼有配套的除油除盐环节，尤其是酒席产生的厨余垃圾必须经过除油除盐之后才能进入堆肥池。堆肥池由蜂窝砖建设而成，留有充足的通风通氧气孔和专门的渗滤液收集装置。有机垃圾堆肥时间整体上是 2 个月左右，最高温度可达 75℃，堆肥完成后下降到 45℃左右，无需翻堆。堆肥过程还设有专门的渗滤液处理环节—人工湿地。除油除盐和堆肥过程中产生的渗滤液经由管道汇入到种有芦苇、伞草的人工湿地中，得到净化。

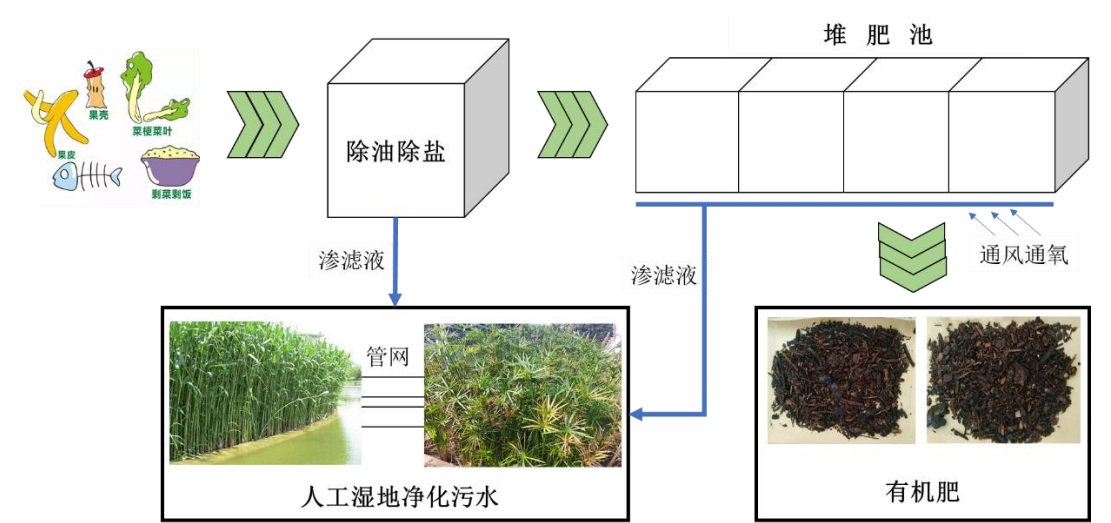


图 5.2.12 社区堆肥 D 项目堆肥流程

（2）评价指标

表 5.2.7 为社区堆肥 D 项目的评价指标计算结果。

表 5.2.7 社区堆肥 D 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	1.000
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.058
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.150
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	80.0
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	1.0
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.108
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	184.3
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	4.228
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.038
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-6.672
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	-0.001
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	-0.140
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	0.0
		E _{c2} .净现值比率	--	-6.0
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	12.0
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	547.9
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.5000
		S ₂ .循环经济示范性	分	0.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.875

3.5 社区堆肥 E

(1) 案例介绍

社区堆肥 E 项目紧靠著名的文化遗址，又有距当地市区中心最近的丘陵绿地和水网平原相结合的生态环境。社区堆肥 E 所在地目前万科物业在管 17 个项目，总户数 19877 户，目前入住 12928 户，入住率 65%。绿化养护面积近 80 万平方米，绿化垃圾年产生量约 1600 m³。



图 5.2.13 社区堆肥 E 项目所在地概况

在万科公益基金会的支持下，公益组织自然学堂在项目所在社区东南争取到劝学公园作为科教基地，号召周围住户参与到垃圾分类、厨余堆肥、自然耕作和家禽养殖等实践活动中（图 5.2.14）。对于厨余垃圾的处理，自然学堂以好氧堆肥为主，当地的厨余垃圾收运已经形成了完善的体系，自然学堂只能从学校、厨余垃圾转运站获得一些分类收集的厨余垃圾用作堆肥。



图 5.2.14 自然学堂劝学公园实践基地和种植实践

因为场地和资金的原因，该基地尚未修建堆肥池（已有计划），有机垃圾堆肥采用编织袋露天堆放的形式进行（图 5.2.15）。收集而来的厨余垃圾和园林绿化垃圾 1:1 混合后，按照 15 kg/t 有机垃圾的比例添加尿素，然后盛装在编织袋中，露天堆放。实地随机采样发现，编织袋的核心温度能够达到 60℃ 以上，堆肥产物呈现棕褐色，肉眼难以观察到厨余垃圾成分，主要是破碎的园林绿化垃圾。



图 5.2.15 有机垃圾由编织袋盛装，露天堆肥和堆肥样品

(2) 评价指标

表 5.2.8 即为社区堆肥 E 项目的评价指标计算结果。

表 5.2.8 社区堆肥 E 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.015
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.002
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.150
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	40.0
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	1.0
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.000
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	169.3
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	4.208
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.021
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-6.995
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	-0.002
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	-0.145
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	0.0
		E _{c2} .净现值比率	--	-5.0
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	10.0
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	200.0
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.4000
		S ₂ .循环经济示范性	分	0.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.750

4. 微小食腐动物处理

4.1 微小食腐动物处理 B

(1) 案例介绍

在万科自然基金会的支持下，微小食腐动物处理 B 所在社区建设了黑水虻生物处理设施专职负责小区内厨余垃圾的处理，成为当地垃圾分类与厨余垃圾处理的示范小区。图 5.2.16 展示了该小区厨余垃圾处理的物料平衡。该小区当前共计入住 644 户居民，约 2000 人，夏季每日约产生厨余垃圾 420 kg，冬季约为 250 kg。当前，该小区建有厨余垃圾处理设施一座，占地约为 20 m²，处理能力为 100 kg/d，投资 38.8 万元，每日耗电均值为 2.519 度，需要 1 名劳动力（成本约为 7000 元/月）。

该工艺的主要投入为：1) 厨余垃圾 100 kg/d；2) 五日龄幼虫 10 g/d。主要产出为：1) 虫粪 0.03 t/d，而后与园林垃圾、水、发酵剂和促进剂混合，置于发酵设施中堆肥，最终产出有机肥；2) 老熟幼虫 0.02 t/d，进一步处理后成为高蛋白饲料。在厨余垃圾黑水虻生物处理的基础上，该小区将黑水虻虫粪和园林垃圾结合起来开展了简易堆肥：混合水、促进剂和发酵剂后，园林垃圾与虫粪分层堆叠，堆肥约 3-4 个月后，成为有机肥。

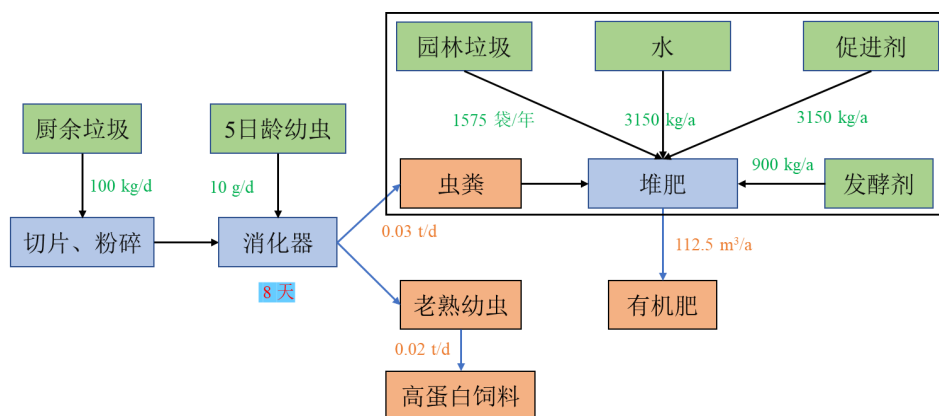


图 5.2.16 微小食腐动物处理 B 项目黑水虻生物处理厨余垃圾流程

(2) 指标计算

表 5.2.9 即为微小食腐动物处理 B 项目黑水虻生物处理技术的评价指标计算结果。该小区由万科自然基金会支持建设，并不依靠商业化运营，产生的有机肥

也免费回归到小区住户或花草盆栽之中，项目可节约垃圾处理费和运输成本属额外的收益。

表 5.2.9 微小食腐动物处理 B 项目黑水虻生物处理多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.0000
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.0031
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.0000
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	200.0000
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	100.00
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq/t	0.1076
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0000
		R ₈ .余热利用率	%	0.0000
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	6.7212
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	0.2077
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	-0.0387
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	-8.5737
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	-0.0022
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	-0.2167
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	0.0000
		E _{c2} .净现值比率	--	-20.0000
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	200.0000
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	1166.6667
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0500
		S ₂ .循环经济示范性	分	1.0000
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0000
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.8750

(三) 终端处置技术

我国生活垃圾处理方式主要是焚烧和填埋。2019 年，全国生活垃圾清运量为 24206.2 万吨，其中焚烧量为 12174.2 万吨，填埋量为 10948.0 万吨。目前厨余垃圾组分的主要流向仍然是填埋场和焚烧厂，因此在本报告中也对厨余垃圾焚烧、填埋处置做了对比研究。

1. 填埋处置 A

(1) 案例介绍

本研究以填埋处置 A 项目为例，计算填埋处理技术的多维绩效。

(2) 指标计算

表 5.3.1 即为填埋处置 A 项目多维绩效评价指标计算结果。同其他厨余厨余垃圾处理项目不同，此处计算“土地占用”指标时候，采用每日处理的垃圾量除以填埋场总的占地面积。采用这种计算方法的原因主要同其他厨余垃圾处理项目的“日处理能力”和“占地面积”等功能性指标保持一致。

表 5.3.2 填埋处置 A 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.000
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	0.000
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	0.000
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	872.0
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	100.0
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	0.000
		R ₇ .水循环利用率	%	0.0
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	0.1
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	0.007
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.007
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	0.012
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	0.004
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	0.064
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	5.0
		E _{c2} .净现值比率	--	-4042.8
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	42.0
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	80.0
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0005
		S ₂ .循环经济示范性	分	0.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	2.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.625

2. 焚烧处理 A

(1) 案例介绍

焚烧处理是当前应用最广泛的生活垃圾处理方式之一，被认为是能源化和减量化的最佳方式之一，能够显著、快速的减小填埋的体积，且往往具备一定的经济效益。一般而言，生活垃圾焚烧工艺分为垃圾储存和上料系统、供气系统、焚

烧系统、蒸汽发电系统、除渣系统、除灰系统、废水处理系统和烟气净化系统。被收运而来的生活垃圾中往往含有较多的水分，需要在垃圾池中发酵数日以提升热值，产生的渗滤液由污水处理设施统一处理，部分焚烧厂的渗滤液可回喷再利用。

本研究以焚烧处理 A 项目为例探讨、评价生活垃圾焚烧发电的多维绩效。该焚烧厂是当地市政府与光大国际以 PPP 模式合作的典型案例，具有很强的示范效应，截至 2016 年底，已累计处理生活垃圾约 230 万吨，发电 6.8 亿度。

(2) 指标计算

表 5.3.2 即为焚烧处理 A 项目的多维绩效指标计算结果。其中，能源消耗为负，即为该项目为能源输出型，产生的电能不再折算为天然气计算战略资源回收的稀缺性贡献。

表 5.3.2 焚烧处理 A 项目多维绩效评价指标

维度	影响类别	影响指标	单位	计算值
资源影响 (R)	资源消耗	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	t/t	0.000
		R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	tce/t	-0.050
		R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	m ³ /t	1.525
		R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	m ² /(t/d)	43.5
	综合利用	R ₅ .厨余垃圾资源化率	%	100.0
		R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	kg Cu eq./t	31.910
		R ₇ .水循环利用率	%	0.1
		R ₈ .余热利用率	%	0.0
环境影响 (E _n)	全生命周期环境影响(E _n)	E _{n1} .气候变化	kg CO ₂ eq/t	0.8
		E _{n2} .酸化	kg SO ₂ eq/t	0.920
		E _{n3} .富营养化	kg NMVOC eq/t	0.298
		E _{n4} .光化学污染	kg 1,4-DB eq/t	0.134
		E _{n5} .生态毒性	kg P eq/t	0.017
		E _{n6} .人体毒性	kg 1,4-DB eq/t	1.403
经济影响 (E _c)	经济可持续性	E _{c1} .销售净利润率	%	39.9
		E _{c2} .净现值比率	--	81217.0
		E _{c3} .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	万元/(t/d)	49.9
		E _{c4} .处理单位厨余垃圾的运行成本	元/吨	165.3
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	个/万元	0.0007
		S ₂ .循环经济示范性	分	0.0
		S ₃ .公众对技术实施的态度	分	3.0
	职工安全与福利	S ₄ .职业暴露风险	分	0.500

（四）厨余垃圾处理技术多维绩效评价

本报告从资源、环境、经济和社会四个维度共 22 个指标对厨余垃圾处理技术综合评价。所有项目的评价指标都需要无量纲化（见 3.5.1）和加以权重（见 3.5.2）后再做比较。本文采取各指标均一权重计算，各指标得值得分在 0-1 之间。各维度满分赋予 25 分，总分 100 分。本文共梳理厨余垃圾处理技术类型包括：焚烧、填埋、厌氧消化（干式和湿式）、好氧生化处理（大型、中型和社区）、微小食腐动物处理（黑水虻）、阳光房和机械预处理七类，所有技术类型按照集中、分散式两大类评估。

1. 各技术类型横向对比

1.1 指标计算结果

表 5.5.1 即为各技术类型的指标计算结果，其中，焚烧和填埋的资源、经济和社会影响按照混合垃圾的条件计算而得。集中和分散是对技术进行分类的前置条件。

（1）资源消耗指标

好氧生化处理厨余垃圾的技术路线需要更多的辅料投入和能量投入。其中社区堆肥主要是因为绿化垃圾等辅料添加，以调节物料的水分，例如西安社区堆肥案例中就需要添加破碎的园林绿化垃圾作为调节水分的蓬松物料。综合能耗方面，因为生活垃圾具备一定热值，焚烧方式的综合能耗为负值，表示其能量输出大于能量消耗。生物处理机在厨余垃圾的烘干阶段需要较高的能耗，以加速物料含水率达到理想堆肥物料的过程。其他处理方式中，大型微小食腐动物处理也表现出了较高的能源消耗，这主要是维持黑水虻的饲养、繁育的温度等需要消耗较多能源，而此类技术没有相应的自补性能源的产出。在水资源的消耗方面，焚烧不具备水资源回用的环节，表现出最高的消耗，大型好氧、机械预处理和大型微小食腐动物处理等项目也表现不佳。在每日处理厨余垃圾的吨均土地占用上，除填埋外，分散式相对于集中式的表现都较低，主要原因是集中处理的规模效应较好。社区堆肥技术的土地占用相对较高，这是因为社区堆肥受堆体高度、堆肥仓容积等条件的限制，其集约生产的能力有限。厨余垃圾的资源化率方面，除了焚烧和

填埋外，集中式厨余垃圾处理技术的表现都不太理想。这是因为集中设施接收的厨余垃圾来源复杂，在目前的分类投放正确率水平下难免有一定比例的杂质含量。而分散式特别是社区堆肥过程，厨余垃圾直接来自于居民家中，如果不对杂质进行有效的分类，将会直接影响厨余垃圾处理的效果，因此在一定程度上倒逼了厨余垃圾分类投放的效果。战略资源回收的稀缺性贡献主要是指天然气、磷、钾三类，其中，对于产出为土壤调理剂类产品的均认为原厨余垃圾中的 P 和 K 都得到了保存。水循环利用率上，厌氧消化尤其是湿式厌氧的生产工艺中存在污水回用而表现出较大的优势，但分散式如社区堆肥、微小食腐动物处理过程，废水的产出本身就不高，而且缺乏对污水的处理和中水回用等必要环节，因此难以构建技术内的污水回用闭环。在余热利用率方面，仅有南沙湿式厌氧案例有明确的余热再利用过程。

（2）环境影响指标

温室效应气体排放主要指 NO_2 和 CH_4 和能源生产自身的碳排，其基本趋势为：集中式处理设施的温室气体排放基本与其能源消耗成正比。分散式设施的温室气体排放表现为微小食腐动物处理<好氧生化处理<社区堆肥，这主要是由于社区堆肥往往无气体处理设施，且缺乏充足的氧气供应，导致代谢产生的温室气体直接排放。酸化效应主要指 NO_x 、 SO_2 和 NH_3 等气体的排放，直接排放的社区堆肥和阳光房表现最低，其次是焚烧和大型好氧生化处理。光化学污染和人体毒性方面，大型好氧生化处理表现最差，除能耗最高之外，还在于其生产工艺之中，需要投入盐酸、烧碱（用于恶臭气体处理）等物料投入；辅料投入较少的技术类型，如阳光房、社区堆肥等均表现为较低水平也可作为相互印证。淡水富营养化主要指的是磷的排放，表现较差的为焚烧；生态毒性（陆地、淡水和海洋生态毒性的加和）指对各生态系统的影响，主要是各重金属和人为合成有机物，焚烧的表现较差。

（3）经济影响指标

焚烧产电和大型微小食腐动物处理产出的高蛋白饲料表现出较高的经济效益，分散式则普遍没有产品销售行为，净利润率为零；净现值主要取决于基础投资和后期净收益，由政府主导的集中式处理设施的净现值绝对值较大。填埋和大型好氧为负值，表现较差，意味着当地政府需要承担较高的财政负担。其中大型好氧处理技术主要是因为制造肥料的成本较高，而肥料的价值较低且销售渠道有

限。每日处理厨余垃圾吨均投资建设费用方面，集中式处理设施之间的差异较小。分散式处理设施表现出较大差异，但总体而言，除了小型微小食腐动物处理（西山庭院黑水虻）之外，分散式处理的吨均投资小于集中式；吨均运行成本方面，小型微小食腐动物处理和大型好氧生化处理的人力成本较高，受人力成本、电价、辅料投入等成本的影响较大。

（4）社会影响指标

分散式处理设施的吨均投资提供的就业岗位数明显高于集中式处理设施；公众态度和职工安全与福利方面，分散式处理设施也有较好表现；但在循环经济示范性方面，主要是集中式处理技术属于国家认可、推荐的循环经济或固废资源化技术。

表 5.5.1 厨余垃圾各类处理技术的多维绩效评价指标计算结果

维 度	影响指标	焚烧	填埋	集中式					分散式						单位
				干式厌氧	湿式厌氧		生化处 理	微小食腐 动物处理	生化处 理	生化 处理	微小食腐 动物处理	阳光房	机械预 处理	社区 堆肥	
					中温	中温									
资源影响（R）	R ₁ .处理单位厨余垃圾的原辅料消耗量	0.000	0.000	0.198	0.066	0.323	0.326	0.070	0.237	0.200	0.000	0.056	0.000	1.000	t/t
	R ₂ .处理单位厨余垃圾的综合能耗	0.000	-0.050	0.019	0.012	0.004	0.075	0.010	0.024	0.006	0.003	0.000	0.007	0.058	tce/t
	R ₃ .处理单位厨余垃圾的新鲜水消耗量	0.000	1.525	0.198	0.065	0.298	0.586	0.440	0.154	0.200	0.000	0.000	0.500	0.150	m³/t
	R ₄ .处理厨余垃圾的吨均土地占用	872.0	43.5	75.3	39.4	66.3	63.4	106.8	104.6	44.0	200.0	3650.0	100.0	80.0	m²/(t/d)
	R ₅ .厨余垃圾资源化率	100.0	100.0	0.8	0.6	1.0	0.6	0.6	0.3	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	%
	R ₆ .战略资源回收的稀缺性贡献	0.000	31.910	0.104	0.021	0.067	0.107	0.223	0.109	0.007	0.108	0.031	0.000	0.108	kg Cu eq./t
	R ₇ .水循环利用率	0.0	0.1	40.3	84.2	77.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	%
	R ₈ .余热利用率	0.0	0.0	0.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	%
环境影响（En）	En ₁ .气候变化	0.1	0.8	112.8	54.0	27.9	404.9	41.7	120.3	29.7	6.7	50.0	37.1	184.3	kg CO ₂ eq/t
	En ₂ .酸化	0.007	0.920	0.437	0.096	1.546	0.724	0.031	0.172	0.068	0.208	1.245	0.522	4.228	kg SO ₂ eq/t
	En ₃ .光化学污染	0.007	0.298	0.304	0.057	0.275	0.647	0.029	0.146	0.032	-0.039	0.046	0.028	0.038	kg NMVOC eq/t
	En ₄ .人体毒性	0.012	0.134	7.274	-2.881	-9.939	15.754	-7.453	-0.343	-2.101	-8.574	-11.200	0.281	-6.672	kg 1,4-DB eq/t
	En ₅ .富营养化	0.004	0.017	0.011	0.001	0.010	0.016	0.000	0.002	0.000	-0.002	0.004	0.002	-0.001	kg P eq/t
	En ₆ .生态毒性	0.064	1.403	0.449	-0.297	-0.319	0.829	0.033	0.170	-0.017	-0.217	0.473	0.294	-0.140	kg 1,4-DB eq/t
经济影响（Ec）	Ec ₁ .销售净利润率	5.0	39.9	30.9	21.2	25.7	22.1	51.3	31.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	%
	Ec ₂ .净现值	-4042.8	81217.0	31349.7	29899.6	7419.1	-8823.9	-76.4	-1762.3	-80.0	-20.0	-201.4	-40.0	-6.0	--
	Ec ₃ .厨余垃圾处理的吨均投资建设费用	42.0	49.9	64.1	68.8	50.9	77.6	68.0	51.4	16.0	200.0	1216.7	20.3	12.0	万元/(t/d)
	Ec ₄ .处理单位厨余垃圾的运行成本	80.0	165.3	170.1	277.4	111.4	615.8	170.5	94.6	191.8	1166.7	666.7	62.5	547.9	元/吨
社会影响（S）	S ₁ .单位投资提供的就业岗位	0.0005	0.0007	0.0023	0.0015	0.0051	0.0015	0.0041	0.0070	0.0625	0.0500	0.0050	0.0750	0.5000	个/万元
	S ₂ .循环经济示范性	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	分
	S ₃ .公众对技术实施的态度	2.0	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0	3.0	分
	S ₄ .职业暴露风险	0.625	0.500	0.625	0.625	0.625	0.750	0.875	0.750	0.875	0.875	0.875	0.875	0.875	分

1.2 无量纲化得分

图 5.5.1 为厨余垃圾资源化处理的各主要技术类型各维度和综合得分，焚烧和填埋未计入在内。总体而言，大型湿式厌氧和大型微小食腐动物处理的总得分最高，其评分分别为 72.85 和 67.39 分；大型好氧生化处理总得分最低，主要是其环境影响的综合表现较低。小型微小食腐动物处理的经济表现较低，主要因为其基本没有直接经济收益厨余垃圾的集中和分散式资源化利用相对于焚烧和填埋都表现出总体优势。这表明，厨余垃圾的资源化利用相比传统的填埋、焚烧处置的综合效益更高，尽管在部分指标（如经济指标）的表现不如末端处置技术，但是总体而言对厨余垃圾进行分类和资源化利用还是具有较好的综合效益。

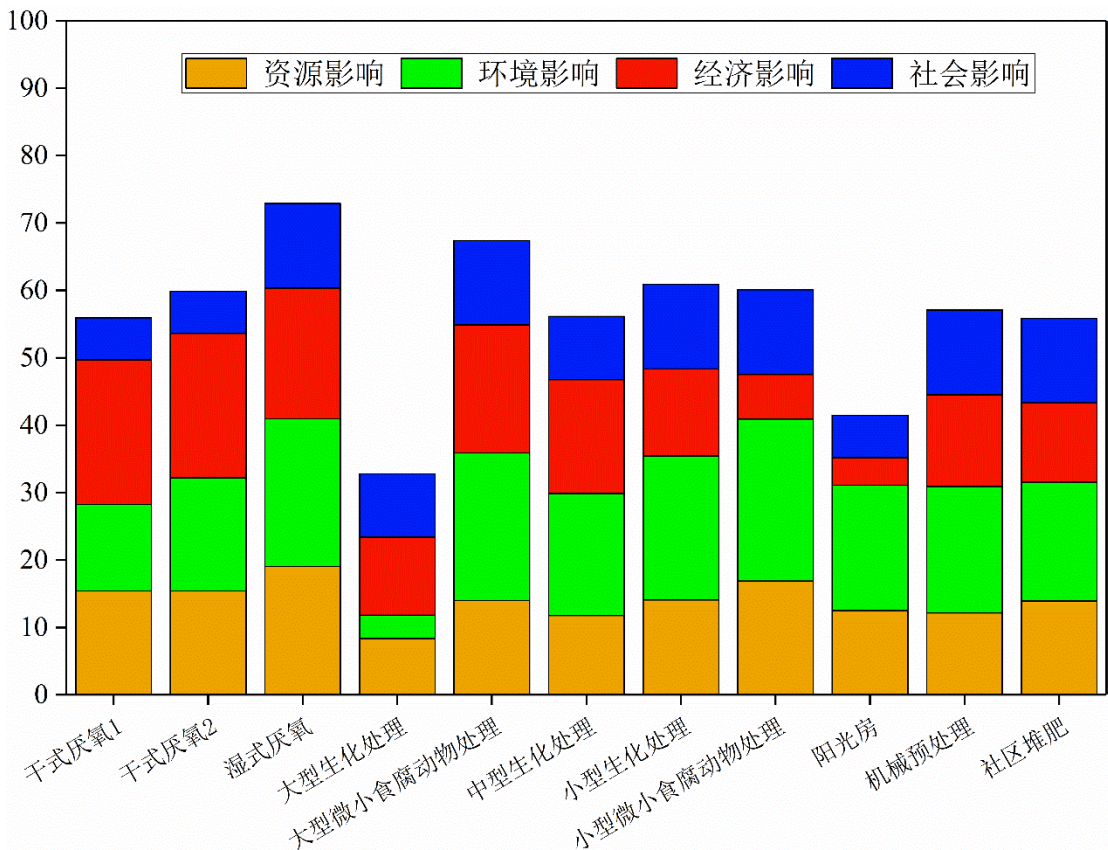


图 5.5.1 主要技术类型的各维度和综合得分

表 5.5.2 即为厨余垃圾各处理技术的无量纲化后各指标的得分（0.00-1.00），颜色越深表示得分越高（无量纲方法见第四章 4.1.1）。在资源影响方面，集中式处理的平均值高于分散式，主要原因在于（原）辅料的投入。环境影响方面，具备废水、废气处理设施的分散式处理方式表现最佳。但目前小型化的废气、废水

处理设备成本较高，还需进一步发展。经济性表现方面好氧堆肥产生的有机肥缺乏竞争力，市场难以打开，成为困扰厨余垃圾资源化处理的难题之一。社会影响方面，分散式处理最佳。这主要是因为社区堆肥使用较少的机械设备，职业风险较低，且社区堆肥在提供就业岗位方面具有明显的优势。

表 5.5.2 厨余垃圾处理的各技术类型赋值对比

维度	影响类别	影响指标	集中式					分散式					
			干式厌氧		湿式厌氧	大型好氧	微小食腐动物处理	中型好氧	小型好氧	机械预处理	微小食腐动物处理	静态堆肥	社区堆肥
资源影响 (R)	资源消耗	处理单位厨余垃圾（原）辅料消耗量	0.90	0.90	0.97	0.84	0.97	0.88	0.90	1.00	1.00	0.97	0.00
		处理单位厨余垃圾综合能耗	0.75	0.75	0.84	0.00	0.87	0.68	0.92	0.90	0.96	1.00	1.00
		处理单位厨余垃圾(新鲜)水消耗量	0.66	0.66	0.89	0.00	0.25	0.74	0.66	0.15	1.00	1.00	1.00
		每日处理单位厨余垃圾吨均土地占用	0.99	0.99	1.00	0.99	0.98	0.98	1.00	0.98	0.96	0.00	0.98
	综合利用	厨余垃圾资源化率	0.76	0.76	0.46	0.35	0.41	0.00	1.00	0.86	1.00	0.88	1.00
		战略资源回收的稀缺性贡献	0.08	0.47	0.09	0.48	1.00	0.49	0.03	0.00	0.48	0.14	0.48
		水循环利用率	0.40	0.40	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		余热利用率	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
环境影响 (En)	气候变化	温室效应气体排放	0.73	0.74	0.88	0.00	0.91	0.71	0.94	0.92	1.00	0.89	0.61
	酸化	酸化影响因子排放	0.90	0.94	0.98	0.83	1.00	0.97	0.99	0.88	0.96	0.71	0.01
	光化学污染	光化学污染物排放	0.50	0.59	0.86	0.00	0.90	0.73	0.90	0.90	1.00	0.88	0.93
	人体毒性	人体健康危害物排放	0.31	0.63	0.69	0.00	0.86	0.60	0.66	0.57	0.90	1.00	0.85
	富营养化	淡水富营养化	0.29	0.43	0.85	0.00	0.88	0.76	0.89	0.75	1.00	0.68	0.96
	生态毒性	陆地+淡水+海洋生态毒性	0.33	0.69	0.98	0.00	0.69	0.57	0.74	0.47	0.91	0.31	0.85
经济影响 (Ec)	经济可持续性	销售净利润率	0.60	0.60	0.41	0.43	1.00	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		净现值	1.00	1.00	0.96	0.00	0.22	0.18	0.22	0.22	0.22	0.21	0.22
		处理厨余垃圾每日吨均投资建设费用	0.95	0.95	0.95	0.94	0.95	0.96	0.99	0.99	0.84	0.00	1.00
		处理单位固废运行成本	0.88	0.88	0.78	0.49	0.88	0.95	0.86	0.97	0.00	0.44	0.67
社会影响 (S)	当地社区与社会影响	单位投资提供的就业岗位	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	1.00
		循环经济示范性	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00
		公众态度	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
	职工安全福利	职业暴露风险	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

2. 资源化技术类型内对比

(1) 厌氧消化

图 5.5.2 为集中大型厌氧消化的各案例指标得分和总体得分，总分为 61.56 程中未考虑焚烧和填埋)。厌氧消化的共同特征表现为：能耗高、污水产生量大和经营利润较低。单独处理居民端厨余垃圾的案例较少，较多的工艺仍然是同时处理居民段和餐饮行业的有机垃圾，且后者表现更佳。此外，沼渣的处理处置也一直是困扰行业的难题，堆肥处理是一条技术可行的路线，但有机肥的销售和使用目前仍然行业共同的难题。

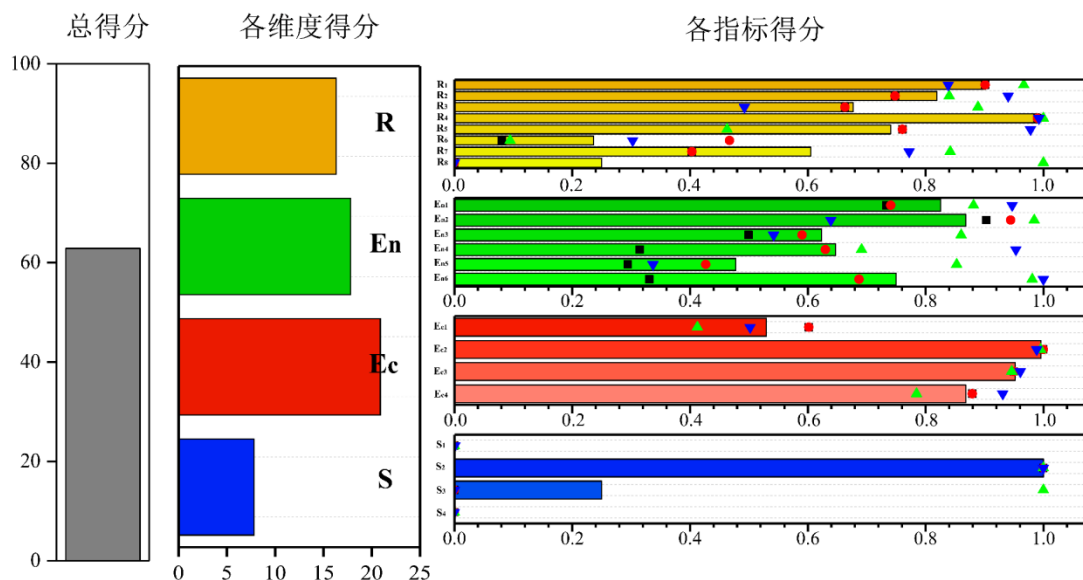


图 5.5.2 厨余垃圾集中大型厌氧消化的各案例指标得分和综合得分

(2) 好氧生化处理

图 5.5.3 即为不同规模好氧生化处理的各指标得分和综合得分，总分为 49.94 化处理的共同特征在于：能耗高、经营利润低，且快速堆肥生产出的有机肥难以衡量其肥力，市场表现普遍较差。其次，不同案例之间的差异较大，表明地理因素对好氧生化处理的影响较大。

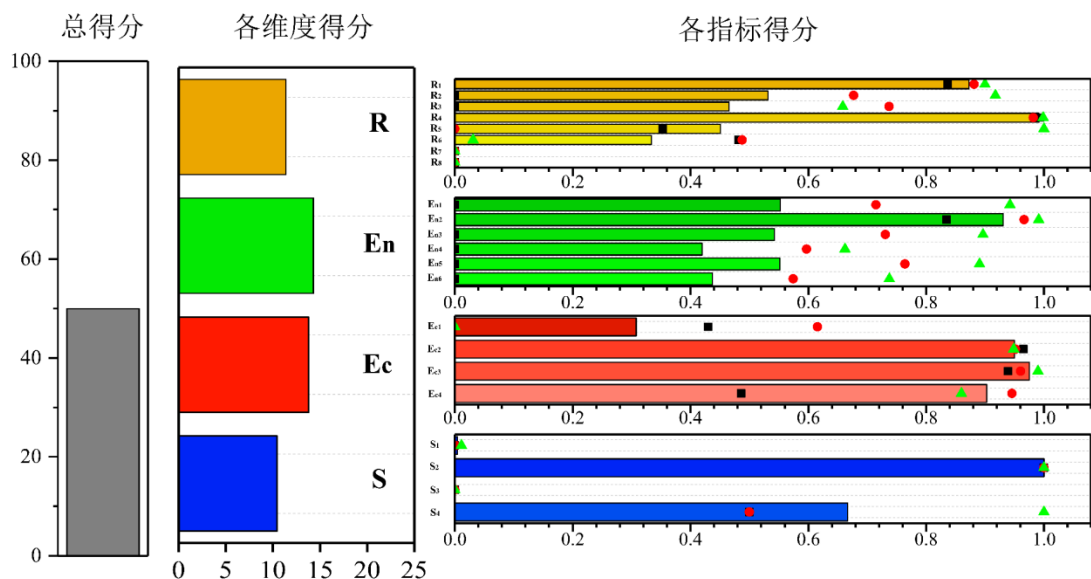


图 5.5.3 厨余垃圾好氧生化处理的各案例指标得分和综合得分

(3) 微小食腐动物处理

图 5.5.4 为厨余垃圾微小食腐动物处理处理的各案例各指标得分和综合得分，总分为 63.74 的主要问题在于：较大的吨均土地占用和较低的经济效益。前者主要是因为资源型生物往往需要较多的场地生长繁衍，同时需要配备专门的设备保证生物的生活条件。较低的经济效益主要是由于其主要产出的高蛋白产品还未能形成规模，特别是在较小规模的项目中。

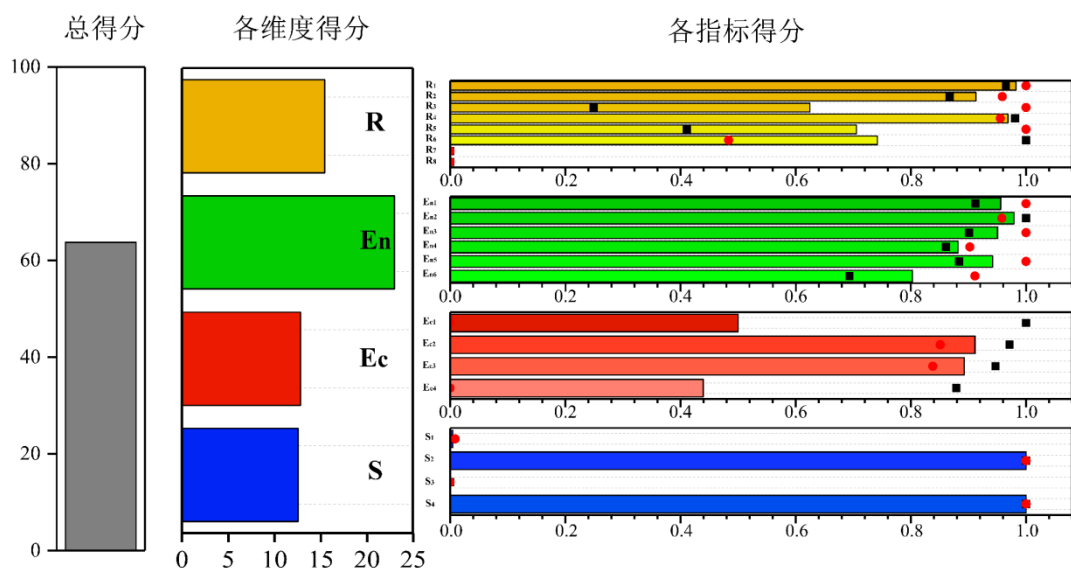


图 5.5.4 厨余垃圾微小食腐动物处理处理的各案例指标得分和综合得分

(4) 静态堆肥

图 5.5.5 为静态堆肥（阳光房）的各指标计算结果和综合得分，总分为 41.45。静态堆肥是最为传统的好氧堆肥方式，本文中的静态堆肥案例配备了相应的废水、废气收集处理装置，故而相对于社区堆肥在环境影响上具备一定优势。但静态堆肥需要较大的土地占用，很难在城市社区中开展，较为适合乡镇地区。

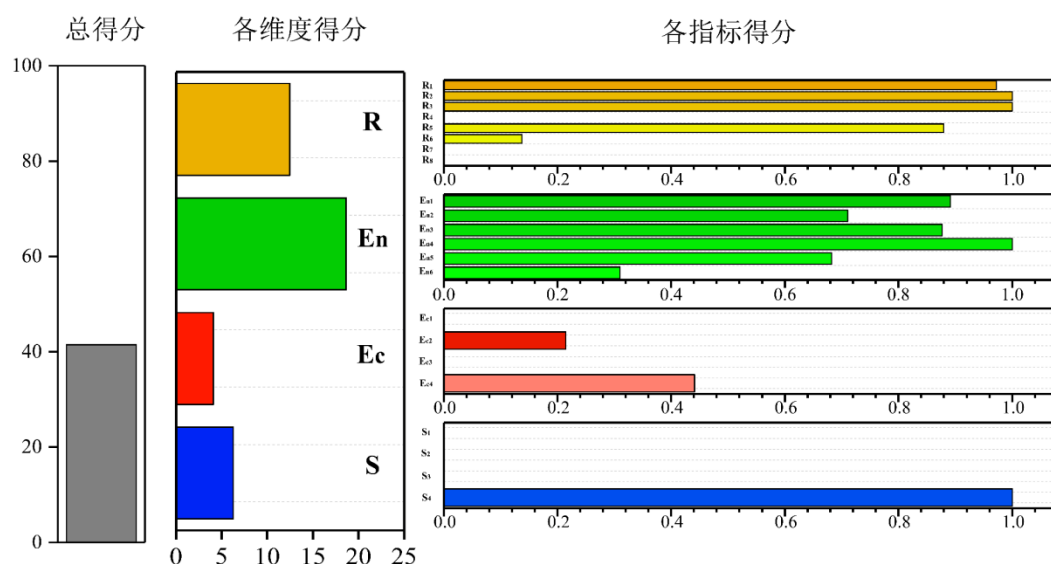


图 5.5.5 厨余垃圾静态堆肥案例的指标得分和综合得分

(5) 社区堆肥

图 5.5.6 为厨余垃圾社区堆肥案例的指标得分和综合得分，平均总得分为 51.36。社区堆肥的评价是基于当前万科公益基金会支持下正在开展的社区堆肥实践。由于大多位于城市社区之中，也欠缺资金支持，往往难以配备废气收集、处理设施（废水可以通过人工湿地处理）。因而，社区堆肥在环境维度，特别是酸化效应的表现上最差，但因为其基本没有能量和其他物料投入，总体上环境得分较好。

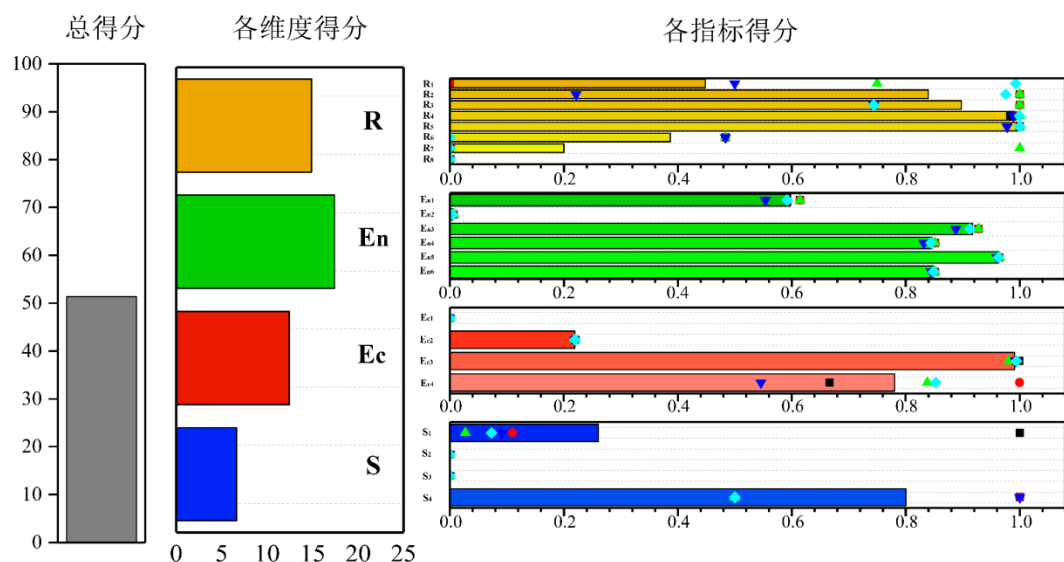


图 5.5.6 厨余垃圾社区堆肥案例的指标得分和综合得分

(6) 机械预处理

图 5.5.7 为厨余垃圾机械预处理案例的指标得分和综合得分，为 57.09 分。厨余垃圾中含有大量水分，给收集、清运、焚烧和填埋都带来了巨大的麻烦。机械预处理的作用既是在厨余垃圾产生的前端——垃圾中转站内将厨余垃圾中的水分尽可能滤干，减少清运、处理的费用。相对而言，其投资较少、运行费用较低，但其不能视为完整的厨余垃圾处理处置措施。

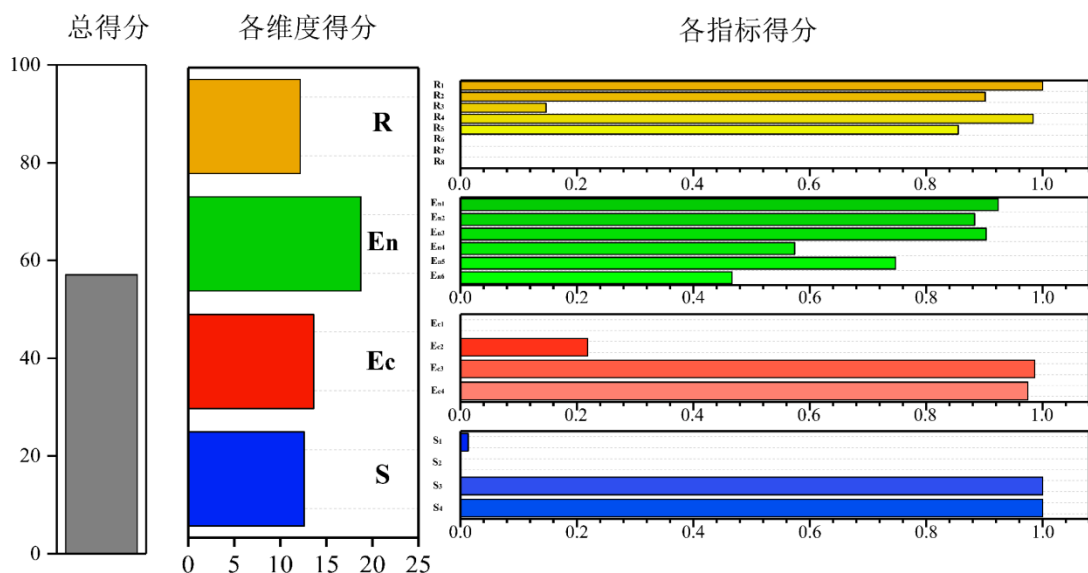


图 5.5.7 厨余垃圾机械预处理案例的指标得分和综合得分

第五章 总结与展望

（一）研究总结

厨余垃圾的产生源分布广泛，产生量大，且含水率、有机质含量高的特点，是我国垃圾分类收集及分类资源化利用的重要内容和关键瓶颈，成为垃圾治理行业的焦点议题。2017 年我国实施垃圾强制分类战略、实质性推动垃圾分类工作以来，厨余垃圾处理基础设施短板存在不足，其基础设施建设成为近年来行业投资的热点。由于我国的厨余垃圾产量、特性同国外有较大差异，从其他国家吸收引进的技术应用起来往往存在“水土不服”的问题。此外，由于厨余垃圾处理行业受到越来越多的关注，不同原理、不同成熟度、不同来源的技术正在各地试用，但当前厨余垃圾处理行业亟待寻求可复制、可推广、可持续运行的解决方案。

本研究对我国已进行推广应用的厨余垃圾资源化技术进行资料收集、实地测评与调研等方面的工作，获得了厨余垃圾领域宝贵的一手数据。此外，本研究在传统的技术经济评价的基础上，构建了全生命周期框架下的、适用于厨余垃圾的资源、环境、经济、社会四维绩效评价方法。本研究按照集中式、分散式、终端处置和其他技术四大类，技术原理包括厌氧消化、好氧处理、微小食腐动物处理、热处理、无害化处置等类型。本研究筛选了 16 个案例开展案例研究，不仅覆盖了目前正在应用的主要技术类型，而且覆盖我国东、中、西部多个城市；既包括政府投资运行的项目，也包括社会组织乃至社区自发建设的项目。

本研究的主要结论包括以下方面：

（1）各类厨余垃圾资源化利用技术的综合绩效表现均优于填埋、焚烧等终端处置技术。尽管垃圾焚烧会获得净能量产出且经济效益较高，但是由于其在环境、社会影响等方面的不足，使其综合绩效仍然较低。因此，在未来的实践中建议坚定的实施厨余垃圾资源化技术路线。

（2）在集中式处理技术中，厌氧消化技术具有一定的优势，尤其体现在其资源、环境指标上；大型微小食腐动物处理项目也具有较高的发展潜力。但是，实际调研发现，由于技术成熟度的问题，以厨余垃圾单一原料的厌氧技术往往存在稳定性差的问题，成为制约技术应用的因素。而厨余垃圾大型微小食腐动物处理项目，目前长期运行的可比案例较少，需要进一步实践的检验。

(3) 在分散式处理技术中, 中小型生物处理机技术和社区堆肥的综合绩效较为接近, 从已有案例看生化处理技术略优。社区堆肥案例的资源、环境、经济影响指标得分较低, 这是因为其较大的土地资源占用、不可控的温室气体排放以及较高的单位投资运行费用。社区堆肥应重复挖掘闲置土地, 并充分发动社区居民自发参与, 通过营造社区文化, 降低人工费用的均摊。此外, 建议研究制定社区堆肥的操作标准, 以提高资源化产品的质量、降低操作过程中的温室气体排放。

(4) 无论是集中式还是分散式处理技术, 其可行性研究报告、环境影响评价报告 and 实际运行参数间可能存在较大的差异。这可能是因为在可研编制阶段, 可供参考的厨余垃圾处理项目实际案例较少, 大多依靠理论计算或者国外项目测算, 导致数据差异, 未来应鼓励长时间序列的监测研究, 以补充数据的不足。

(5) 在厌氧、好氧、微小食腐动物处理、社区堆肥等同类技术比较发现, 尽管技术原理非常接近, 但不同案例间的数据波动非常大。这说明不同案例的实际运行和管理水平对综合绩效的影响较大, 尤其对于厌氧、好氧等相对成熟的厨余垃圾处理技术, 其资源化产品去向、厂区自动化作业水平等因素会大幅影响评价结果, 因此应加强同类技术之间的交流学习, 补齐短板、形成更高效的运行模式。

(6) 本研究的不足: 本研究试图提供一个基于量化的、人为因素干扰较小的厨余垃圾资源化技术绩效评价方法, 以期更客观、真实的展现直接评价结果。但是, 采用本研究构建的方法体系容易忽视一些难以量化的社会绩效, 最为突出的就是社区堆肥。在我们实地考察的国内外社区堆肥案例中, 社区居民的参与毫无疑问会营造一个非常有活力的社区文化氛围。这种社区文化因社区、因居民而异, 难以定量评价, 但是在社区堆肥的实践中往往非常重要。尽管在本研究中没有涉及, 但是在未来的项目推广中, 也同样应对其有足够的重视。此外, 本研究没有考虑厨余垃圾分类投放、收集、运输、处理、处置、资源化产品使用等全生命周期过程的综合绩效; 由于实测数据的局限, 对于多类型厨余垃圾的理化特性参数也缺乏差异化的讨论, 在未来的研究中值得结合具体案例的物料和管理流程特点进行更为深入的研究, 以体现厨余垃圾全生命周期管理过程的全面性绩效表现。

（二）展望

（1）“十四五”期间，厨余垃圾资源化处理行业将更加蓬勃发展

2020年11月27日，住建部等国家部门再次联合发文《关于进一步推进生活垃圾分类工作的若干意见（建城〔2020〕93号）》，明确提出：“补齐厨余垃圾处理设施短板”、“鼓励各地因地制宜选用厨余垃圾处理工艺”、“着力解决好堆肥、沼液、沼渣等产品应用的‘梗阻’问题”。在《中国落实2030年可持续发展议程国别方案》中，中国也着重强调将“大幅度减少生产和供应环节的粮食损失”、“全面提升城市生活垃圾管理水平，全面推进农村生活垃圾治理，不断提高治理质量”。在国家重大研发计划中，固废资源化重大专项也着重强调“全量消纳、高效除杂、固液组分精细化利用”。因此，未来五年应该是厨余垃圾处理行业继续蓬勃发展的时期，也必将有更多的技术投入应用。

（2）集中式和分散式技术各有优劣，应考虑到不同技术之间的协同互补

总体而言，在人口密集、用地成本高昂的城市，集中式的处理方式更为合适；在人口较为密集、用地成本相对较低的县区，可优先考虑生化处理、微小食腐动物处理等方案；在用地成本低的乡镇，成本低廉的阳光房、微小食腐动物处理等方案更佳。但具体到实际应用，不同技术之间没有绝对的高低之分，需要结合案例的边界条件进行综合分析和选择。处理技术的选择应当充分考虑到当地实际情况，包括居民的社区文化等难以衡量的方面。此外，应当注意到，不同技术类型之间存在协作与互补的可能性。如厌氧消化产生的沼渣可经过好氧堆肥制成有机肥、微小食腐动物处理产生的虫粪可与园林绿化垃圾混合堆肥。

（3）鼓励厨余餐饮垃圾、园林垃圾、污泥等多源物料的协同处理

厨余、餐厨、园林垃圾、污泥都具有有机含量高的特征，但在含水率、碳氮比上面有明显差别。由于行业的壁垒，目前各类技术拥有方仍处于单兵作战的境地，各类易腐垃圾的处理设施也未实现协同。而堆肥过程中，含水率和碳氮比将直接影响堆肥过程和效果；厌氧消化过程中的含固率、回流比等也是至关重要的影响因素。将三者协同处理可精细化调节被处理垃圾的特征以满足最佳的处理状态。但这需要不同行业、部门之间的协同配合，需要通过行业生态链的整合，进一步打破协同处理的障碍。

（4）全链条、多维度、全生命周期的综合绩效测评

本研究构建了一套综合绩效评价框架,但是仍然存在案例和数据的不足。未来建议开展更多的持续监测研究,对新兴技术进行测试和评价,补充和完善厨余垃圾资源化利用数据库。对于评价指标的设定,也可以根据国家 and 地方政策要求、数据可获得性等进行补充和完善,例如环境卫生、潜在的生物链风险等。对厨余垃圾处理技术的选择,需要从厨余垃圾收集、运输、处理和资源化产出的全链条出发,基于资源、环境、经济和社会多重维度考量,结合各原辅料、资源化产品的全生命周期的影响,结合当地实际情况进行比选。在指标体系权重的设计上,也应鼓励更多创新性的探索,例如在厨余垃圾处理技术的基础数据量达到一定规模时,可以采用熵权法、蒙特卡洛法获得更为客观的权重赋值;也可以根据城市、企业、机构以及评价任务的需求,开展基于不同利益主体赋权方法的探讨。在厨余垃圾评价主体上,未来可采用第三方专业机构评估和自测评相结合的方式进行。此外,应将厨余垃圾技术评价方法和数据同实际应用更紧密的结合,采用评价结果动态的优化改进生产工艺,并创新技术测评的数据收集方法。如应用收运端物料参数的智能采集、物料输入时理化性质的实时监测和调节等手段,实现运行系统和评价系统的动态交互,将可能成为厨余垃圾处理设施运行管理优化的方向。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[J], 2009.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[J], 2020.
- [3] De Clercq Djavan, Wen Zongguo, Fan Fei. Performance evaluation of restaurant food waste and biowaste to biogas pilot projects in China and implications for national policy[J]. Journal of environmental management, 2017, 189: 115-124.
- [4] Qin Xue, Li Ning, Li Gui-Xia, et al. Status and development of resource processing technologies of food waste[J]. Coal and Chemical Industry, 2015(7): 11.
- [5] Wang Hanxi, Xu Jianling, Yu Haixia, et al. Study of the application and methods for the comprehensive treatment of municipal solid waste in northeastern China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 1881-1889.
- [6] 何华. 我国餐厨垃圾处理问题与出路研究[J]. 资源节约与环保, 2019(9): 100.
- [7] 胡新军, 张敏, 余俊锋, 等. 中国餐厨垃圾处理的现状, 问题和对策[J]. 生态学报, 2012, 7.
- [8] 王小铭, 陈江亮, 谷萌, 等. “无废城市”建设背景下我国餐厨垃圾管理现状, 问题与建议[J]. 环境卫生工程, 2020, 27(6): 1-10.
- [9] Li Yangyang, Jin Yiyang, Li Jinhui, et al. Current situation and development of kitchen waste treatment in China[J]. Procedia environmental sciences, 2016, 31: 40-49.
- [10] Wang Hanxi, Xu Jianling, Sheng Lianxi. Study on the comprehensive utilization of city kitchen waste as a resource in China[J]. Energy, 2019, 173: 263-277.
- [11] Kiran Esra Uçkun, Trzcinski Antoine P, Ng Wun Jern, et al. Bioconversion of food waste to energy: a review[J]. Fuel, 2014, 134: 389-399.
- [12] 邓兵. 基于干湿分离预处理的厨余垃圾处理模式研究[D]. 华中科技大学, 2013.
- [13] 李秀芬, 赵阳, 堵国成, 等. 微量金属元素及其配合物对厨余垃圾甲烷发酵的影响[D]. 2009.
- [14] 徐栋, 沈东升, 冯华军. 厨余垃圾的特性及处理技术研究进展[D]. 2011.
- [15] 薛莲. 北京市餐厨垃圾回收利用政策执行问题及对策研究[D]. 北京理工大学, 2015.
- [16] Zhou Ying, Engler Nils, Nelles Michael. Symbiotic relationship between hydrothermal carbonization technology and anaerobic digestion for food waste in China[J]. Bioresource technology, 2018, 260: 404-412.
- [17] 洪霄伟, 林清娴, 张向军. 绿色住区厨余垃圾处理思路[J]. 建设科技, 2017(18): 76-77.
- [18] 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.
- [19] 朱明龙. 户用沼气技术在处理城市居民生活垃圾中的作用及技术探析[J]. 农业工程技术 (新能源产业), 2012(9): 20.

- [20] 屠翰, 华永新, 徐钢, 等. 杭州市农村生活垃圾治理实践及问题对策研究[J]. 农业资源与环境学报, 2018(3): 9.
- [21] 沈超青, 马晓茜. 广州市餐厨垃圾不同处置方式的经济与环境效益比较[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(11): 103-106.
- [22] 程亚莉, 毕桂灿, 沃德芳, 等. 国内外餐厨垃圾现状及其处理措施[J]. 新能源进展, 2017, 5(4): 266-271.
- [23] 毕珠洁, 邵俊, 许碧君. 中国餐厨垃圾管理现状研究[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 765-768.
- [24] 张盖伦. 粉碎直排能否成厨余垃圾出口?[J]. 环境经济, 2015, 1: 34.
- [25] 郑曼英. 广州市餐厨垃圾管理对策研究[D]. 2004.
- [26] 万科周刊. 这个小区的垃圾分类, 为何引起众多媒体关注? [EB/OL].
<http://www.vankeweekly.com/?p=87430>.
- [27] 小会汪, 文义关. 城市生活垃圾分类处理模式探究[J]. 生态环境与保护, 2019, 2(10).
- [28] 张进锋. 厨余垃圾处理技术适应性分析及能源化研究[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(3): 12-16.
- [29] 卫潘明. 北京地区厨余垃圾处理机全成本分析[J]. 城市管理与科技, 2017, 19(6): 52-55.
- [30] 邵蕾, 周传斌, 曹爱新, 等. 家庭厨余垃圾处理技术研究进展[J]. 2011 中国可持续发展论坛, 2011 年专刊 (一), 2011.
- [31] 刘荣杰, 邓舟, 梁卫坤. 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.
- [32] 马磊, 王德汉, 曾彩明. 餐厨垃圾的干式厌氧消化处理技术初探[J]. 中国沼气, 2007, 25(1): 27-30.
- [33] 吴满昌, 孙可伟, 李如燕. 有机生活垃圾高温干式厌氧处理技术探讨[D]. 2005.
- [34] 金赵明. 浅析湿式厌氧与干式厌氧消化技术及相关案例[J]. 环境保护与循环经济, 2018(2018 年 05): 29-31.
- [35] 李平, 朱志伟, 杨学伦, 等. 果蔬垃圾干式厌氧与湿式厌氧消化预处理技术分析[J]. 节能, 2019(10): 42.
- [36] 方少辉. 农村混合物料干式厌氧消化生物质能源转化的特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
- [37] 黄燕冰. 餐厨垃圾高温干式厌氧消化工艺研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2015.
- [38] 沈炳国, 黄安娜, 王能杰, 等. 宁波大型餐厨垃圾厌氧消化装置简介[D]. 2011.
- [39] 张锐. 餐厨垃圾转化为生物质能的“宁波模式”与效益评价[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
- [40] 伍华琛. 城市餐厨垃圾资源化技术应用现状与展望[J]. 再生资源与循环经济, 2015, 8(4): 24-27.

- [41] 侨银环保. 广东省广州市李坑综合处理厂项目[EB/OL].
https://www.gzqiaoyin.com/product/info_20.aspx?itemid=116&lcid=21.
- [42] 北极星固废网. 中国餐厨垃圾处理发展史[EB/OL].
<http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200309/1051774.shtml>.
- [43] Chua Hs, Bashir Mjk, Tan Kt, et al. A sustainable pyrolysis technology for the treatment of municipal solid waste in Malaysia[C]. AIP Conference Proceedings, 2019: 020016.
- [44] 张尚毅, 刘国涛, 唐利兰, 等. 温度对城市有机垃圾热解焦油成分的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 827-832.
- [45] 朱锡锋. 生物质热解液化技术研究与发展趋势[J]. 新能源进展, 2013, 1(1): 32-37.
- [46] 刘海力. 厨余垃圾的燃烧与热解特性研究[M]. BEIJING BOOK CO. INC., 2015.
- [47] 路冉冉, 商辉, 李军. 生物质热解液化制备生物油技术研究进展[J]. 生物质化学工程, 2010, 44(3): 54-59.
- [48] Lee Ye-Eun, Jo Jun-Ho, Kim I-Tae, et al. Value-added performance and thermal decomposition characteristics of dumped food waste compost by pyrolysis[J]. Energies, 2018, 11(5): 1061.
- [49] Giwa Abdulmoseen Segun, Xu Heng, Chang Fengmin, et al. Pyrolysis coupled anaerobic digestion process for food waste and recalcitrant residues: Fundamentals, challenges, and considerations[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(6): 2250-2264.
- [50] 黄博. 餐厨垃圾分选有机废物热解特性及示范工程研究[D]. 北京化工大学, 2017.
- [51] Elkhailifa Samar, Al-Ansari Tareq, Mackey Hamish R, et al. Food waste to biochars through pyrolysis: A review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 144: 310-320.
- [52] Giroto Francesca, Alibardi Luca, Cossu Raffaello. Food waste generation and industrial uses: a review[J]. Waste management, 2015, 45: 32-41.
- [53] Manfredi Simone, Cristobal Jorge, De Matos Cristina Torres, et al. Improving Sustainability and Circularity of European Food Waste Management with a Life Cycle Approach[J]. Publications Office of the European Union, 2015.
- [54] 宋爽. 烘焙对典型厨余垃圾热解及气化特性的影响[D]. 华中科技大学, 2017.
- [55] Pham Thi Phuong Thuy, Kaushik Rajni, Parshetti Ganesh K, et al. Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions[J]. Waste management, 2015, 38: 399-408.
- [56] Arafat Hassan A, Jijakli Kenan, Ahsan Amimul. Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 105: 233-240.
- [57] 魏源送, 王敏健, 王菊思. 堆肥技术及进展[D]. 1999.
- [58] Waldron Kw, Nichols E: Composting of food-chain waste for agricultural and horticultural use, Handbook of waste management and co-product recovery in food processing: Elsevier, 2009: 583-627.

- [59] 余群, 董红敏, 张肇鲲. 国内外堆肥技术研究进展 (综述)[D]. 2003.
- [60] 马学良, 赵明杰, 郭景峰, 等. 养殖场条垛堆肥翻堆设备发展趋势分析[D]. 2010.
- [61] Kuhlman Lr. Windrow composting of agricultural and municipal wastes[J]. Resources, Conservation and Recycling, 1990, 4(1-2): 151-160.
- [62] 吴鸿强. 城市垃圾堆肥深度加工的处理工艺及设备[J]. 环境保护, 1998(3): 22-24.
- [63] Benedict Arthur H, Epstein Eliot, English John N. Municipal sludge composting technology evaluation[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1986: 279-289.
- [64] 陈世和. 城市生活垃圾堆肥化处理[J]. 环境污染与防治, 1985, 6(4): 29-34.
- [65] 南宫生活垃圾堆肥厂[EB/OL].
<https://baike.baidu.com/item/%E5%8D%97%E5%AE%AB%E7%94%9F%E6%B4%BB%E5%9E%83%E5%9C%BE%E5%A0%86%E8%82%A5%E5%8E%82>.
- [66] 北京环境卫生工程集团有限公司. 隧道式好氧堆肥发酵工艺余热利用改造装置: CN201520727U[P]. 2010-07-07.
- [67] 李春萍, 李国学, 李玉春, 等. 北京南宫静态堆肥隧道仓不同区间的垃圾堆肥腐熟度模糊评价[D]. 2007.
- [68] Al-Alawi Mutaz, Szegi Tamas, El Fels Loubna, et al. Green waste composting under GORE (R) cover membrane at industrial scale: physico-chemical properties and spectroscopic assessment[J]. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2019, 8(1): 385-397.
- [69] 郑挺颖, 崔悦. 在 20 多国建了特色堆肥厂 零臭味膜覆盖技术让垃圾变膏肥[J]. 环境与生活, 2018(8): 12.
- [70] 福州广播电视台. “吃进”垃圾“吐出”肥料 红庙岭阳光堆肥房变废为宝[EB/OL].
<http://m.fztvapp.zohi.tv/p/13939.html>.
- [71] 骆爽爽. 太阳能辅助好氧堆肥处理农村生活垃圾的技术研究[D]. 浙江大学, 2017.
- [72] 浙江新闻. 好氧堆肥助力垃圾分类 金华农村阳光堆肥房破解难题[EB/OL].
<https://zj.zjol.com.cn/news.html?id=1286165>.
- [73] 环卫科技网. 金华市农村生活垃圾分类和资源化利用经验[EB/OL]. https://www.cn-hw.net/html/32/201612/56443_2.html.
- [74] 广东世纪辉腾环保科技有限公司. 案例: 广东首台“环保装备-阳光堆肥房”成功落地[EB/OL]. <http://www.htepi.com/557/589/36>.
- [75] 临沧市临翔区人民政府. 章驮乡建成我市首座阳光垃圾堆肥房[EB/OL].
<http://www.ynlx.gov.cn/lxqrmzf/lxqrmzf/zwdt72/xzzh/329367/index.html>.
- [76] 一天处理 500 公斤易腐垃圾, 黄陂首个阳光堆肥房投用[EB/OL].
<http://www.cjrbapp.cjn.cn/p/30976.html>.
- [77] Platt Brenda, Goldstein Nora, Coker Craig, et al. State of Composting in the US[J]. Institute for Local Self-Reliance, 2014.

- [78] 知乎专栏:”堆肥花园“在社区[EB/OL]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/143387506>.
- [79] 知乎专栏:厨余堆肥案例之一 从幼儿园到社区[EB/OL].
<https://zhuanlan.zhihu.com/p/139598955>.
- [80] 张显辉, 张波, 衣晓红. 餐厨垃圾处理方式的探讨[D]. 2006.
- [81] Stelmachowski Marek, Jastrzębska Magdalena, Zarzycki Roman. In-vessel composting for utilizing of municipal sewage-sludge[J]. Applied energy, 2003, 75(3-4): 249-256.
- [82] 石磊, 赵由才, 李兵. 小型有机垃圾生物处理机的开发与应用进展[D]. 2004.
- [83] 毕珠洁, 邵俊, 欧阳创, 等. 小型生物处理机运行性能与成本研究[J]. 环境卫生工程, 2015, 23(3): 10-12.
- [84] 鲁贝贝. 家庭餐厨垃圾积聚和堆肥化处置方法研究[D]. 浙江大学, 2016.
- [85] 张庆芳, 杨林海, 周丹丹. 餐厨垃圾废弃物处理技术概述[D]. 2012.
- [86] 北京嘉博文生物科技有限公司. 有机废弃物生物处理机(BGB-SCZ-7500): CN302937621S[P]. 2014-09-10.
- [87] 陈展, 张以晖, 林逢春, 等. 上海市垃圾生物处理机现状调研[J]. 环境卫生工程, 2014, 22(1): 33-36.
- [88] 安新城. 黑水虻生物处置餐厨废弃物的技术可行性分析[J]. 环境与可持续发展, 2016(3): 92-94.
- [89] 张志剑, 刘萌, 朱军. 蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1679-1686.
- [90] Ali Usman, Sajid Nida, Khalid Azeem, et al. A review on vermicomposting of organic wastes[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2015, 34(4): 1050-1062.
- [91] Garg Vk, Kaushik Priya, Yadav Yk. Effect of stocking density and food quality on the growth and fecundity of an epigeic earthworm (*Eisenia fetida*) during vermicomposting[J]. The Environmentalist, 2008, 28(4): 483-488.
- [92] 李清飞, 路利军. 农村生活有机垃圾蚯蚓堆肥处理研究进展[D]. 2012.
- [93] 刘广青, 侯吉聪, 孟海玲, 等. 国内外蚯蚓处理废弃物发展现状[J]. 环境工程, 2003, 1: 137-142.
- [94] 霍维周, 丁雪梅. 蚯蚓处理垃圾及产业化问题的探讨[D]. 2002.
- [95] Lazcano Cristina, Gómez-Brandón María, Domínguez Jorge. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure[J]. Chemosphere, 2008, 72(7): 1013-1019.
- [96] 宋雪英, 郭畔, 宋晗, 等. 利用新鲜餐厨垃圾进行蚯蚓堆肥的试验[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2016(6): 5.
- [97] 王萍. 利用蚯蚓处理生垃圾的生态系统[J]. 国外科技动态, 1997, 337(8): 4.
- [98] 扬中市人民政府新闻中心. 加大垃圾分类资金投入 完善垃圾分类终端处理[J], 2019.
- [99] 处置湿垃圾, 小小蚯蚓成“主角” [EB/OL]. <https://www.jfdaily.com/journal/2018-11->

[15/getArticle.htm?id=261104](#).

- [100] 姜慧敏, 王文霞, 任苗苗, 等. 黑水虻转化厨余垃圾过程中病原菌灭活规律的研究与综合评价[J]. 环境科学学报, 2020, 40(03): 1011-1022.
- [101] Diener Stefan, Zurbrugg Christian, Gutiérrez F Roa, et al. Black soldier fly larvae for organic waste treatment-prospects and constraints[J]. Proceedings of the WasteSafe, 2011, 2: 13-15.
- [102] Joly Gabrielle, Nikiema Josiane. Global experiences on waste processing with black soldier fly (*Hermetia illucens*): from technology to business.(Resource Recovery and Reuse Series 16)[R]. International Water Management Institute, 2019.
- [103] Li Qing, Zheng Longyu, Cai Hao, et al. From organic waste to biodiesel: Black soldier fly, *Hermetia illucens*, makes it feasible[J]. Fuel, 2011, 90(4): 1545-1548.
- [104] Bosch G, Van Zanten Hhe, Zamproga A, et al. Conversion of organic resources by black soldier fly larvae: Legislation, efficiency and environmental impact[J]. Journal of cleaner production, 2019, 222: 355-363.
- [105] Wang Yu-Shiang, Shelomi Matan. Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal feed and human food[J]. Foods, 2017, 6(10): 91.
- [106] 广东省科学技术厅. 黑水虻规模化人工繁育关键技术及应用[J], 2016.
- [107] 南方双创汇. 利用黑水虻生物转化餐厨垃圾技术创新与应用[J], 2017.
- [108] 浙江在线缙云新闻网. 缙云探索垃圾处理新模式 利用垃圾养“黑虫”收益高[J], 2019.
- [109] 杭州养黑水虻做环保清道夫 厨余垃圾变废为宝[EB/OL].
<https://m.chinanews.com/wap/detail/zw/sh/2017/06-15/8251160.shtml>.
- [110] 新华网. ”吃货虫“每天吃 100 吨餐厨垃圾 广州项目试运行[J].
- [111] Diener Stefan, Gutiérrez Floria Roa, Zurbrugg Christian, et al. Are larvae of the black soldier fly-*Hermetia illu-cens*-a financially viable option for organic waste man-agement in Costa Rica[C]. Proceedings Sardinia, 2009.
- [112] Den Hartog Johan. Feed for food: HACCP in the animal feed industry[J]. Food control, 2003, 14(2): 95-99.
- [113] 肖梓良. 颗粒活性炭强化 UASB 反应器处理厨余垃圾的启用与运行[D]. 东北林业大学, 2019.
- [114] Salemdceb Ramy, Zu Ermgassen Erasmus K. H. J., Kim Mi Hyung, et al. Environmental and health impacts of using food waste as animal feed: a comparative analysis of food waste management options[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 140: 871-880.
- [115] 自然之友. 零废弃案例四: 做不好? 借口吧! 来看看西宁模式[J], 2017.
- [116] 新闻调查: 垃圾处理会不会走向“死胡同” [EB/OL]. <http://news.sina.com.cn/o/2009-12-29/172016851048s.shtml>.
- [117] 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.

[118] Opatokun Suraj Adebayo, Lopez-Sabiron Ana, Ferreira German, et al. Life cycle analysis of energy production from food waste through anaerobic digestion, pyrolysis and integrated energy system[J]. Sustainability, 2017, 9(10): 1804.

[119] 潘发存. 餐厨垃圾资源化利用产沼气发电的生命周期评价[D]. 广西大学, 2018.

[120] Saer Alex, Lansing Stephanie, Davitt Nadine H, et al. Life cycle assessment of a food waste composting system: environmental impact hotspots[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 52: 234-244.

[121] 杜欣, 陈婷, 李欢, 等. 2 种典型餐厨垃圾资源化处理工艺的环境影响分析[J]. 环境工程学报, 2010(1): 189-194.

[122] 肖锋. 餐厨垃圾生产车用燃气的生命周期评价[D]. 广西大学, 2018.

[123] Frey H. C., Zhu Y.: 11 - Techno-economic analysis of combined cycle systems, Rao A D, editor, Combined Cycle Systems for Near-Zero Emission Power Generation [M]. Woodhead Publishing, 2012: 306-328.

[124] Huiru Zeng, Yunjun Yan, Liberti Federica, et al. Technical and economic feasibility analysis of an anaerobic digestion plant fed with canteen food waste[J]. Energy conversion and management, 2019, 180: 938-948.

[125] Bastidas-Oyanedel Juan-Rodrigo, Schmidt Jens Ejbye. Increasing profits in food waste biorefinery—a techno-economic analysis[J]. Energies, 2018, 11(6): 1551.

[126] 陈永新. 餐厨垃圾分离机械新产品开发技术经济评价研究[D]. 重庆理工大学, 2015.

[127] 刘雪雪, 周宏, 卢兆进. 市场机制下城市餐厨垃圾回收利用管理研究[D]. 2015.

[128] 张颖, 贺业迅, 李菲菲, 等. 基于餐厨垃圾处理项目的工程经济分析与经济增加值(EVA) 的决策关系[J]. 环境卫生工程, 2014, 22(5): 63-64.

[129] Taelman Sue, Sanjuan-Delmás David, Tonini Davide, et al. An operational framework for sustainability assessment including local to global impacts: Focus on waste management systems[J]. Resources, Conservation & Recycling: X, 2019, 2: 100005.

[130] Tonini Davide, Wandl Alexander, Meister Kozmo, et al. Quantitative sustainability assessment of household food waste management in the Amsterdam Metropolitan Area[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 160: 104854.

[131] 董淑婧, 张昭瑞. 厨房生活垃圾处理收集装置的设计研究[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018, 04, 004.

[132] United States Environmental Protection Agency. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks [R], 1990-2018. 2018.

[133] J. K. Andersen, A. Boldrin, T. H. Christensen, C. Scheutz. Greenhouse gas emissions from home composting of organic household waste[J]. Waste Management, 2010, 30(12).

[134] Julia Martínez-Blanco, Joan Colón, Xavier Gabarrell, Xavier Font, Antoni Sánchez, Adriana Artola, Joan Rieradevall. The use of life cycle assessment for the comparison of biowaste

- composting at home and full scale[J]. Waste Management, 2010, 30(6).
- [135] Colon, J.; Cadena, E.; Pognani, M.; Barrena, R.; Sanchez, A.; Font, X.; Artola, A. Determination of the energy and environmental burdens associated with the biological treatment of source-separated municipal solid wastes. Energy Environ. Sci. 2012, 5 (2), 5731–5741.
- [136] Bijaya K. Adhikari, Anne Trémier, Suzelle Barrington, José Martinez, Mylène Daumoin. Gas emissions as influenced by home composting system configuration[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 116.
- [137] Antoni Sánchez, Adriana Artola, Xavier Font, Teresa Gea, Raquel Barrena, David Gabriel, Miguel Ángel Sánchez-Monedero, Asunción Roig, María Luz Cayuela, Claudio Mondini. Greenhouse gas emissions from organic waste composting[J]. Environmental Chemistry Letters, 2015, 13(3).
- [138] El Kader Nasser Abd, Robin Paul, Paillat Jean-Marie, Leterme Philippe. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting[J]. Bioresource technology, 2007, 98(14).
- [139] Florian Amlinger. Green house gas emissions from composting and mechanical biological treatment[J]. Waste Management & Research, 2008, 26(1).
- [140] Hongyu Zhang, Frank Schuchardt, Guoxue Li, Jinbing Yang, Qingyuan Yang. Emission of volatile sulfur compounds during composting of municipal solid waste (MSW)[J]. Waste Management, 2013, 33(4).
- [141] Hong Yu Zhang, Guo Xue Li, Jin Bing Yang, Qing Yuan Yang. Effect of Co-Composting of Kitchen Waste and Agricultural Waste on H₂S and NH₃ Emission[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 2808.
- [142] 张红玉, 李国学, 杨青原. 生活垃圾堆肥过程中恶臭物质分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(09): 192-199.
- [143] 张红玉, 王桂琴, 顾军, 李国学. 通风方式对厨余垃圾堆肥 H₂S 和 NH₃ 排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(12): 124-130.
- [144] 张玉冬, 张红玉, 顾军, 王继红. 通风量对厨余垃圾堆肥过程中 H₂S 和 NH₃ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(07): 1371-1377.
- [145] 张玉冬, 张红玉, 顾军, 王继红. 翻堆频率对厨余垃圾堆肥过程中 H₂S 和 NH₃ 排放的影响[J]. 环境工程, 2016, 34(04): 127-131.
- [146] 张晓旭, 张红玉, 李国学. 秸秆添加对厨余垃圾堆肥时 H₂S 和 NH₃ 排放的影响[J]. 环境工程, 2015, 33(01): 100-104.
- [147] 张红玉, 王桂琴, 顾军. 添加剂对厨余垃圾堆肥中 H₂S 和 NH₃ 排放的影响[J]. 环境工程, 2017, 35(05): 112-116.
- [148] 张红玉, 李国学, 袁京, 臧冰, 杨青原. 固氮添加剂降低厨余垃圾堆肥中 NH₃ 和 H₂S 排放[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 173-178.
- [149] 张红玉, 张玉冬, 顾军, 李国学, 袁京. 调理剂对厨余垃圾堆肥中 H₂S 和 NH₃ 排放的

影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3379-3386.

[150] 杜龙龙, 袁京, 李国学, 杨金兵. 通风速率对厨余垃圾堆肥 NH_3 和 H_2S 排放及腐熟度影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3714-3720.

[151] 尹靖凯, 龚小燕, 孙丽娜, 等. 黑水虻对餐厨垃圾养分转化研究[J]. 中国农业科技导报(Journal of Agriculture Science and Technonogy), 2020.

[152] Taylor Uekert, Christian M. Pichler, Teresa Schubert, Erwin Reisner. Solar-driven reforming of solid waste for a sustainable future [J]. Nature sustainability, 2020.

附件 1：近年开展的厨余垃圾处理项目代表

附表 1：近年开展的厨余垃圾处理项目代表

序号	项目名称	技术名称	技术原理	协同处理	项目地点	运营单位
1	苏州白洋湾有机垃圾综合处理项目	生物酶解处理技术	生化处理	厨余垃圾和农贸市场垃圾	苏州市姑苏区	百沃星联(上海)环保科技有限公司
2	闵行区餐厨垃圾资源化利用和无害化处理工程	生化处理	生化处理	厨余垃圾	上海市闵行区	北京嘉博文生物科技有限公司
3	北京市丰台区循环经济园厨余及餐厨垃圾处理项目	热水解+压榨制浆+高效厌氧消化	厌氧消化	厨余垃圾	北京市丰台区循环经济园	北京洁绿环境科技有限公司
4	山东齐河县有机废弃物综合处理项目	DANAS 干式厌氧消化技术	厌氧消化	园林绿化+农业废弃物+厨余垃圾	山东省齐河县	北京中持绿色能源环境技术有限公司
5	山东肥城市畜禽污染治理与综合利用	DANAS 干式厌氧消化技术	厌氧消化	畜禽粪污+沼渣+果蔬垃圾	山东省肥城市	北京中持绿色能源环境技术有限公司
6	屯溪区餐厨垃圾资源化利用和无害化处理项目	高温好氧发酵技术	好氧发酵	厨余垃圾	安徽省黄山市屯溪区	北京中源创能工程技术有限公司
7	广州市李坑综合处理厂项目	厨余垃圾‘热水解+双向压榨’制浆预处理+湿式厌氧处理工艺	厌氧消化	厨余垃圾	广东省广州市白云区	广州侨绿固废循环利用科技有限公司
8	德兴厨余垃圾处理站运营管理服务采购项目	高温好氧微生物处理技术	好氧发酵	厨余垃圾	广东省番禺区市桥街富华中路德兴公园内	广州希奕餐厨降解设备有限公司
9	佛山市南海区餐厨垃圾无害化处理及资源化利用项目	湿式中温厌氧	厌氧消化	厨余垃圾	广东省佛山市南海区	瀚蓝生物环保科技有限公司
10	长沙市餐厨垃圾无害化处理和资源化利用项目	高温厌氧消化工艺	厌氧消化	厨余垃圾	湖南省长沙市开福区	湖南联合餐厨垃圾处理有限公司

11	长春市有机固体废弃物综合处置中心	YM 菌超高温好氧发酵技术	好氧发酵	畜禽粪便+污泥+餐厨垃圾等可腐熟性有机废弃物	吉林省长春市农安县龙王乡	吉林省鹏鹞生物科技有限公司
12	泰州市餐厨垃圾处理项目	多线预处理+厌氧消化工艺	厌氧消化	餐厨废弃物+厨余垃圾+地沟油+市政污泥+园林垃圾+粪便	江苏省泰州市海陵区	蓝德环保科技集团股份有限公司
13	义乌市再生资源利用中心项目	高效厌氧消化系统	厌氧消化	厨余垃圾	义乌市佛堂镇金义东南线玉塘坑	蓝德环保科技集团股份有限公司
14	溧水天山技改项目垃圾项目厨余污水处理工程施工项目	CSTR 厌氧系统+预处理(离心脱水+气浮+格栅)+MBR+NF+RO+DTRO 工艺	厌氧处理	厨余垃圾	江苏省南京市溧水区	南京万德斯环保科技股份有限公司
15	宁波餐厨垃圾处理工程	湿式中温 CSTR 厌氧消化	厌氧消化	厨余垃圾	浙江省宁波市鄞州区洞桥镇宣裴村裴岙	宁波开诚生态技术有限公司
16	苏州工业园区餐厨及绿化垃圾处理一期工程	ANAMET 厌氧消化工艺	厌氧消化	餐厨及园林绿化垃圾	江苏省苏州市	普拉克环保系统(北京)有限公司
17	通州城市有机垃圾协同厌氧处理项目	厌氧消化	厌氧消化	厨余垃圾+市政污泥+市政粪便	北京市通州区	普拉克环保系统(中国)有限公司
18	重庆餐厨垃圾处理项目	ANAMET 湿式厌氧消化工艺	高温厌氧消化	餐厨垃圾+果蔬垃圾+市政污泥+牛粪	重庆市江北区	普拉克环保系统(中国)有限公司
19	齐齐哈尔餐厨废弃物资源化利用和无害化处理项目	中温厌氧	厌氧消化	厨余垃圾	黑龙江省齐齐哈尔市昂昂溪区水师营	启环科技有限公司、齐齐哈尔嘉润科技有限公司
20	合肥小庙厨余项目	卧式干式厌氧消化	厌氧消化	厨余垃圾	合肥市蜀山区小庙镇	上海安若必科环保科技有限公司
21	松江区湿垃圾资源化处理工程项目	分选后厌氧消化产沼、沼气净化后热电联产工艺	厌氧消化	湿垃圾(厨余垃圾和餐饮垃圾)和废弃食用油脂	上海市松江区	上海环境(上海环云再生能源有限公司)、维尔利环保科技股份有限公司
22	广州东部生物质综合处理厂	预处理+联合厌氧消化+综合利用处理工艺(LCJ 超级	厌氧消化	餐饮垃圾+厨余垃圾+动物固废+粪污	广州市黄埔区九龙镇福山循环经济产	深圳市朗坤环境集团股份有限公司

		厌氧微生物技术和 LHP 超高压分离技术)			业园内	
23	义乌市再生资源利用中心 PPP 项目	湿式厌氧/干式厌氧	厌氧消化	餐饮垃圾+厨余垃圾+地沟油	浙江省义乌市佛堂镇	义乌市深能再生资源利用有限公司
24	开县市政污泥处置、餐厨(厨余)垃圾处理	餐厨废弃物: 干湿挤压预处理 + 高温蒸煮技术 市政污泥: 盘式热干化+协同焚烧工艺	焚烧	厨余垃圾	重庆市开州市	重庆绿能新能源有限公司

附件 2：社区厨余垃圾处理实践调研报告

（一）调研背景

伴随着经济的快速发展和生活水平的迅速提高，城市生活垃圾的产量迅速攀升，在 2018 年已经超过了 2 亿吨。其中，占最大比例的是有机垃圾，或称为餐厨垃圾。餐厨垃圾可以按照来源和性质分为两大类：餐饮行业产生的有机垃圾，具有高油高盐、集中产生的特质，被称为餐饮垃圾；居民住户家中日常生活、农贸市场等地产生的有机垃圾，含油含盐相对较少，但分散产生于千家万户之中，又被称为厨余垃圾。厨余垃圾具备资源和垃圾的双重属性，因而在居民生活垃圾分类实践中，厨余垃圾往往作为单独一类收集和处理。与餐饮垃圾不同，厨余垃圾具备较好的社区堆肥的特质，在生活垃圾分类、减量的实践中越来越受到关注。

本次调研受万科公益基金会的支持，主要目的在于详细了解当前正在开展的厨余垃圾社区堆肥实践，从资（能）源消耗、经济效益、社会表现和环境影响四个方面评价各工艺路线的优劣，并系统总结、探索出一条适应于不同场景的厨余垃圾堆肥减量方式。为我国的厨余垃圾减量化工作提出建议。

万科公益基金会支持的社区堆肥项目（2019 年）如下表所示。

城市	区/镇	社区	负责组织	堆肥点	材料
成都	郫都区	永安村	成都城市河流研究会	有一座小型堆肥场地，100-200 公斤	厨余、绿化
绵竹	九龙镇	遵文社区	成都根与芽	有一座小型堆肥场地，100-200 公斤	餐厨、绿化
成都	金牛区	汇泽路社区	成都城市河流研究会	社区堆肥箱多个，~1 立方	菜场垃圾、绿化
青岛	城阳区	以琳美地小区	青岛你我社工	社区堆肥箱多个，~1 立方	生厨余、绿化、椰渣
郑州	二七区	绿城社区	郑州绿中原	社区堆肥箱 3 个，~1 立方	厨余、绿化
西安	碑林区	心晴雅苑小区	心晴雅苑业委会	社区堆肥箱 3 个，~1 立方	生厨余、绿化
宁波	江北区	三和嘉园	三和嘉园业委会		
深圳	盐田区	万科中心	万科公益基金会	黑水虻处理，100 公斤/天，社区堆肥箱 8 个，~1 立方	虫粪、椰渣、绿化
深圳	福田区	万科集团总部	万科公益基金会	社区堆肥箱 1 个，50 公斤/天	
北京	海淀区	西山庭院	万科公益基金会	黑水虻处理，50 公斤/天，社区堆肥箱 10 个，~2 立方	生厨余、绿化、椰渣
杭州	余杭区	良渚文化村	秘境守护者	简易社区堆肥箱两个	菜场垃圾、绿化
厦门	思明区	屿后村	好猫生态文明推广中心		

（二）调研内容

1. 北京市西山庭院小区

1.1 基本情况

北京市西山庭院小区位于海淀区天秀南二路与龙背村东路交叉路口往西北约 50 米。在万科自然基金会的支持下，该小区建设了黑水虻生物处理设施专职负责小区内厨余垃圾的处理，成为北京市垃圾分类与厨余垃圾处理的示范小区（图 1.1-1.2）。西山庭院小区共计 644 户居民，约 2000 人，夏季每日约产生厨余垃圾 420 kg，冬季约为 250 kg。当前，西山庭院建有厨余垃圾处理设施一座，占地约为 20 m²，处理能力为 100 kg/d，投资 38.8 万元，每日耗电均值为 2.519 度，需要一名劳动力（成本约为 7000 元/月）。



图 1.1 北京市西山庭院小区垃圾处理点



图 1.2 黑水虻生物处理产品样品及部分设备

1.2 堆肥工艺

图 1.3 展示了西山庭院小区厨余垃圾处理的物料平衡。该工艺的主要投入为：

1) 厨余垃圾 100 kg/d; 2) 五日龄幼虫 10 g/d。主要产出为: 1) 虫粪 0.03 t/d, 而后与园林垃圾、水、发酵剂和促进剂混合, 置于发酵设施中堆肥, 最终产出有机肥; 2) 老熟幼虫 0.02 t/d, 进一步处理后成为高蛋白饲料。在厨余垃圾黑水虻生物处理的基础上, 该小区将黑水虻虫粪和园林垃圾结合起来开展了简易堆肥: 混合水、促进剂和发酵剂后, 园林垃圾与虫粪分层堆叠, 堆肥约 3-4 个月后, 成为有机肥。

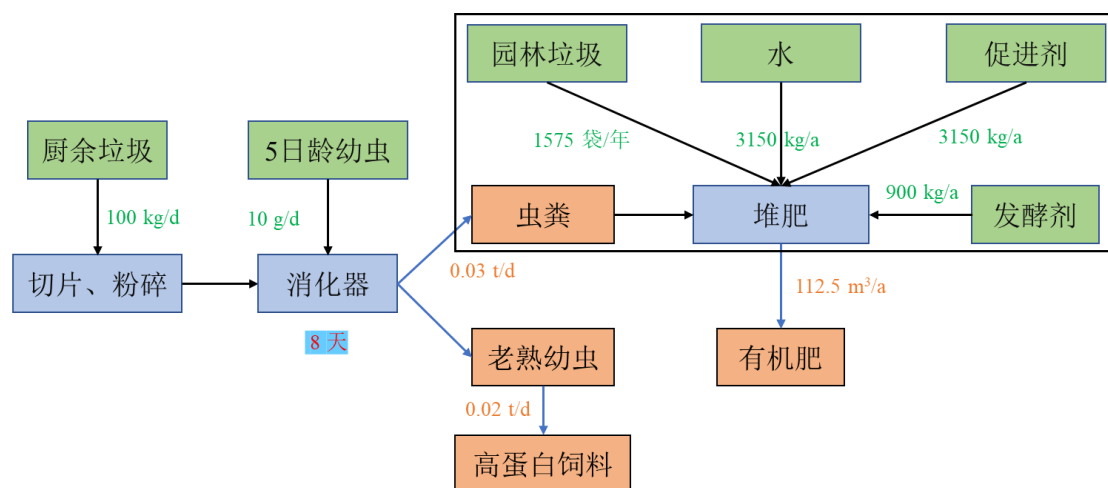


图 1.3 北京市西山庭院黑水虻生物处理厨余垃圾物料平衡

1.3 主要优缺点

北京市西山庭院社区黑水虻处理厨余垃圾的主要优点在于: 1) 设施占地面积较小, 没有明显气味产生, 容易被住户接受; 2) 厨余垃圾减量化效果明显, 且产出为高价值的动物蛋白; 3) 虫粪能与园林绿化垃圾混合堆肥, 大幅节约了垃圾收集、清运和处置费用。其主要缺点在于: 1) 较高的基建成本和人力成本, 以及黑水虻虫卵和堆肥所需的添加剂; 2) 尚未能覆盖到小区所有住户产生的厨余垃圾, 厨余垃圾处理前也需要工作人员人工分拣, 前端垃圾分类尚需进一步推进。

2. 陕西省西安市碑林区心晴雅苑社区

2020 年 11 月 15 日, 调研组从北京出发, 到达陕西省西安市, 次日上午调研西安市碑林区心晴雅苑厨余垃圾社区堆肥和垃圾分类工作, 对接人员为业委会工作人员周飞宇和闵捷。

2.1 基本情况

心晴雅苑社区位于西安市碑林区（108.9647E，34.2319N），住户 236 户，近半数为办公户，其余住户老年人居多。2019 年 9 月开始，万科公益基金会对该社区的生活垃圾规范化管理工作进行支持，厨余垃圾的社区堆肥也借此开展。截止到 2020 年 11 月，该社区的有机垃圾社区堆肥减量工作主要在园林绿化垃圾和 10 户示范住户的厨余垃圾中开展。园林绿化垃圾主要由物业收集处理，示范户的厨余垃圾在家中过滤后，采用定点不定时不破袋的模式投放（图 2.1）。每户居民的厨余垃圾产量在夏季约为 2 kg/天，在冬季约为 1 kg/天，主要成分是蔬果类和剩饭，约各占 50%。



图 2.1 园林绿化垃圾主要由物业收集处理，示范户的厨余垃圾定点不定时投放

2.2 堆肥工艺

该社区采用的有机垃圾处理工艺为好氧堆肥，堆肥池建设于小区公共用地，共 6 个（现运行 4 个，另 2 个因小区建设目前未使用），尺寸为 $1*1*1\text{m}^3$ /个，加上配套面积，共计约 10 平方米。堆肥池建设材料主要为蜂窝砖以保证好氧环境，未设置渗滤液收集、处置设施（图 2.2）。小区园林绿化垃圾收集后，较细的枝条和枯草落叶类需要通过铡刀粉碎成较小尺寸。堆肥时，园林垃圾、厨余垃圾和老肥类似“三明治”堆叠，EM（Effective Microorganisms）菌按照 50 g/kg 的标准混合。堆肥一个月左右需要翻堆一次（冬季适当延长，但一般不超过 2 个月），夏季大约需要 2 个月完成堆肥，冬季大约需要 3-4 个月。表 1.1 为心晴雅苑 2020

年冬季的堆肥数量记录。



图 2.2 心晴雅苑有机垃圾堆肥池

表 2.1 心晴雅苑 2020 年冬季堆肥数量记录

堆池号	堆肥时间	园林垃圾(kg)	厨余垃圾(kg)	总重量(kg)
1 号堆肥池	2019.12.02-2020.03.06	281.70	184.99	466.69
2 号堆肥池	2019.12.23-2020.03.22	198.07	85.98	284.05
3 号堆肥池	2019.12.13-2020.03.15	188.04	183.21	371.25
4 号堆肥池	2019.12.09-2020.03.16	178.44	121.60	300.04
5 号堆肥池	2019.12.17-2020.03.16	325.03	149.77	474.80
6 号堆肥池	2019.12.24-2020.03.16	3335.00	100.00	3435.00
合计		4506.28	825.55	5331.83

心晴雅苑对堆肥过程的温度变化做了较好记录（图 2.3）。各堆肥池的温度记录均呈现出“升温-高温-降温”的变化趋势，与好氧堆肥过程吻合较好。根据记录，各堆肥池的最高温度均能达到 70℃ 左右，在夏季时最高能达到 80℃。厨余垃圾的堆肥产物外观为黑褐色，园林绿化垃圾和厨余垃圾混合堆肥的产物呈棕褐色，粒度均匀，尺寸较小（图 2.4）。

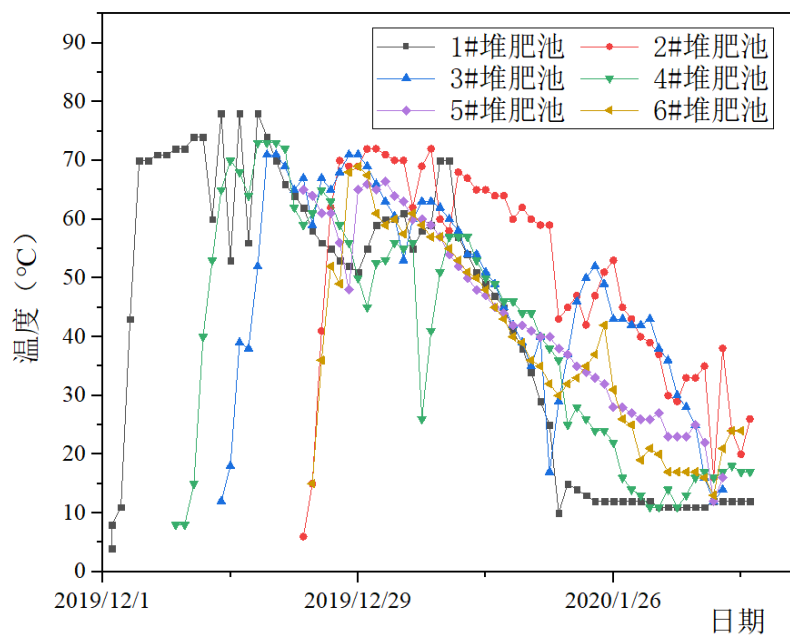


图 2.4 心晴雅苑有机垃圾堆肥产物（左：厨余垃圾，右：厨余+绿化垃圾）

该社区的堆肥产物主要是有机肥，大多用于社区公共作物的施肥。相对于未曾施肥的作物，添加有机肥后的表现出明显的优势（图 2.5）。



图 2.5 施肥后的冬青表现出明显的优势

2.3 主要优缺点

心晴雅苑在有机垃圾社区堆肥减量的优点主要在于：1) 在小区内有效动员了退休人员和物业、保洁人员的参与，年均人力成本支出约 15000 元。2) 试点的十户居民厨余垃圾分类宣传到位，居民将厨余垃圾在家中切碎、过滤后定点非定时非破袋投放到指定位置。3) 小区良好的垃圾分类工作基础。小区业委会编制了 20 类（四分+各种可回收物+危废细分等）的垃圾分类指导手册，并由物业保洁人员在后端精细分拣。（小区内近半为办公户，产生纸板较多，大多送给物业人员，该收益由物业自得，故有经济动机）。

心晴雅苑在有机垃圾社区堆肥减量的现存问题主要在于：1) 心晴雅苑目前仅有十户居民（约 30 人）参与厨余垃圾分类，现存的堆肥设施也主要是对园林绿化垃圾和这十户的厨余垃圾进行处理。其中，厨余垃圾的规模较小，占比仅为 15.48%，需要进一步推广。2) 当前堆肥设施靠近住户，有数户居民表达不满，准备迁到中心花园。3) 当前并无专职人员负责，将来全小区推广后，是否仍然能保证居民对厨余垃圾的良好分类、滤干有待商榷。

3. 四川省成都市武侯区新雅正街 2 号院

2020 年 11 月 16 日，调研组从西安出发，到达四川省成都市，次日上午调研成都市武侯区新雅正街 2 号厨余垃圾堆肥与垃圾分类实践，对接人员为刘贇和社区负责人李红英等。

3.1 基本情况

新雅正街 2 号院处于成都市武侯区南三环外（104.0267E，30.6067N），属庆安社区。该小区住户约 200 户，共计 700 余人，其中老年人约为 180 人。在爱生活家等公益组织的帮助下，该社区较早地开展了瓜果废弃物制环保酵素的实践，在社区中有较好的垃圾分类和减量的基础（图 3.1）。在万科公益基金会的支持下，该社区修建了 4 组（8 个） $1.25*1*1\text{m}^3$ /个的堆肥池，并于 2020 年 8 月 20 日开始堆肥。该堆肥设施的设计处理能力为 200-300 kg/天，但目前为止主要对园林绿化垃圾和农贸市场、商超的餐前厨余垃圾进行处理。



图 3.1 社区环保酵素的制作和厨余垃圾堆肥池

3.2 堆肥工艺

餐前厨余垃圾和老肥混合后，与园林绿化垃圾按照 1: 2 的比例混合，而后以酵素淋湿，湿度保持在 50-60%。酵素本身富含各种微生物，可部分代替菌剂。翻堆时间点保持在 1-2 个月后，总共堆肥时间约为 3-4 个月（图 3.2 左，因树叶未曾粉碎，堆肥效果不佳）。对于堆肥过程可能产生的渗滤液，该社区已经配套建设了人工湿地（图 3.2 右）。图 3.3 是新雅正街 2 号院有机垃圾堆肥的实际产物。左图堆肥原料主要是树叶，4 个月后仍然可见较为清晰的落叶轮廓，右图是展示的堆肥最终产物，呈黑褐色，粒度较为均匀。



图 3.2 堆肥池实际情况和人工湿地



图 3.3 新雅正街 2 号院堆肥实际产物（左：堆肥 4 个月，右：堆肥完成）

3.3 主要优缺点

新雅正街的厨余垃圾社区堆肥减量工作的优点在于：1）居民基础好。小区较早的开展了水果类废弃物发酵制环保酵素的实践，居民对厨余垃圾的社区堆肥较为欢迎。2）由爱生活家、益暖馨、一点绿等公益组织共同推动，技术路线等较为明确。

新雅正街的厨余垃圾社区堆肥减量工作的问题在于：1）经济可持续性较差。该堆肥项目目前尚无肥料产出，也没有自我造血功能和设计。志愿者团队共约 10 人，但总补贴仅 300 元/月，尚未由可靠的资金支持来源。2）设施建设有所欠缺。小区内用作堆肥的用地有限，设施的建设有一些缺陷，如通氧的设计不够（用的是实心砖而不是蜂窝砖，容易导致厌氧而产生较大气味）、处理渗滤液的人工湿地面积较小。当前也欠缺厨余垃圾的滤油滤盐设施，故目前仅用作园林绿化垃圾和农贸商超有机垃圾的堆肥，家庭厨余垃圾的堆肥尚欠缺。（在小区内，树叶不能粉碎，堆肥时间长）。3）社区支撑较弱。难以获得社区等基层政府的支持，仅能依靠自身力量。

4. 四川省绵竹市九龙镇

2020 年 11 月 18 日，调研组从成都出发，到达德阳绵竹市九龙镇，调研九龙镇遵文社区厨余垃圾堆肥与垃圾分类实践工作，对接人员为当地社区书记郑伟。

4.1 基本情况

绵竹市九龙镇遵文社区位于四川省德阳市（104.1457E，31.3938N），常住人口约为 1500 户，近 2000 人。2019 年 3 月 8 日起，遵文社区正式开展垃圾分类工作（图 4.1 左）。厨余垃圾作为一项单独的分类，收集模式由定时定点转变为定时上门收集（图 4.1 右）。根据遵文社区提供的有机垃圾收集、堆肥记录，该社区每年处理厨余垃圾约 50.91 吨，平均每月 4.24 吨；每年处理园林绿化垃圾 13.42 吨，月均 1.12 吨（图 4.2）。需要说明的是，当地农户家中大多自养家禽，有相当部分的厨余垃圾在居民家中消纳掉了。在非洲猪瘟爆发后，当地的厨余垃圾收集量下降了近 50%。



图 4.1 遵文社区 2019 年开始垃圾分类，厨余垃圾定时上门收集

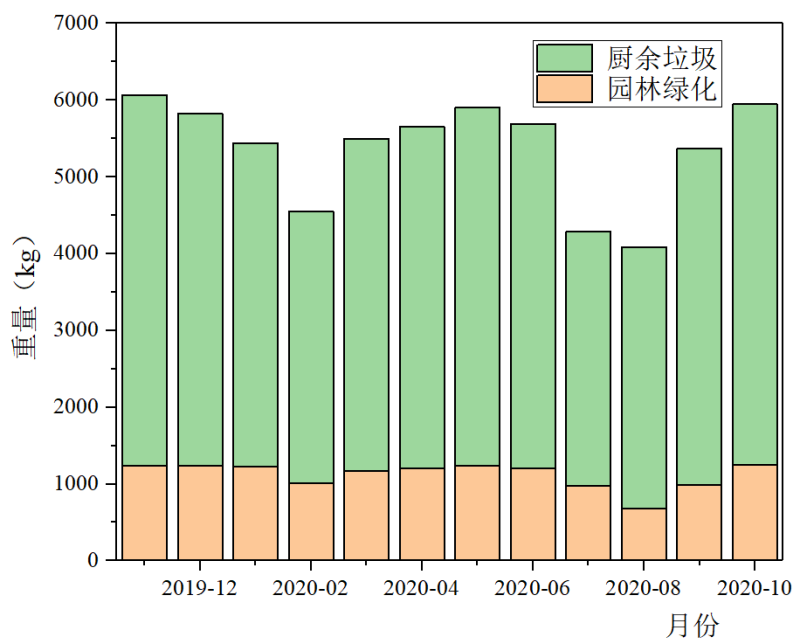


图 4.2 遵文社区一年度的厨余垃圾和园林绿化垃圾处理量

4.2 堆肥工艺

该社区的厨余垃圾处理工艺也是好氧堆肥。厨余垃圾经由专门的餐厨垃圾收

集车运到堆肥点(图 4.3)。堆肥点依托生活垃圾转运站建设,现存共 16 个 $1*1*1\text{m}^3$ 的好氧堆肥池。收集的厨余垃圾和粉碎后的园林绿化垃圾混合后发酵,夏季时堆肥时间约为 60 天,冬季延长 1 个月,堆肥过程的最高温度均能达到 65°C 以上。但实地调研发现,该社区的堆肥点蚊蝇众多,气味较大。可能的原因是堆肥池的建设和日常管理有所缺陷,如堆肥场能看到明显的渗滤液痕迹却没有相应的收集、处理设施,通风通氧也较差,部分反应可能是厌氧消化。



图 4.3 九龙镇生活垃圾转运站和堆肥场地

4.3 主要优缺点

遵文社区堆肥实践的优点在于: 1) 场地面积较大; 2) 地方基层领导的大力支持; 3) 万科公益基金会准备在此地支持建设一个厨余垃圾堆肥的环教基地, 有设施升级改造计划。

遵文社区堆肥实践的问题在于: 1) 堆肥设施问题较大。堆肥设施未考虑滤盐的问题, 堆肥产物盐分较高。也没有考虑通风通氧的情况, 厌氧消化的比例较大, 导致较大气味和大量蚊蝇滋生。相应的, 估计在温室气体排放和产物肥力方面可能表现较差。2) 经济可持续性较差。除万科公益的支持外, 目前尚无其他获得收益的方式。

5. 四川省成都市郫都区安宁村

2020 年 11 月 19 日, 调研组前往成都市郫都区安宁村, 调研垃圾分类和厨余垃圾堆肥情况, 对接人员为成都城市河流研究会负责人董泽兵。

5.1 基本情况

安宁村位于成都市郫都区 (103.8034E , 30.8949N), 地处成都市水源保护区,

自然条件优良。冬季日均最低气温 0℃以上，植物茂密，居住条件良好。当地住户 181 户，约 500 人，多开办农家乐、花卉苗圃基地。公益组织成都城市河流研究会在此地的垃圾分类推广已经开展了数年，分类方式为四分（图 5.1），定点不定时。在万科公益基金会的支持下，成都城市河流研究会在此地修建了 10 个（5 组） $1*1*1.25\text{ m}^3$ 的堆肥池，总花费约 6 万元。每年 4-6 月份是该村园林绿化垃圾产量最高的时候，专职人员将其收集后储存在堆肥点。厨余垃圾每天收集量约为 120 kg，夏季的瓜果蔬菜更多，冬季由酒席、农家乐产生的高油高盐餐厨垃圾较多，整体上季节产生量没有很大变化。堆肥点有三名村民专职负责堆肥、粉碎和可回收物收集、整理，每月薪酬为 1300-1400 元。



图 5.1 安宁村垃圾分类四分法

5.2 堆肥工艺

厨余垃圾由居民送过来后，经过分拣将塑料袋等杂质取出，而后类似“三明治”堆叠，分别为粉碎的园林绿化垃圾、厨余垃圾和老肥，每层厚度约为 5 cm。堆肥设施兼有配套的除油除盐环节，尤其是酒席产生的厨余垃圾必须经过除油除盐之后才能进入堆肥池。堆肥池由蜂窝砖建设而成，留有充足的通风通氧气孔和专门的渗滤液收集装置（图 5.2）。有机垃圾堆肥时间整体上在 2 个月左右，最高温度可达 75℃，堆肥完成后下降到 45 摄氏度左右，无需翻堆。堆肥过程还设有专门的渗滤液处理环节——人工湿地。除油除盐和堆肥过程中产生的渗滤液经由管道汇入到种有芦苇、伞草的人工湿地中，得到净化（图 5.3）。



图 5.2 堆肥池内部构造和配套的除油除盐环节



图 5.3 堆肥过程设有专门的人工湿地处理污水（左：芦苇，右：伞草）

安宁村的有机垃圾堆肥产物形貌如图 5.4 所示，堆肥时间在 45-50 天左右。总体上，堆肥产物颜色呈棕褐色，力度较为均匀，已经发生了明显的腐烂现象，略有刺激性气味。



图 5.4 安宁村的有机垃圾堆肥产物（左：50 天，右：45 天）

5.3 主要优缺点

郫都区安宁村堆肥实践的优点在于：1）完整的厨余垃圾收集、堆肥、渗滤液处理和肥料使用全过程，且有一定规模。在 NGO 成都城市河流研究会的推动下，该村居民已经养成将厨余垃圾分类出来送到堆肥点的习惯，包含餐前、餐后和部

分园林果蔬废弃物。滤盐、堆肥操作简单，通风设计合理，渗滤液由人工湿地处理（主要物种为芦苇和伞草）。堆肥产物主要用于花卉种植，成分检测中仅大肠杆菌超标。2）理念务实。尽量减小村民的麻烦，才能最大可能的动员居民参与。居民自身参与，堆肥过程由三名兼职村民负责，堆肥产物也由居民取用。此外，无需外加菌剂，堆肥成本较低。3）以此次调研的五个点的实际情况来看，这是较为合适的、能够推广复制的一种模式。

郫都区安宁村堆肥实践的问题在于：1）仅靠 NGO 推动，费时费力才初步覆盖一个村。2）当地政府（村镇两级）的责任缺失。政府的目光放在垃圾分类上，对厨余垃圾堆肥、减量的工作支持较少。据说，该 NGO 对政府抱以“工作我做，政绩你拿，却无任何支持”看法，与村民的简单访谈印证了这一点。3）自身造血维持运转的可能也比较小。

6. 浙江省杭州市余杭区良渚文化村

2020 年 11 月 20 日，调研组前往杭州市余杭区良渚文化村，调研垃圾分类和厨余垃圾堆肥情况，对接人员为自然学堂负责人吴雯和万科物业负责人朱家彬。

6.1 基本情况

良渚文化村位于杭州市余杭区（120.0232 E，30.3573 N），距离杭州市中心 16 公里，距离良渚遗址保护区 2 公里。既紧靠著名的文化遗址，又有距杭州市区中心最近的丘陵绿地和水网平原相结合的生态环境。万科集团在此地耕耘近二十载，在此地拥有丰厚的根基，万科物业等系列企业的存在感较强。良渚文化村目前万科物业在管 17 个项目，总户数 19877 户，目前入住 12928 户，入住率 65%。绿化养护面积近 80 万平方米，绿化垃圾年产生量约 1600 m³，其余部分由“虎哥”清运。

在万科公益基金会的支持下，公益组织自然学堂在良渚文化村东南争取到劝学公园作为科教基地，号召周围住户参与到垃圾分类、厨余堆肥、自然耕作和家禽养殖等实践活动中。对于厨余垃圾的处理，自然学堂以好氧堆肥为主，但当地的厨余垃圾收运已经形成了完善的体系，自然学堂只能从学校、厨余垃圾转运站获得一些分类的厨余垃圾用作堆肥。

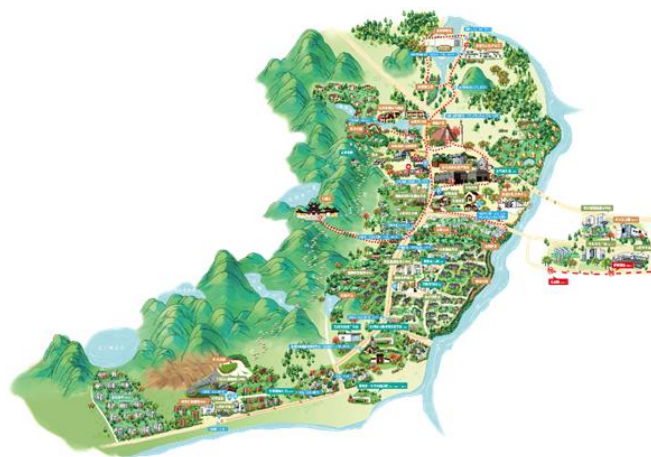


图 6.1 杭州市余杭区良渚文化村



图 6.2 自然学堂劝学公园实践基地和种植实践

6.2 堆肥工艺

因为场地和资金的原因，该基地尚未修建堆肥池（已有计划），有机垃圾堆肥采用编织袋露天堆放的形式进行（图 6.3）。收集而来的厨余垃圾和园林绿化垃圾 1: 1 混合后，按照 15 kg/t 有机垃圾的比例添加尿素，然后盛装在编织袋中，露天堆放。实地随机采样发现，编织袋的核心温度能够达到 60℃ 以上，堆肥产物呈现棕褐色，肉眼难以观察到厨余垃圾成分，主要是破碎的园林绿化垃圾。



图 6.3 有机垃圾由编织袋盛装，露天堆肥和堆肥样品

6.3 主要优缺点

杭州良渚文化村堆肥实践的优点在于：1) 较好的设施和管理基础。万科集团在良渚文化村深耕 20 年，也是其在杭州的肇始。当地社区存在感较弱，各项事务主要由万科旗下的各部门负责，垃圾收运和中转设施、场地齐全。NGO 良渚自然学堂在劝学公园里开展了厨余垃圾堆肥实践（基于自然课堂），包括种植、堆肥、养蜂、蚯蚓等。2) NGO 的基础较好，有昆虫、土壤、园林等方面的专业人士参与其中。但应注意到，这种方式主要是呆在家中的全职妈妈、退休人员等人自发组成，可复制性较差。但如果能与万科正在开展的厨余垃圾处理结合起来，或许能够成为万科的另一个典范（综合自然宣教、社区管理的，而非西山庭院这种小区式的，且前者可能更具社会影响力）。

杭州良渚文化村堆肥实践的问题在于：1) 主要有机垃圾是园林绿化垃圾。厨余垃圾的来源主要有附近的中小学和垃圾转运站，占比较小。2) 杭州万科对有机垃圾的堆肥并没有很大的支持。3) 该 NGO 自身运营的困难。经济性可持续性较差，且需要向万科支付较为高昂的场地使用费用。

（三）社区堆肥项目汇总

1. 调研情况汇总

表 4.1 调研社区基本情况汇总

社区基本情况	社区户数	北京市西山庭院	西安心晴雅苑	新雅正街 2 号院	绵竹市遵文社区	郫都区安宁村	杭州良渚文化村
		644	236	200	1500	181	19877
项目工程概况	面向人口数（人）	2000	30	750	1950	550	1000
	堆肥池建设规模	占地 20 m ²	6×1*1*1 m ³	8×1.25*1*1 m ³	16×1*1*1 m ³	10×1.25*1*1 m ³	绿化垃圾粉碎后放 编织袋露天堆放
	设计处理能力（kg/d）	100	100	300	750	500	
	实际处理量（kg/d）	100	15	140	120	130	
	堆肥原料及配比	厨余	绿化：厨余：老肥 1:1:1 层叠	厨余：绿化 1:2	厨余：绿化 2:1	厨余：绿化 1:1	绿化+少量厨余
	堆肥辅料（kg/t）	0.1kg 幼虫	50 kg EM 菌	自产酵素用作菌剂	10 kg 老肥+18 kg 有机垃圾	无	15 kg 尿素
	过程最高温度（℃）	常温	70（夏 80）	估计 60 以上	70	75	65
	耗电（kWh/t）	25	无	无	无	40L 柴油/吨	15（粉碎耗电）
	耗水（kg/t）	无	按经验未计量	按经验未计量	无	150（淋洗用水）	150（绿化加水）
	堆肥周期（d）	90-120	夏 60 冬 90-120	90-120	夏 60 冬 90	60	15
	一个周期翻堆次（次）	不需要	2	2-3	2	不需要	不翻堆
	产出率	50%	边堆边降边用	尚在堆肥中	21%	50%-60%	

经济效益	基建费（元）	388000	3681	50000	200000	60000	基础运营 50000
	人力费（元/年）	84000	15000	3600	59400	100000	36500（志愿补贴）
	堆肥产物检测认证	未检测	未检测	尚无堆肥产物	盐分超标	大肠杆菌略超	未检测
	堆肥产物去向	赠送给业主	小区绿化用肥	义卖或作花肥育花再售出	给村民作肥料	给村民作肥料	销售肥料给农民
	售卖产品收入（元/袋）	无	无	10	无	无	10-20
	是否需要二次分拣	需要	需要	需要	需要	需要	需要
	管理运营情况	物业兼职	物业兼职	公益组织引导	政府牵头	公益组织引导	从自然教育切入
	居民态度	支持	反对到支持	反对到支持	态度支持	反对到参与	有热情但不持久
	居民参与	督导员指导下进行	10 户居民	农贸商超厨余为主	垃圾车上门收集	村民主动送去堆肥	自然教育中顺带参与
环境卫生	堆肥场地卫生情况	良好	良好	良好	苍蝇多	良好	有苍蝇
	气味感受	无明显恶臭	无明显恶臭	无明显恶臭	气味较明显	无明显恶臭	无明显恶臭

2. 堆肥产物参数汇总

2.1 堆肥产物检测实验方案

(1) 含水率

用电子天平（LS220A，上海天美天平仪器有限公司）称取适量鲜样盛放在事先干燥至恒重的称量瓶中，置于电热鼓风干燥箱（101-2AB 型，天津市泰斯特仪器有限公司），在 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干 4-6h 后，于干燥器内冷却 0.5h 称量。重复烘干 1-2h，冷却 0.5h 后再称重，直至两次称量之差小于样品量的百分之一（烘干至恒重）。做三份试料的平行测定，结果取平均值。含水率计算公式如下：

$$C_w = (M - M') / M$$

式中： C_w ——样品含水率，%； M ——样品湿重； M' ——样品干重。

(2) C、N、H、S 的测定

首先按照 GB/T8571-2008《复混肥料 实验室样品制备》的方法制备处理产物样品：取出适量烘干样品，用研钵研磨至通过 100 目筛，混合均匀，置于洁净、干燥瓶中，用元素分析仪（德国 elementar, vario MACRO cube）测定试样中 C、N、H、S 元素的含量。做三份试样的平行测定，结果取平均值。

元素分析仪的基本原理：样品经过粉碎研磨后，通过锡囊或银囊包裹，经自动进样器进入燃烧反应管中，向系统中通入少量的纯氧以帮助有机或无机样品燃烧，燃烧后的样品经过进一步催化氧化还原过程，其中的有机元素 C、H、N、S 和 O，全部转化为各种可检测气体。混合气体经过分离色谱柱进一步分离，最后通过 TCD 热导检测器或 IR 红外检测器完成检测过程。

2.2 北京市西山庭院

表 4.2 为北京市西山庭院堆肥产物指标检测结果。该堆肥产物的含水率为 70.76%，碳含量接近 35%，C/N 约为 13。

表 4.2 北京市西山庭院堆肥产物指标检测结果

检测项目	北京市西山庭院			平均值
样品湿重 M	5.38	4.78	5.66	5.27
样品干重 M'	1.65	1.39	1.58	1.54
含水率%	69.26	70.96	72.06	0.7076
送样重量 (mg)	49.70	50.20	50.30	50.07
N, %	2.66	2.62	2.64	2.64
C, %	34.93	34.59	34.97	34.83
H, %	4.05	4.01	4.06	4.04
S, %	0.63	0.54	0.53	0.56
C/N 值	13.15	13.19	13.24	13.19
C/H 值	8.63	8.62	8.62	8.62

2.3 西安市心晴雅苑

表 4.3 即为西安市心晴雅苑堆肥产物指标检测结果。其中，粗样为纯厨余垃圾堆肥产物，细样为厨余垃圾、老肥和园林绿化垃圾按照 1: 1: 1 比例混合堆肥产物。相对而言，粗样表现出更低的含水率和碳含量，可能是由于其取样中混入了较多泥土。

表 4.3 西安市心晴雅苑堆肥产物指标检测结果

检测项目	西安一心晴雅苑（粗）				平均值	西安一心晴雅苑（细）				平均值
样品湿重 M	7.51	7.50	8.14	7.72	7.72	5.41	5.41	4.96	5.26	5.26
样品干重 M'	4.60	4.50	4.78	4.63	4.63	2.44	2.36	2.07	2.29	2.29
含水率%	0.39	0.40	0.41	0.40	0.40	0.55	0.56	0.58	0.57	0.57
送样重量 (mg)	50.30	50.10	50.50	50.30	50.30	49.80	50.40	50.10	50.10	50.10
N, %	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	1.20	1.22	1.26	1.23	1.23
C, %	7.21	7.16	7.11	7.16	7.16	12.55	12.82	13.19	12.85	12.85
H, %	1.06	1.05	1.04	1.05	1.05	1.54	1.58	1.62	1.58	1.58
S, %	0.19	0.16	0.16	0.17	0.17	0.21	0.21	0.22	0.21	0.21
C/N 值	10.40	10.32	10.32	10.35	10.35	10.49	10.54	10.49	10.51	10.51
C/H 值	6.80	6.85	6.82	6.82	6.82	8.14	8.14	8.16	8.14	8.14

2.4 成都市武侯区新雅正街 2 号院

表 4.4 为成都市武侯区新雅正街 2 号院堆肥产物的指标检测结果。其目前仍以园林垃圾作为堆肥的主要原料。总体而言，正在堆肥的有机组分表现出更高的含水率和较低的 C/N，可能是由于其尚未堆肥完成。

表 4.4 成都市武侯区新雅正街 2 号院堆肥产物指标检测结果

检测项目	新雅正街 2 号院			平均值	新雅正街展品			平均值
样品湿重 M	5.77	6.83	4.91	5.84	5.23	5.29	5.45	5.32
样品干重 M'	1.53	2.25	1.26	1.68	2.19	2.39	2.21	2.26
含水率%	0.74	0.67	0.74	0.72	0.58	0.55	0.59	0.57
送样重量 (mg)	49.90	50.50	50.00	50.13	48.90	50.30	50.70	49.97
N, %	1.61	1.59	1.65	1.62	1.78	1.75	1.75	1.76
C, %	24.08	23.67	24.76	24.17	29.83	29.42	29.32	29.52
H, %	2.91	2.88	3.00	2.93	3.35	3.31	3.31	3.32
S, %	0.24	0.24	0.25	0.24	0.26	0.26	0.25	0.25
C/N 值	14.91	14.86	14.97	14.91	16.73	16.77	16.79	16.76
C/H 值	8.28	8.22	8.24	8.25	8.90	8.90	8.85	8.88

2.5 绵竹市九龙镇

表 4.5 为绵竹市九龙镇厨余垃圾堆肥产物指标检测结果。九龙镇的堆肥样品已基本完成堆肥，含水率控制在 20% 以下，且表现出较高的碳含量和氮含量。

表 4.5 绵竹市九龙镇厨余垃圾堆肥产物指标检测结果

检测项目	绵竹市九龙镇样品 1			平均值	绵竹市九龙镇样品 2			平均值
样品湿重 M	3.73	3.91	4.17	3.94	3.24	2.72	2.96	2.97
样品干重 M'	2.98	3.13	3.32	3.14	2.67	2.25	2.42	2.45
含水率%	0.20	0.20	0.20	0.20	0.17	0.17	0.18	0.18
送样重量 (mg)	50.20	50.50	50.60	50.43	50.10	50.50	49.90	50.17
N, %	3.96	4.02	3.92	3.97	4.05	4.05	4.10	4.07
C, %	33.43	33.93	32.98	33.45	35.53	35.48	36.03	35.68
H, %	4.36	4.41	4.26	4.34	4.23	4.21	4.29	4.24
S, %	0.65	0.69	0.70	0.68	0.63	0.67	0.65	0.65
C/N 值	8.44	8.45	8.41	8.43	8.76	8.76	8.79	8.77
C/H 值	7.67	7.69	7.75	7.70	8.39	8.42	8.41	8.41

2.6 成都市郫都区安宁村

表 4.6 为成都市郫都区安宁村厨余垃圾堆肥产物指标检测结果。该样品也基本腐熟完成。含水率在 55%-58%，具有较高的碳含量和氮含量。

表 4.6 成都市郫都区安宁村厨余垃圾堆肥产物指标检测结果

检测项目	成都市郫都区安宁村样品 1				平均值	成都市郫都区安宁村样品 2				平均值
样品湿重 M	4.66	4.25	4.17	4.36	3.30	3.96	3.54	3.60		
样品干重 M'	1.95	1.79	1.74	1.83	1.50	1.77	1.67	1.65		
含水率%	0.58	0.58	0.58	0.58	0.54	0.55	0.53	0.54		
送样重量 (mg)	50.50	50.40	49.90	50.27	50.00	50.50	50.30	50.27		
N, %	3.54	3.56	3.61	3.57	4.20	4.17	4.14	4.17		
C, %	31.65	32.02	32.35	32.01	38.46	38.61	38.16	38.41		
H, %	3.85	3.90	3.93	3.89	4.67	4.70	4.62	4.67		
S, %	0.60	0.62	0.60	0.61	0.67	0.70	0.69	0.69		
C/N 值	8.94	8.99	8.96	8.97	9.16	9.26	9.21	9.21		
C/H 值	8.23	8.22	8.24	8.23	8.23	8.21	8.26	8.23		

2.7 杭州市余杭区良渚文化村

表 4.7 为杭州市余杭区良渚文化村园林绿化垃圾的堆肥产物指标检测结果。

该堆肥点的主要原料是园林绿化垃圾, 含水率在 40%-48%之间, 具备较高的 C/N。

表 4.7 杭州市余杭区良渚文化村园林垃圾堆肥指标检测结果

检测项目	成都市郫都区安宁村样品 1				平均值	成都市郫都区安宁村样品 2				平均值
样品湿重 M	4.20	4.40	4.13	4.25	5.06	5.19	5.54	5.26		
样品干重 M'	2.16	2.29	2.15	2.20	2.60	2.54	4.30	3.15		
含水率%	0.48	0.48	0.48	0.48	0.49	0.51	0.22	0.41		
送样重量 (mg)	49.90	49.75	50.30	49.98	50.80	50.30	50.10	50.40		
N, %	2.01	2.01	2.01	2.01	1.79	1.72	1.74	1.75		
C, %	37.18	37.17	37.36	37.24	25.46	24.36	24.68	24.83		
H, %	4.40	4.40	4.43	4.41	3.01	2.88	2.90	2.93		
S, %	0.26	0.24	0.22	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22		
C/N 值	18.95	18.99	19.07	19.00	14.19	14.18	14.20	14.19		
C/H 值	8.45	8.45	8.45	8.45	8.45	8.46	8.51	8.47		

(四) 调研总结

1. 总体评价

就此次实地访谈调研获得的信息而言, 我们对社区就地堆肥处理厨余垃圾的技术操作、资(能)源消耗、经济效益、社会表现和环境影响有了初步全面的了解, 总体来说, 有以下几点:

1) 社区就地堆肥处理厨余垃圾的技术操作门槛低, 依照经验将厨余及绿化等有机垃圾层层堆叠即可, 这意味着其可操作性强, 有利于发动社区居民参与;

另外技术路线及进一步优化也尚在探索尝试中，尚未形成精准量化的技术指导。

2) 社区就地堆肥处理厨余垃圾能耗低，基本不需要加水耗电或其他能源；在处理绿化垃圾时，可能用到粉碎机，会存在电力消耗或柴油消耗，需要适量加水保证湿度。

3) 社区就地堆肥处理厨余垃圾的堆肥产品产出尚未规模化规范化，就此次走访的调研点而言，当地社区堆肥的产出尚且不能满足当地社区的需要，只够堆肥实操人员赠送或廉价售卖给自己的亲朋好友或者用作小区绿化用肥，销售收入很低；但另一方面，社区就地堆肥处理厨余垃圾带来显著的垃圾减量成效，随之减少了生活垃圾清运处理费用的开支。

4) 在开展社区就地堆肥处理厨余垃圾过程中，社区居民由原先的反对或观望在政府牵头或公益组织引导下也积极参与进来，对社区就地堆肥处理厨余垃圾技术进行讲解推广、教育培训的组织也在壮大，这可能意味着新的行业以及就业机会。

5) 社区就地好氧堆肥处理厨余垃圾的场地基本干净卫生，且无恶臭气味，肥样多棕褐色，接近腐殖土样，目测有机质含量高，且未收到居民的反对抗议。因此总体认为社区就地堆肥处理厨余垃圾对于生活垃圾减量化、资源化、无害化以及优化人居环境有着积极的意义，可持续性良好。

另外经过了解，西安市心晴雅苑小区、成都市庆安社区 2 号院、郫都区安宁村、杭州市良渚文化村这四个点除堆肥处理厨余垃圾外，项目负责人同时也在探索用蔬果垃圾制作酵素，而且就成都市庆安社区 2 号院实地调查了解的情况而言，居民对此的兴趣较高，其产品商品化销售的潜力大。

2. 经验总结

此次调研的 5 个社区在就地堆肥处理厨余垃圾的实践中，有共有的具有借鉴意义的经验，也有各自的特色经验，总结如下：

1) 用人上都充分动员了有时间、有兴趣、有经验的退休人员或农民来进行堆肥操作，一来保证堆肥质量，二来在资金有限的情况下，节省人力成本。

2) 技术设计上郫都区安宁村形成的一整套“淋洗滤盐滤油水龙头-通风良好的堆肥池-渗滤液及雨水收集管道-人工湿地（伞草吸附污染物）”系统的处理设计成本较低，可操作性强，具有实用的借鉴推广意义，而且可以进一步与当地公园

与科教基地建设相结合，可持续性良好。

3) 在社区就地堆肥处理厨余垃圾的管理运营中，社区负责人与社会公益组织的良好协作互动形成正向反馈，带动了居民参与。进一步争取往政府牵头-社会（专业）组织引导-群众参与的运作模式靠拢，对生活垃圾的有效治理具有积极的借鉴意义。

另外要说明的是，厨余垃圾社区堆肥实践尚在探索之中，普遍存在各种不足和困难，尤其是争取群众参与支持上，如何让群众从态度支持转为行动支持还需要下很大工夫。五个社区在堆肥实践前就当地的实际情况也做了一些工作，如充分入户宣传做好群众工作，尽可能减少后期麻烦，探索中发现做好通风不翻堆也可以，减少堆肥实操人员的不满；爱生活家和益暖馨等公益组织借助在该社区环保酵素制作的良好基础，探索制作了“一点绿”牌环保酵素和洗洁精，用以和居民以物换物获得可回收物或按照 1 元/瓶的价格售卖来补贴人工；西安市心晴雅苑则尽可能发动社区内的离退休人员和物业人员，以居民的可回收物售卖作为工作人员的补贴等。这些实践经验非常宝贵，但还难以形成可直接复制推广的模式，需要因地制宜调整适应。此外，更大尺度如街道、乡镇级别的厨余垃圾阳光房堆肥实践也在起步探索，值得持续关注。

3. 问题及改进

五个社区都采取好氧发酵的技术思路处理当地的厨余垃圾，但实践成果存在较大差距。除各社区不可避免的地域差异外，在工程设计与落实、管理运营和监测记录方面不同程度地暴露出一些问题：

1) 工程设计与落实上，存在堆肥池通氧设计不够，欠缺堆肥前的滤油滤盐设施，缺少处理渗滤液的后端配套设施等问题，建议项目负责人把握堆肥工艺的关键环节与实现材料，确保工程落地后能实现预期目标，比如用蜂窝砖砌堆肥池来实现良好的通风条件，而非普通实心砖；增设水管，淋洗油盐含量高的餐后厨余垃圾等。

2) 管理运营上，存在管理不善的问题，可能因图省事未将塑料袋分拣出或未及时翻堆，从而影响堆肥产物的品质，甚至转为厌氧消化，释放恶臭气体，建议进一步规范堆肥人员的实际操作，及时分拣出塑料袋，适时翻堆，避免堆肥产物变质。

3) 监测记录上, 存在堆肥工艺相关参数记录不完整或不够定量描述的问题, 建议构建完整的定量化的堆肥工艺相关参数记录, 以便后期跟进, 一方面有助于总结成定量化的可推广的技术路线, 另一方面有助于发现堆肥过程中的异常, 及时止损。

另外此次调研的所有社区在堆肥过程中都不同程度地将绿化垃圾与厨余垃圾放一起进行堆肥, 甚至以绿化垃圾为主要堆肥原料, 这与 11 月落叶量大的季节规律直接相关, 但就一年的尺度来看, 绿化垃圾的产量随四季变化, 这增加了堆肥原料的变数, 进而会影响到堆肥产物品质与堆肥工艺参数的变化, 有待进一步探索。

4. 存在的困难

经过我们实地访谈调研, 目前了解到的社区堆肥实践中存在的困难有:

1) 资金上, 社区堆肥尚处于起步探索的阶段, 一是资金来源主要靠公益创投、政府补贴, 资金不足以完全支撑基建和人力等其他运营管理费用; 二是自身造血功能尚且不足, 堆肥产品尚未规模化商品化, 相应的销售收入非常有限。

2) 当地政府或主管部门的支持普遍较弱, 特别是在基层。生活垃圾减量化对政府减少垃圾处理费用是有益的, 但基层政府往往不负责该项财政支出, 这意味着生活垃圾减量化带来的财政效益难以体现在基层政府上, 相反, 由于厨余垃圾堆肥产生各种风险则由基层政府承担, 如可能发生的居民反对投诉、孩童学习参观时的安全问题等。除绵竹市遵文社区由政府牵头开展厨余垃圾堆肥处理工作外, 其余 4 个点的社区堆肥工作都未得到当地政府主管部门切实有力的支持, 在成都市郫都区安宁村, 当地村委对厨余垃圾堆肥实践几乎无支持; 在杭州良渚文化村, 基层政府和万科负责运营的部门也表现出较低的积极性。

3) 在堆肥产物的检测认证以及进一步优化堆肥工艺上存在专业分析和技术支撑不足的困难, 在证明堆肥产物品质、决定堆肥产物能否进入市场交易以及进一步支撑社区堆肥项目可持续运作上是薄弱环节。

附件 3：报告中的技术代号对应的案例名称

技术类型	案例名称	文中代号
厌氧消化	浙江省宁波市厨余垃圾干式厌氧处理	干式厌氧 A
	山东省青岛市餐厨垃圾湿式厌氧处理	湿式厌氧 A
	广东省广州市餐厨垃圾湿式厌氧处理	湿式厌氧 B
好氧生物处理机	上海市闵行区餐厨垃圾好氧生化处理	好氧生化处理 A
	江苏省扬州仪征市厨余垃圾处理	好氧生化处理 B
	浙江省天台县厨余垃圾处理	好氧生化处理 C
	江苏省扬州市厨余垃圾机械预处理	好氧生化处理 D
微小食腐动物处理	浙江省绍兴市新昌县餐厨垃圾微小食腐动物处理	微小食腐动物处理 A
	北京市海淀区西山庭院厨余垃圾处理	微小食腐动物处理 B
阳光房静态堆肥	扬州市泰安镇有机垃圾阳光房堆肥中心	阳光房 A
社区堆肥	陕西省西安市碑林区心晴雅苑社区	社区堆肥 A
	四川省成都市武侯区庆安社区	社区堆肥 B
	四川省德阳绵竹市九龙镇	社区堆肥 C
	四川省成都市郫都区安宁村	社区堆肥 D
	浙江省杭州市余杭区良渚村	社区堆肥 E
填埋处置	山西省运城市生活垃圾填埋场	填埋处置 A
焚烧处理	南京市江南环保产业园生活垃圾焚烧发电厂	焚烧处理 A