



厨余垃圾全生命周期 低碳管理综述

作者

刘文杰 刘华

评审专家

温宗国 | 清华大学环境学院

周传斌 | 中国科学院生态环境研究中心

毛 达 | 深圳市零废弃环保公益事业发展中心

致谢

感谢实习生任翔宇全程参与报告研究和撰写，并为报告做了大量数据收集、分析和研究支持工作；

感谢宋国君、方丹阳、彭媛提供调研、内容等相关支持；

感谢张文文提供部分政策分析研究支持；

感谢倪垚、保航、邓婷婷、康琳、朱若云为报告提出宝贵的建议；

感谢田梦提供传播支持。

传播

李小溪

2021 年 7 月



厨余垃圾全生命周期 低碳管理综述

目录

执行摘要	02
术语表	03
一、背景	04
二、厨余垃圾管理和政策	07
1. 联合国 2030 可持续发展目标和食物浪费	08
2. 国际管理和政策经验	09
2.1. 欧盟：食物浪费管理法律体系	09
2.2. 美国：食物废弃物管理层级	10
2.3. 韩国：厨余垃圾计量收费制度	11
2.4. 日本：食品行业减量管理和社会参与	12
3. 中国生活垃圾和厨余垃圾管理政策	13
三、厨余垃圾全生命周期低碳管理	15
1. 厨余垃圾的生命周期评价	16
2. 厨余垃圾处理处理的温室气体排放分析	18
2.1. 源头减量和分类	19
2.2. 收集运输	19
2.3. 填埋	20
2.4. 焚烧	21
2.5. 好氧堆肥	22
2.6. 厌氧消化	23
2.7. 昆虫等生物转化	23
3. 不同处理方式温室气体排放比较	24
四、政策建议	26
附录	28
1. 中国垃圾分类、厨余垃圾管理相关政策	29
2. 研究文献列表	33
3. 垃圾处理工艺案例列表	35
参考文献	36

执行摘要

食物损失与浪费及如何妥善处理厨余垃圾是当今世界面临的共同挑战。联合国预计全世界每年有三分之一的食物被浪费，其重量相当于 13 亿吨、其价值约 1 万亿美元（UN, 2013）。联合国环境署（UNEP）2021 年食物浪费指数报告预计中国家庭食物浪费量每年高达 9164.62 万吨，预防食物浪费也成为疫情后经济复苏策略的一大关键领域（UNEP&WRAP, 2021）。

食物浪费不仅威胁粮食安全，导致资源浪费，日益增长的厨余垃圾也为生态环境带来巨大压力。全球 8-10% 的温室气体排放与各环节的食物浪费息息相关（UNEP, 2021），世界粮农组织（FAO）估算全球每年因食物浪费和处理产生二氧化碳当量温室气体排放达 35 亿吨。据估算，中国每年因食物浪费产生的温室气体排放量约为 11 亿吨，造成的经济损失约为 457 亿人民币。

厨余垃圾从产生到最终处置，在其生命周期不同环节上对空气、水、土壤等产生了不同程度的环境影响。现行的厨余垃圾处理方式仍存在多种环境和健康风险：垃圾填埋场存在恶臭气味、渗滤液污染土壤和地下水问题，垃圾焚烧厂存在二噁英排放、空气污染、重金属污染、飞灰等问题。此外，在中国 2030 碳达峰、2060 碳中和的“双碳”目标要求下，废弃物领域减排也是其中重要一环。如何对以厨余垃圾为代表的食物废弃物进行安全、高效、低碳、可持续的全生命周期管理成为政策制定者和学术界的关注重点。

全球许多国家和地区对此进行了多种探索。欧盟不断完善食物浪费管理法律体系，美国制定了专门的食物废弃物管理层级，韩国通过推行厨余垃圾计量收费制度实现减量，日本对食品行业的不同环节制定了严格管控目标，中国也于 2021 年颁布出台了《反食品浪费法》。这些探索为食物体系及其废弃物的管理提

供了重要的管理思路和政策经验，但是能否有效遏制食物浪费，全面提升食物废弃物和厨余垃圾处理的经济效益、社会效益和环境效益仍待检验。生命周期评价（Life Cycle Assessment，即 LCA）作为一种环境管理工具，被认为是 21 世纪最具生命力的环境管理方法。近年来，全球许多地区和城市层面的生活垃圾管理案例研究不断涌现，LCA 与低碳垃圾处理模式的结合应用也得到越来越多关注。

本报告在结合当前世界和中国食物废弃物和厨余垃圾管理的基础上，通过案例和政策研究，总结分析了国外在管理创新上值得借鉴的宝贵经验。同时，报告对应用 LCA 评估厨余垃圾（或生活垃圾）环境影响的研究进行了系统化文献研究，聚焦厨余垃圾全生命周期温室气体排放情况，对垃圾减量分类环节、收集运输环节，以及填埋、焚烧、好氧堆肥、厌氧消化等不同处理方式的相关数据和研究结论进行了分析。最后，报告提出了优化食物废弃物和厨余垃圾温室气体减排和低碳管理模式的政策建议。报告的主要发现有：

- 厨余垃圾处理最有利于温室气体减排、提升环境效益的操作顺序为减少前端食物浪费和厨余垃圾，同时进行垃圾分类和资源化利用，以此获得的环境效益远高于选择恰当的后端处理方式。
- 基于温室气体减排的考量，厨余垃圾处理方式的优先级为“厌氧消化 > 好氧堆肥 > 焚烧 > 填埋”，具体处理模式设计应参照此减排优先级进行优化。
- 考察不同厨余垃圾处理模式的能源资源消耗情况时，需全面分析能源、资源投入情况和能量回收情况，特别需要考虑能量回收效率，避免低能源转化效率的焚烧发电。
- 实现垃圾资源化，特别是沼气、生物柴油、生物乙醇等能源产物的应用，可以在一定程度上实现节能减排。

除了后端处理部门，食物损失与浪费和厨余垃圾管理还涉及农业、食品加工与制造业、交通运输、电力系统等多个部门，从全生命周期和循环经济视角看，其能源消耗和温室气体排放不容忽视。许多国家的经验表明，废弃物领域是继能源领域之后的重点减排领域，减少废弃物处理的温室气体排放量是实现国家减排目标的有效途径之一。为了优化厨余垃圾管理、与“双碳”目标实现协同，希望有关部门能综合考虑以下建议：

- 建立针对食物浪费和厨余垃圾管理的专题数据库，开展以数据为基础的厨余垃圾管理和政策、项目评估工作。
- 设立国家层面的食物浪费减量目标，确立部门分工和具体任务，制定相应的量化目标和措施。

- 提升“资源化利用”在食物管理层级上的优先级，强调食物捐赠、饲料化、肥料化和不同优先层级工业用途的开发使用，避免低能效的焚烧发电。
- 使用全生命周期评估全面考察不同厨余垃圾处理模式和处理工艺的环境影响，按照“厌氧消化 > 好氧堆肥 > 焚烧 > 填埋”的梯次选择和优化处理模式，发挥多种技术耦合协同作用。
- 通过多种财政政策手段激励前端垃圾减量、垃圾分类和资源化利用。
- 未来的政策研究还应向其它环境影响及货币化核算、食物行业产业进行延伸，推动全产业链条全生命周期的低碳管理，走向“循环经济”。

术语表

- **餐饮垃圾：**根据《餐厨垃圾处理技术规范》（CJJ 184-2012），餐饮垃圾（restaurant food waste）指餐馆、饭店、单位食堂等的饮食剩余物以及后厨的果蔬、肉食、油脂、面点等的加工过程废弃物，也称为餐厨垃圾。
- **厨余垃圾：**根据《餐厨垃圾处理技术规范》（CJJ 184-2012），厨余垃圾（food waste from household）指家庭日常生活中丢弃的果蔬及食物下脚料、剩菜剩饭、瓜果皮等易腐有机垃圾。2019 年，《生活垃圾分类标准》（GB/T19095-2019）将家庭厨余垃圾、餐厨垃圾和其他垃圾统一归为厨余垃圾（或湿垃圾）。
- **食物废弃物：**不同国际组织、政府或研究机构对于食物废弃物有各自的定义和解释。本报告并非针对这一名词定义的研究探索，如无特殊解释，这一名词主要泛指供应链和消费等各个环节产生的食物废弃物。有时也称为食品废弃物。消费环节产生的食物废弃物通常使用厨余垃圾代替。
- **食物损失与浪费：**根据世界粮农组织（FAO）的定义，食物损失与浪费是指“无论由何种原因导致原本供人类食用的粮食在从收获到消费的食品链各环节中出现的量的减少。粮食损失指在食品链消费层面之前各环节中原本供人类食用的粮食无论因何种原因出现的量的减少。粮食浪费指在消费层面无论因何种原因使可供人类食用的粮食被丢弃或任由产品变质。”本报告不强调发生损失或浪费的具体环节，也不针对客观或主观原因产生的浪费进行区别，一般泛指食物在各环节的损耗。如无特殊说明，也简称为食物浪费。
- **SDGs:** Sustainable Development Goals, 联合国可持续发展目标
- **LCA:** Life Cycle Assessment, 生命周期评价
- **GWP:** Global Warming Potential, 全球变暖潜势

一、背景



图片来源: <https://www.pexels.com/photo/photo-of-a-dump-truck-across-buildings-2382894/>

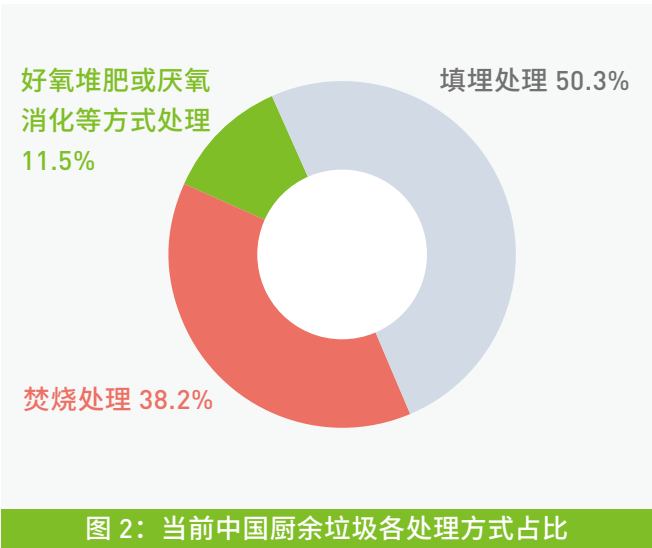
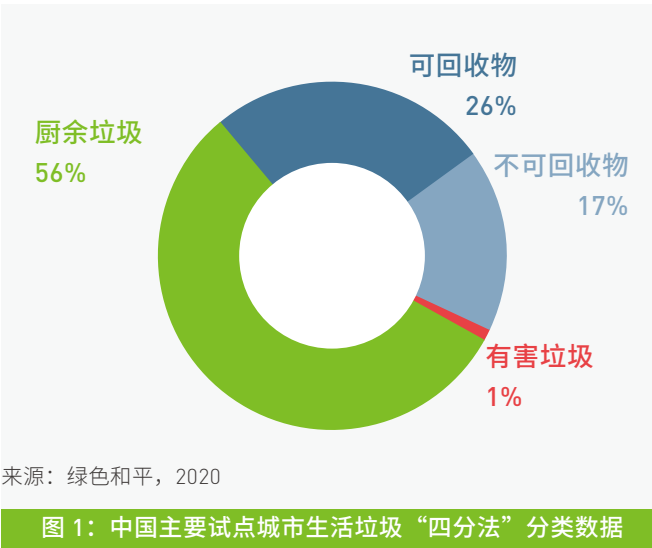
食物损失与浪费及如何妥善处理厨余垃圾是当今世界面临的共同挑战。联合国预计全世界每年有三分之一的食物被浪费，其重量相当于 13 亿吨、其价值约 1 万亿美元（UN, 2013）。联合国环境规划署最新成果《粮食浪费指数报告》显示，食物浪费在全球发达国家和发展中国家普遍存在。2019 年，出售给家庭、零售商、饭店和其他食品服务领域的 9.31 亿吨食物被浪费，大约相当于 2019 年可供消费者食用的食物总量的 17%（UNEP, 2021）。与此同时，2019 年有 6.9 亿人受到饥饿的影响。预计在新冠疫情的影响下，这一数据将被推至新高。到 2050 年，如果世界人口增加到 96 亿，要维持现有生活方式所需的自然资源将相当于 3 个地球资源的总和（UN, n.d）。

食物浪费不仅威胁粮食安全，导致资源浪费，日益增长的厨余垃圾也为生态环境带来巨大压力。根据 UNEP 估算，全球温室气体排放量的 8-10% 与各环节的食物浪费有关（UNEP, 2021）。同时，这些食物损失与浪费还造成了 2500 亿立方米的水资源、大约 30% 农田资源的浪费（FAO, 2013）。FAO 估算全球每年食物浪费和处理产生的 35 亿吨二氧化碳当量温室气

体排放，造成了共计 3940 亿美元的经济损失（FAO, 2014）。

为应对这一共同挑战，联合国可持续发展目标提出，到 2030 年，将零售和消费环节的全球人均粮食浪费减半，减少生产和供应环节的粮食损失，包括收获后的损失（UN, n.d）。多个国家和地区也纷纷采取行动，提出推进废弃物和食物管理的战略、法规和政策。

中国是目前世界上人口最多的国家，也是最大的垃圾产生国。据绿色和平估算，2018 年中国生活垃圾产生总量大约为 5 亿吨，按照厨余垃圾占比 50% 估计，厨余垃圾产生量约达 2.5 亿吨（绿色和平，2020）。体量巨大、含水率高、易于腐烂等特征对厨余垃圾管理和资源化利用带来了巨大挑战。2021 年 UNEP 食物浪费指数报告预计中国家庭食物浪费量每年高达 9164.62 万吨，人均食物浪费量每年 64 千克（McCarthy, 2021）。按照工业化亚洲地区人均食物浪费产生的温室气体排放量为 810 千克二氧化碳（CO₂）计算，中国每年因食物浪费产生的温室气体排放量约为 11 亿吨，造成的经济损失约为 457 亿人民币。



依据中国“十三五”规划，2020 年，焚烧是主要的生活垃圾处理方式，处理能力达到 54%，填埋处理能力大约为 43%，其余 3% 为堆肥等其他处理方式。而中国厨余垃圾处理中，50.3% 依靠填埋处理，38.2% 通过焚烧处理，其余部分通过好氧堆肥或厌氧消化等方式处理。在不包含环境成本的情况下，厨余垃圾焚

烧成本约为 50-100 元 / 吨，填埋约为 80-150 元 / 吨（叶圣豪，2020）。近年来，随着 2023 年基本实现原生生活垃圾“零填埋”目标的落地推广，填埋处理在城市生活垃圾处理结构中占比逐年降低。然而，随着厨余垃圾产生量不断增长，低碳、可持续的垃圾处理方式和处理能力仍存在缺口。

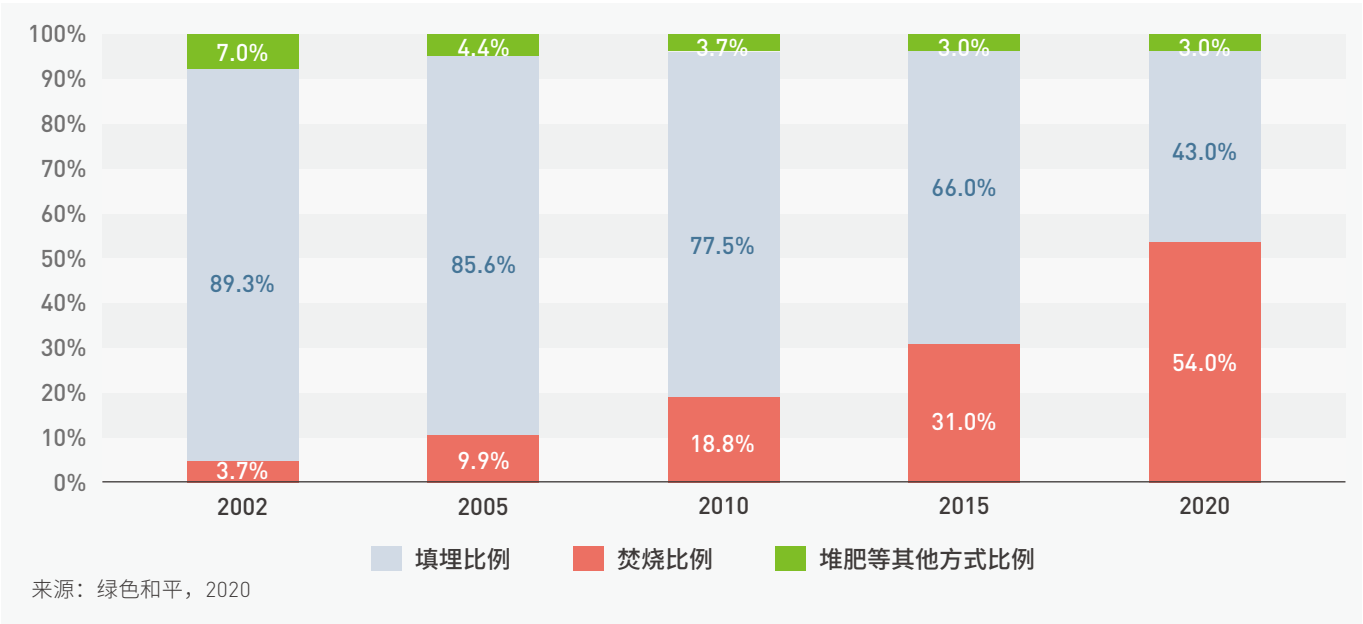


图 3：2002-2020 中国生活垃圾三种主要处理方式的处理能力比例变化

从产生到分类收集再到后端处理，厨余垃圾在其生命周期内对资源能源消耗、环境污染、温室气体排放等方面产生了不可忽视的影响和高昂的社会成本。隐性的环境成本因难以衡量而常常被忽视，未计入厨余垃圾管理的社会总成本中，也未真正落实“污染者付费原则”，实现厨余垃圾全生命周期的低碳管理还有很长的路要走。

本报告在结合当前世界和中国食物废弃物和厨余垃圾管理的基础上，通过案例和政策研究，总结了世界上一些国家和地区在管理创新上值得借

鉴的宝贵经验。同时，报告也对应用 LCA 评估厨余垃圾（或生活垃圾）环境影响的研究进行了系统化文献研究，聚焦了厨余垃圾全生命周期温室气体排放情况，对垃圾减量分类环节、收集运输环节，以及填埋、焚烧、好氧堆肥、厌氧消化等不同处理方式的相关数据和研究结论进行了分析，以为优化食物废弃物和厨余垃圾管理模式、提升厨余垃圾温室气体减排和低碳管理工作提供决策参考。未进行特定说明时，本报告将非家庭源的餐厨垃圾和家庭源的厨余垃圾统称为厨余垃圾。

二、厨余垃圾管理和政策

1. 联合国 2030 可持续发展目标和食物浪费

联合国于 2015 年正式提出可持续发展目标（Sustainable Development Goals，简称 SDGs），共分为 17 个目标和 169 项具体指标。可持续发展目标呼吁全世界共同采取行动，消除贫困，保护地球，改善所有人的生活和未来。

其中，SDGs 中若干目标都与食物浪费、废弃物管理、可持续生产和消费有着直接或间接的关系，具体包括针对降低食物损失与浪费的 SDG12.3、针对饥饿问题的 SDG2.1、废弃物导致水质污染的 SDG6.3、可持续城市的废弃物问题 SDG11.6，以及气候行动等等。

联合国粮农组织（FAO）作为有关减少粮食损失与浪费的全球性举措、活动和项目的主要协调方，与联合国机构、其他国际组织、私营部门以及公民社会进行合作。FAO 基于有限的现有数据对全世界主要区域

的粮食损失进行了估算。根据《2020 年粮食及农业相关可持续发展目标指标进展关于粮农组织所监管指标的报告》，食品在供应链上损失的比例高出可接受范围，每年损失的金额超过 4000 亿美元，这一数额甚至超过新冠疫情后一些国家和地区的经济刺激计划金额（FAO, 2020）。

联合国环境规划署（UNEP）于 2021 年 3 月发布了最新成果《粮食浪费指数报告》，研究了零售店、饭店和家庭发生的食物浪费问题。结果显示，消费者需要获得相关指导和帮助来减少家庭环节的食物浪费。各国可以通过将食物浪费纳入《巴黎协定》的国家自主贡献目标来提振气候雄心，同时加强粮食安全并削减家庭成本（UNEP, 2021）。基于此，预防食物浪费也成为疫情后经济复苏策略的一大关键领域（UNEP&WRAP, 2021）。



图片来源：<https://www.pexels.com/photo/person-standing-holding-recycling-6994745/>

2. 国际管理和政策经验

2.1 欧盟：食物浪费管理法律体系

欧盟每年大约产生 8800 万吨食物废弃物，造成高达 1430 亿欧元的经济损失。如果欧盟能解决这一问题，除了助力实现可持续发展目标，还将降低大约 8% 的碳排放、解决欧盟大约 3300 万人的食物问题（European Commission, n.d; Stenmarck 等, 2016）。

2013 年，法国农业、食品工业、林业部颁布了一项“针对食物浪费的国家公约”（the National Pact against Food Waste），希望到 2025 年降低法国一半的食物浪费（Horning, 2014），成为欧盟率先推动解决食物浪费问题的国家之一。2016 年 2 月，法国颁布实施《反食品浪费法》，禁止超市丢弃仍可食用的食物，要求通过捐赠方式分发给需要的人。法国因此成为世界上第一个专门立法应对食物浪费问题的国家。意大利也在 2016 年出台了《反食品浪费法》，希望降低五分之一，大约 1 百万吨的食物浪费量。法律同时还规

定可以通过减税等经济激励手段来促进商家捐赠食物等，来降低食物浪费的行为（Matamoros, 2019）。

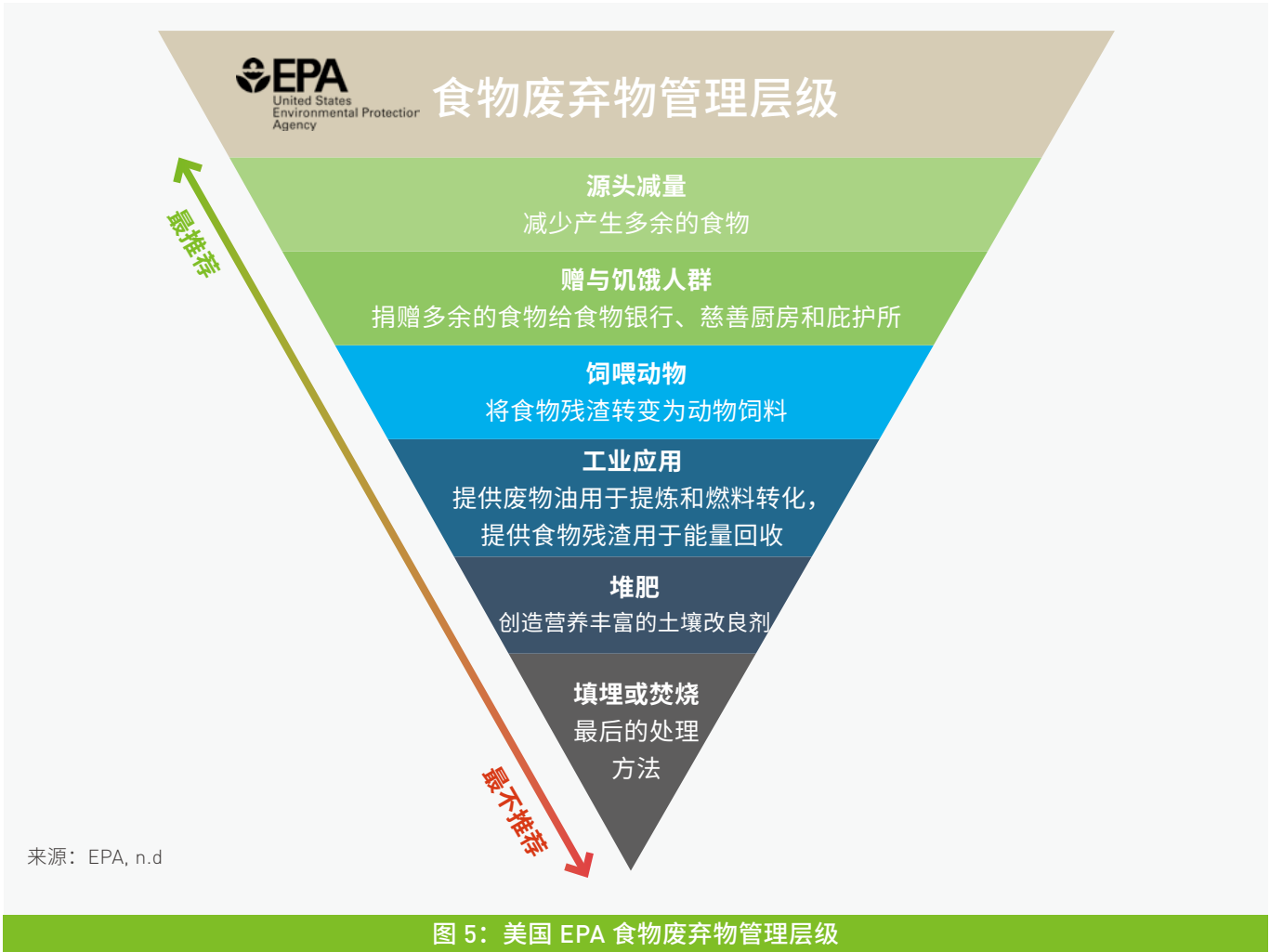
2020 年 3 月，欧盟提出新的循环经济计划（European Commission, n.d）。2020 年 5 月，“从农田到餐桌”（From Farm to Fork）策略出台，旨在通过建立一套可持续的食物体系，降低食物浪费来助力“欧洲绿色协议”战略的实现（European Commission, 2019）。从生产和加工食品者（例如，农民、食品制造商和加工商），到提供食品消费（例如，餐饮服务、零售商），以及最终的消费者本身，食物链条中的所有人都可以在预防和减少食物浪费方面发挥作用（European Commission, n.d）。从“农田到餐桌”明确了整个链条中各个环节的重点工作，该计划还明确提出“到 2030 年，零售和消费者的人均食物浪费将减半”的目标（European Commission, 2020）。这将大大降低食物浪费在收集、运输、处理阶段造成的环境影响和社会成本压力。



2.2 美国：食物废弃物管理层级

食物废弃物是美国仅次于废纸的第二大生活垃圾来源，约占生活垃圾总量的 21.6%。依据 1960-2018 年的统计数据，厨余垃圾的产生量呈现持续上涨的趋势。2018 年，美国国家环境保护局（EPA）改进了食物废弃物的测算方法，以便更加全面的测算食物浪费的情况，结果显示，美国全年浪费的食物总量高达 5727 万吨（EPA, 2018）。

针对这一问题，EPA 强调食物的可持续管理，即包括从自然资源获取，到食物的生产销售与消费以及最终处理的全周期管理。据此，EPA 针对食物浪费问题提出了食物废弃物管理层级（Food Recovery Hierarchy）（EPA, n.d），通过不同优先等级的管理策略降低食物浪费和相应的环境、资源问题。



食物废弃物管理层级（Food Recovery Hierarchy）给出了个人和组织对于防止食物浪费和提高利用率的优先序，分为 6 个层次：源头减量、赠与饥饿人群、饲喂动物、工业应用、堆肥、焚烧或填埋。

源头减量是最优先推荐考虑的方式。EPA 认为美国企业和个人都可以采取多种方式避免食物的浪费，具体的预防浪费的建议包括对食物订单进行审核，提升顾客满意度，使用更好的食物储存技术，创新食谱，减少装饰用品等。

收集可以食用的食物赠与有需要的人属于第二层级。食品制造企业、批发商、经销商、农民和消费者都可以捐赠食物。捐赠的食物通常会集中到“食物银行”（Food Bank），随后“食物银行”或者直接发放食品，或者作为中间环节向其他食品制作组织提供材料。美国“食物银行”主要扮演两种角色，一种是作为慈善机构经营，防止可能发生的食物浪费现象，组织企业和居民资源性地捐助食品。另一种是以工会的模式运行，注重提供食品的手段，同时提供一些就业岗位。

第三层级是捐赠可能会被浪费或废弃但仍对动物安全的食物给农民和养殖企业，用以喂养动物。EPA指定了专门的行动指南，旨在让残食食物的生产者和禽畜养殖户了解如何将这些食物喂给动物。虽然为了避免风险，联邦颁布法案限制了一些饲喂动物的行为，但越来越多的农民、食品企业和消费者意识到并关注与食物浪费相关的环境和经济问题，尝试探索这一方式的可能性。

第四层级是指将食物废弃物用于工业，主要包括厌氧发酵（厌氧消化）制沼气、油脂相关行业两个方向，油脂相关行业主要指油脂提炼和生物柴油制作两个部分。从中提取的沼气、油脂或制成的生物柴油，都是尽可能最大化利用食物废弃物中的有价值成分。

第五层级是堆肥处理。上述行动中都无法回收利用的食物废弃物，将采取堆肥的形式滋养土壤。在美国，可以以家庭为单位在庭院内搭建简易的堆肥设施，也可以由相关组织或企业收集原料集中堆肥。联邦《清洁水法》（CWA）与《雨水管理实践》（BMP）对堆肥产生的污染和堆肥产品标准都给出相应的要求。

第六层级只针对于无法进行任何回收利用的情况，通过填埋或者焚烧处理。

美国在城市固体废物管理中还充分发挥许可、税收、抵押等经济手段的作用。例如，美国很多地方实行PAYT（Pay-As-You-Throw）制度，对居民征收固体废物收集费，促进城市固体废物产生者承担其对社会上的责任；美国印第安纳州、新泽西州等对需要填埋的城市固体废物征收填埋费/税，倒逼城市固体废物的源头减量和综合利用（李金惠等，2017）。据统计，

PAYT 政策实现了 44% 的固体废弃物减量，成为最有效的减量手段（payasyouthrow, n.d）。

2.3 韩国：厨余垃圾计量收费制度

基于垃圾增长带来的处理能力和环境保护的压力，韩国在上世纪 90 年代前后开始寻找解决方案，并开始推进垃圾分类工作，“计量收费”体系（Volume-Based Waste Fee system, VBWF）的研究工作也在同期展开。韩国于 1993 年开始进行了针对各界人士长达半年的意见搜集工作，制定了试点方案。1994 年 4 月，试点工作在首尔的中区、城北区和松坡区展开。通过这些试点和试点结果的评估，1995 年 1 月 1 日，VBWF 体系在韩国全国范围强制执行（Kim, 2003）。

虽然在政策执行初期遇到了一些挑战，例如很多可回收物没有分类回收，一些需要付费回收的大件垃圾在政策强制之前被丢弃，不过这一政策的执行很快就开始步入正轨。一项调查结果显示，在实施后的一个月人们几乎完全适应了这一制度，98.6% 的受访者表示他们对这个系统感到满意（Kim, 2019）。1995 年 4 月，也就是政策执行后的 100 天，韩国对这项工作进行了评估，结果显示，废弃物的产生量降低了 37%（从 53,546 吨 / 天降低到 33,841 吨 / 天）（Kim, 2019）。评估工作也提出了一系列的改进建议，包括垃圾袋的强度、物品可回收的标识、禁止过度包装一次性产品、回收网络的建立和扩大、垃圾袋的价格等等（K.-Y. Yu, 2017）。

为了鼓励公众将可回收物分类回收，原则上 VBWF 体系不对可回收的废弃物收费。但是对于大型可回收废弃物会依据废弃物的种类进行收费。同时，对违规投放垃圾的行为苛以重罚（最高可达 1 百万韩币，约 5800 人民币）（Kim, 2003）。VBWF 体系最初并没有要求将食物废弃物单独分类投放，但由于这些废弃物混合在其他垃圾中进行填埋和焚烧处理带来了渗滤液问题和降低燃烧效率的问题，1997 年，韩国开始从餐饮消费等一些大量产生食物废弃物的环节强制推动食物废弃物的分类投放。随后，将这项要求推行到其他场所和家庭（Kim, 2003）。

2010 年，韩国环境部门尝试推进“针对食物废弃物的计量收费”系统（“Volume-Based Food Waste Fee System”）。在金泉市的试点结果显示，该市 2012 年的食物废弃物产生量相较于试点前的 2010 年降低了 54%。基于这些试点项目的结果，韩国于 2013 年在全国范围内推进了这一食物废弃物计量收费系统。考虑到各地的实际情况差异，这一计量收费系统在执行层面可以通过购买收费垃圾袋、购买贴纸或使用 RFID（Radio Frequency Identification，“射频识别”无线通信技术）计量等方式来实现（Cho 等，2017；Ministry of Environment, 2012）。通过针对食物废弃物的计量收费系统的推进，食物废弃物的减量和回收率的效果得以改善，家庭厨余量降低了 30%、餐厅厨余量降低 40%，食物废弃物的回收率接近 100%（Hogan, 2015）。

韩国通过将垃圾投放量与收费挂钩的 VBWF 制度，推动了全国范围的生活垃圾分类和减量，除了直接降低废弃物带来的环境污染的压力，还减少了处理这些垃圾的成本，同时，由于资源得以循环利用，资源回收价值也得以体现。根据韩国环境研究所（KEI）的数据，到 2013 年，VBWF 产生的经济价值达到了约 124 亿元人民币（Ministry of Environment, 2012）。

2.4 日本：食品行业减量管理和社会参与

作为一个粮食自给率较低、高消费的国家，日本每年产生大量的食物废弃物。为治理这一问题，日本在强化食物生产链条废弃量管控和促进社会力量参与两方面展开了管理和引导工作，值得参考借鉴。

2000 年，日本出台了“促进食品循环资源再生利用的法律”（简称《食品回收法》）。该法遵循 3R（源头减量 Reduce，重复使用 Reuse，妥善回收 Recycle）原则，旨在降低食物废弃物的产生、提高食物废弃物再利用为饲料、肥料等。为了贯彻落实这一法律，日本财务省、厚生劳动省、农林水产省、经济产业省、

国土交通省和环境省联合发布《食品循环资源再生利用促进基本方针》，针对食品加工制造业、食品批发业、食品零售业、餐饮企业 4 个食品行业的再生利用目标进行了量化规定：到 2024 年，食品加工制造业再生利用率达到 95%、食品批发业达到 75%，食品零售业达到 60%，餐饮企业达到 50%（日本农林水产省、环境省等，2019）。同时，方针还强制要求年产生量达到 100 吨食物废弃物的单位要上报产生量情况和处理情况。另外，日本还通过一个称为“食物回收循环”（Food Recycling Loop）的体系，建立食物废弃物产生单位、回收利用单位以及饲料、肥料使用单位的闭环系统，推动食物废弃物的饲料化或肥料化再利用（日本农林水产省，2017）。

另一方面，作为社会治理的组成部分，“食物银行”这类社会组织对食品的接收和再分配发挥了重要作用，日本政府也对“食物银行”进行了必要的管理和引导工作（日本农林水产省，2017）。日本政府通过制定提供、捐赠、接收食品的规则，对食品提供方和接收方的卫生、食品安全、信息登记等进行管理。截止到 2019 年，日本有 105 家“食物银行”组织（日本农林水产省，2017）。在新冠疫情期间，日本农林水产省还出台了特别的财政补助来支撑“食物银行”工作，包括对运输车辆、仓库以及一些必要设备的费用支持。这些工作既保障了食品的质量和可追溯性，又协助了“食物银行”的良性、有序发展。

另外，“食物不浪费”项目（No-Foodloss Project）通过覆盖全食品链条的工作和活动，将食物浪费各个环节的利益相关方联系起来，通过宣传教育日本对待食物的传统精神、支持“食物银行”的活动、“没有剩食”的号召、餐饮饭菜份量的改变，消费者正确的理解过期标志等等工作，推动了整个链条上的食物资源高效利用（日本农林水产省，2017）。2019 年，针对食品链条的食物损失与浪费设定了 2030 年目标：以 2000 年总量 5.47 百万吨作为基数减少到 2.73 百万吨，实现 50% 的降低（Ministry of Agriculture Forestry and Fisheries, 2019）。

3. 中国生活垃圾和厨余垃圾管理政策

中国生活垃圾处理大致可以划分为简易处理、卫生填埋、焚烧主导三个阶段。在这期间，中国的垃圾管理着眼于末端处置，缺乏对不同处理方式优先等级的划分，也未能搭建有效的生活垃圾前端减量管理措施，大量厨余垃圾等有机质废弃物混入未分类的生活垃圾被填埋和焚烧处理。下文将从餐厨垃圾管理实践、城市生活垃圾分类试点和厨余垃圾处理三方面进行分析和探讨。

与家庭源产生的厨余垃圾相比，针对餐饮场所产生的餐厨垃圾的管理探索相对较早，形成了一定的资源化实践。2005年，上海市出台《上海市餐厨垃圾处理管理办法》，规定了餐厨垃圾这种除居民日常生活以外的食品加工、饮食服务、单位供餐等活动中产生的厨余垃圾和废弃食用油脂的处理要求，并提出收费管理的要求（上海市餐厨垃圾处理管理办法，2005）。随后，北京、西宁、重庆、苏州等多个城市也相继出台针对餐厨垃圾的地方管理办法，尝试对餐饮行业产生的食物废弃物进行规范管理（王小铭等，2019）。

2008年12月，国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部和商务部在浙江宁波共同召开了“全国城市餐厨废弃物资源化利用现场交流暨研讨会”，会议明确了我国餐厨垃圾处理行业面临的问题，中国餐厨垃圾处理正式提上日程（路风辉等，2018）。2010年5月，国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部、环境保护部、农业部公布了《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的通知》，宣布“选择部分设区的城市或直辖市市辖区开展餐厨废弃物资源化利用和无害化处理试点，探索我国餐厨废弃物处理问题的有效解决途径（新华社，2010）”，正式拉开了餐厨垃圾资源化利用和无害化处理城市试点工作序幕。7月，国务院办公厅出台《国务院办公厅关于加强地沟油整治和餐厨废弃物管理的意见》，探索餐厨垃圾资源化利用及相应处理工艺和管理模式（陈冠益等，2018），严厉打击非法销售地沟油行为，并严防地沟油流入食品生产经营单位。2011年5月，国家发展和改革委员会等部门发布《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》，通过餐厨垃圾资源化利用等工作推动实现“循环经济”。

这些政策法规的出台，体现了“十二五”前后餐厨垃圾的问题和资源化利用逐步得到重视，餐厨垃圾处理从试点探索到全面打开。2011年3月，“十二五”规划明确提及餐厨垃圾，提出“推进餐厨废弃物等垃圾资源化利用和无害化处理”的循环经济概念。随后，2012年国务院办公厅印发的《“十二五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》将推进餐厨垃圾分类处理列为“十二五”期间生活垃圾设施建设的主要任务，提出针对餐厨垃圾的分类收集等要求，体现了资源化利用的管理思路（国务院办公厅关于印发“十二五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划的通知，2012）。2012年7月，发布《循环经济发展专项资金管理暂行办法》，确定餐厨废弃物资源化利用和无害化处理为资金支持范围，并确定其支付方式和监督管理办法。2013年1月，《国务院关于印发循环经济发展战略及近期行动计划的通知》，提出要“推进餐厨废弃物资源化利用，建立餐厨废弃物资源化利用体系，强化餐厨废弃物管理”。2013年，国家发展和改革委员会起草《餐厨废弃物管理及资源化利用条例》，尝试解决台账制度不完善、收费制度、信息公开规定缺失、法律责任不合理等问题（陈丽萍，2013）。

进入“十三五”阶段，“循环经济”理念在餐厨垃圾管理中得以巩固。2016年3月《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》，要求“大力发展循环经济”“加快建设城市餐厨废弃物等资源化利用和无害化处理系统”（中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要，2016）。2016年12月，《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》明确提出“推进餐厨垃圾资源化利用与无害化处理”，“厨余等易腐垃圾宜采用生物处理技术”。2017年5月，《循环发展引领行动》亦明确提出“十三五”时期餐厨废弃物资源化处理的指标和目标，要求到2020年，城市餐厨废弃物资源化处理率从2015年的10%提高到20%。

虽然对非家庭源的餐饮单位等场所产生的餐厨垃圾的管理日渐规范，但是来自于家庭源的厨余垃圾却相对处于管理的“薄弱领域”。生活源厨余垃圾没有进行有效的分类、收集、运输和处理，通常混合在生活垃圾中被填埋或焚烧处理。2016年底，中国开始自上而下推动城市生活垃圾分类工作。2017年12月，住房和城乡建设部发布《关于加快推进部分重点城市生活垃圾分类工作的通知》，要求“2018年3月底前，46个重点城市出台生活垃圾分类管理实施方案或行动计划；2020年底，46个重点城市基本建成生活垃圾分类处理系统，基本形成相应的法律法规和标准体系，形成一批可复制、可推广的模式”。2019年7月，《上海市生活垃圾管理条例》正式实施，随后其他城市的生活垃圾分类工作也陆续落地、实施。随着这些城市相关工作的展开，生活垃圾和厨余垃圾粗放管理的状况在一些地方得以一定程度的改善。2018年7月，国家发展和改革委员会发布《关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见》，提出对具备条件的居民用户，实行计量收费和差别化收费，进一步完善激励机制。根据公开信息显示，截止到2021年6月，46个试点城市中，21个城市出台了地方性法规，如上海市、北京市、广州市、深圳市生活垃圾管理条例；24个城市出台了政府规章，如厦门市、重庆市、昆明市、武汉市生活垃圾分类管理办法，另有1个城市出台了工作实施方案。46个城市都明确规定或在一些场景下规定厨余垃圾需要单独分类、收集、处理，形成针对厨余垃圾管理的普遍共识。

随着最新一轮生活垃圾分类工作的开展和推动，作为生活垃圾中的重要组成部分，来自家庭源的厨余垃圾的管理也有了一些变化，同时凸显出一些问题和挑战。2017年3月，国务院办公厅《生活垃圾分类制度实施方案》提出“引导居民将‘湿垃圾’（滤出水分后的厨余垃圾）与‘干垃圾’分类收集、分类投放。”，明确了厨余垃圾应该得到分类收集和处理。随着城市生活垃圾分类工作的陆续展开，各地试点城市家庭源厨余垃圾确实得到一定程度的分类、收集、处理。但分类出来的厨余垃圾又暴露了长期以来厨余垃圾管理体系建设不足的问题。厨余垃圾配套处理设施能力不足，无法实现分类处理的效果。2020年7月，国家发

展和改革委员会、住房和城乡建设部和生态环境部联合印发《城镇生活垃圾分类和处理设施补短板强弱项实施方案》，要求“因地制宜推进厨余垃圾处理设施建设”，明确提出稳步推进厨余垃圾处理设施建设。但“对于尚未出台垃圾分类法规的地区以及厨余垃圾资源化产品缺乏消纳途径的地区”，“厨余垃圾可纳入现有焚烧设施统筹处理”，这又显示出推动生活垃圾以及厨余垃圾处理工作的难度和反复。2020年11月，住房和城乡建设部等十二个部门联合印发《关于进一步推进生活垃圾分类工作的若干意见》，希望“力争再用5年左右时间，基本建立配套完善的生活垃圾分类法律法规制度体系；地级及以上城市因地制宜基本建立生活垃圾分类投放、分类收集、分类运输、分类处理系统，居民普遍形成生活垃圾分类习惯；全国城市生活垃圾回收利用率达到35%以上。”。住房和城乡建设部等部门牵头“推进分类投放收集系统建设”，“实现厨余垃圾、其他垃圾有效分开”，补齐厨余处理设施短板，探索适合的厨余垃圾处理技术路线，因地制宜选用处理工艺，以便加强科学管理。

进入“十四五”阶段，生活垃圾以及厨余垃圾管理政策相应出台。2021年5月，《十四五城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》明确指出“厨余垃圾分类和处理渠道不畅”是现在存在的主要问题之一。针对这一问题，该发展规划提出“有序开展厨余垃圾处理设施建设”的主要任务。如何能科学、高效、低碳、可持续地处理厨余垃圾，完善厨余垃圾管理政策，成为“十四五”阶段需要探索和落地的课题。农业农村部2021年5月批准发布的《有机堆肥》（NY/T 525-2021）标准第4.1条提出“经分类陈化后的厨余废弃物”可以不再被禁止进行有机堆肥。为改善厨余垃圾堆肥产物出路问题提供了一个新的可能。2021年7月，国家发展和改革委员会出台《十四五循环经济发展规划》，将“推进厨余垃圾、园林废弃物、污水厂污泥等低值有机废物的统筹协同处置”列为重点任务之一，将“厨余垃圾等城市废弃物分类利用和集中处置”列为十四五循环经济发展的重点工程与行动之一。为进一步推进科学、合理、低碳管理厨余垃圾提供了重要的政策支撑。

三、厨余垃圾全生命周期 低碳管理

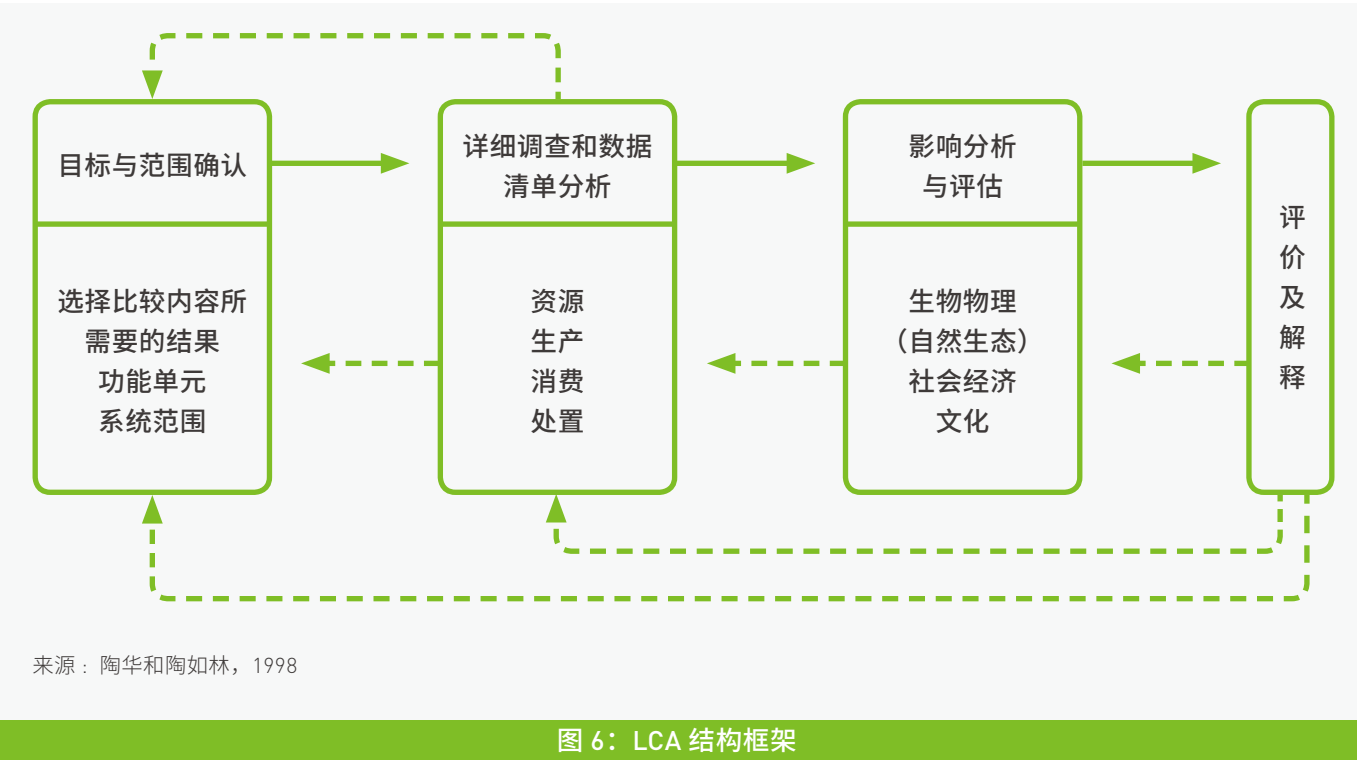
1. 厨余垃圾生命周期评价

厨余垃圾在收集运输和后端处理等各个环节会产生直接或间接的环境影响，不仅包括在其生命周期内的资源、能源消耗，也包括各类污染物和温室气体排放。

目前，计算垃圾处理成本主要考量不同工艺的经济成本，少有将环境成本纳入其中。随着垃圾管理升级和公众环保意识提升，将环境成本计入垃圾管理的社会总成本，正得到政策制定者和学术界越来越多的关注，将为改善现行垃圾处理模式、促进垃圾管理更加低碳、高效提供必要的参考。

关于垃圾的低碳处理模式，目前国内外已经有越来越多的研究和论述。综合这些论述，垃圾低碳处理模式共有三大特征：一是投入的资源、能源得到高效利用，二是处理过程中温室气体排放降低，三是垃圾资源化率得以提高（周晓萃等，2012）。

对垃圾处理进行环境影响评估是实现低碳处理的基本前提。在众多评估方法中，生命周期评价（Life Cycle Assessment, 即 LCA）作为一种环境管理工具，可以对某种产品或某项活动从原料开采、加工到最终处置开展从“摇篮到坟墓”式的全生命周期评估。LCA 由目标与范围确定（Goal and Scope Definition）、详细调查和数据清单分析（Inventory Analysis）、影响分析与评估（Impact Assessment）、评价及解释（Interpretation）四部分组成，它既可以用于企业产品开发与设计，又可以有效地支持政府环境管理部门决策，被认为是 21 世纪最具生命力的环境管理方法（杨帆，2014）。



欧盟、美国等国家和地区推动废弃物管理的 LCA 研究较早，并将研究结果应用于国家政策制定方面。欧盟于 2008 年修订《废弃物框架指令》（Directive 2008/98/EC），进一步强调废物减量化和增值化，并在技术报告中将生命周期思想（Life Cycle Thinking）和 LCA 作为执行《废弃物框架指令》的工具（EU, 2012）。美国《资源保护与回收法》将废物管理的重点由末端治理前移到源头管理，并将 LCA 作为对比不同管理策略下温室气体排放的工具（EPAUS, 2006）。此外，全球许多地区和城市层面的生活垃圾管理 LCA 案例研究不断涌现（赵薇等，2017）。

LCA 可以量化从厨余垃圾产生到收集运输再到后端处理的环境影响，根据整个生命周期阶段中能量和物质的消耗以及环境释放，评价其对全球变暖潜势（Global Warming Potential, 以下简称 GWP）、酸化、富营养化、光化学臭氧合成、生态毒性等多种类型的环境影响。近年来，全生命周期评价方法也越来越多应用到中国生活垃圾的管理和研究当中。徐成等（1999）在我国率先开展了城市生活垃圾管理系统的清单分析、影响评价和改善评价的研究，并以四川广汉市为例进行研究，指出综合处理模式优于单一处理模式。随后，苏州（韦保仁等，2009）、大连（李雯婧等，2009）、北京（Zhao 等，2011）、杭州（Dong 等，2013）等城市开展了相关研究。由于中国本地化生命周期清单指标体系尚未健全，国内研究多采用国外的标准化因子和权重因子对不同环境影响进行综合评价，此外，在生命周期评价模型和评价指标选择方面还存在分歧（赵薇等，2017）。

本报告以“全生命周期评价”和“厨余垃圾 / 易腐垃圾”为关键词，对应用 LCA 评估厨余垃圾（或生活垃圾）环境影响的研究进行了系统化文献研究。报告聚焦厨余垃圾全生命周期温室气体排放，对相关数据和研究结论进行了分析。本报告研究关注的温室气体排放源主要包括厨余垃圾减量和分类产生的减排效益、运输阶段的温室气体排放、垃圾填埋产生的温室气体、焚烧产生的温室气体排放及发电带来的减排效益、厌氧消化和好氧堆肥产生的温室气体以及再生资源回收带来的减排效益。研究样本文献获取方法如下：

文献数据库：Scopus, Sciencedirect, Google Scholar, 中国知网

英文搜索关键词：LCA, Food Waste

中文搜索关键词：全生命周期评价，厨余 / 易腐垃圾

选择标准：

- 1) 使用 LCA 研究方法；
- 2) 关注中国省、市或更小的地域范围；
- 3) 包括对不同工艺、处理模式的对比

最终确定的研究样本量：30（文献列表见附件二）

2. 厨余垃圾处理的温室气体排放、能源消耗与资源化分析

现阶段中国的厨余垃圾处理还处于建设阶段，各地在尝试不同的、适合推广的厨余垃圾处理工艺和设施，较为常见的工艺是填埋、焚烧、好氧堆肥、厌氧消化和昆虫等生物转化处理等。据统计，2011-2019 年间，中国共建立 155 座厨余垃圾处理厂，其中，119 座以厌氧消化为主，21 座以堆肥为主，8 座以饲料化为主，7 座以焚烧等其它技术为主（郭含文，2021），处理也逐渐由单一模式转向综合处理模式。在未广泛推广厨余垃圾分类、仍然混收混运的地区，厨余垃圾的处理与一般生活垃圾处理方式一致。本报告根据调研信息总结了国内典型垃圾处理企业及工艺案例，详见附件三。

从产生到最终处置，厨余垃圾在生命周期不同环节上对空气、水、土壤等产生了不同程度的环境影响。

以焚烧和填埋为主导的处理方式仍存在多种环境和健康风险：垃圾填埋场存在恶臭气味、渗滤液污染土壤和地下水问题，垃圾焚烧厂也存在二噁英排放、空气污染、重金属污染、飞灰等问题。此外，这两种垃圾处理方式都会排放大量温室气体，加剧气候变化（绿色和平，2020）。好氧堆肥和厌氧消化在环境影响上也各有其优缺点。

为深入探究厨余垃圾全生命周期低碳管理模式，下文将重点分析从厨余垃圾源头减量到末端处置的全生命周期温室气体排放、资源能源消耗和垃圾资源化率的情况。值得注意的是，以下分析主要考察单一处置或综合处置模式下不同环节不同处理方式之间的差异，以期为优化厨余垃圾和生活垃圾低碳管理提供参考。

表 1：不同厨余垃圾处理方式环境影响比较					
比较项	填埋	焚烧	好氧堆肥	厌氧消化	昆虫等生物转化
选址条件	远离市区， 运输距离远	不宜靠近市区， 运输距离较远	避开居民密集区， 运输距离适中	不宜靠近市区， 运输距离较远	不宜靠近市区， 运输距离较远
地表水污染	有	有	可能性较小	可能性较小	可能性较小
地下水污染	有	可能性较小	可能性较小	可能性较小	可能性较小
土壤污染	有	有	有	可能性较小	可能性较小
空气污染	有	有	较小	较小	较小

2.1 源头减量和分类

厨余垃圾进入处理环节之前，需要经过收集、暂存、预处理等环节。目前，使用 LCA 对厨余垃圾源头减量产生环境效益的研究较少，关于分类回收带来的温室气体减排效益相关研究结论主要集中在三方面：一是厨余垃圾、塑料等分离率的提高能有效降低后端处理的温室气体排放。张婷婷（2020）在关于北京市生活垃圾处理策略优化研究中认为，将可回收资源以及厨余垃圾单独收集处理才能实现 2025 年减排目标。在分离厨余垃圾和可回收资源的情况下，减排率高达 72.03%。Yu & Li（2020）认为，家庭源厨余垃圾分离率提高 20%，温室气体排放就会减少 5-7%。虽然家庭源厨余垃圾分类会增加收集运输过程中的能源消耗，但对其全生命周期能源消耗增长贡献很低。二是厨余垃圾、塑料等分离率提高有利于改善垃圾组分和含水率，提高垃圾焚烧效率和垃圾资源化率。周晓强（2013）认为垃圾中塑料、纸类等热值较高，经过分类收集可以掺杂其他原料制成垃圾衍生燃料（RDF），每 1 吨剩余垃圾可产出 0.4-0.6 吨 RDF 成品，用以焚烧发电供热。基于源头分类的生活垃圾综合利用工艺能最大程度利用垃圾中的能量，每吨垃圾可回收能量 1044.2 吉焦，

同时把环境影响降到最小。三是强调垃圾分类储存过程中大量使用垃圾袋产生的环境问题。Blengini（2008a）在对不同食物浪费回收场景的分析中发现，生产收集垃圾所用的塑料袋占据了 55% 的能源消耗。综上，通过垃圾分类进行资源化利用，以此获得的环境效益远高于选择恰当的后端处理方式。

2.2 收集运输

厨余垃圾在交通运输环节产生的温室气体主要为汽车尾气排放中的二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、一氧化二氮（N₂O）等，主要来源为燃油消耗。Bernstad & Jansen（2012）称国外多项研究表明，运输环节在全生命周期环境影响中极为显著（Tyskeng and Finnveden, 2007; Tan and Khoo, 2006）。在山东、香港、兰州、上海、广州、北京等多地开展的其它研究中，考虑到地理位置、运输距离、运载车辆、燃油标准的差异性，温室气体排放计算结果有较大差异，但这些研究结论都共同表明了厨余垃圾在运输阶段产生的温室气体排放不容忽视。

表 2：垃圾收集转运阶段油耗				
阶段	车型	柴油消耗 /L·km ⁻¹	运输距离 /km	单位垃圾油耗 /kg
生活垃圾收集	载重 2t 的轻型卡车	0.18	22	1.70
生活垃圾转运	载重 15t 的重型卡车	0.18	20	0.21
厨余垃圾运输	载重 7t 的餐厨垃圾车	0.25	21	0.65

来源：操家顺等，2019

2.3 填埋

垃圾填埋指采取防渗、铺平、压实、覆盖等方式对城市生活垃圾进行填埋处理的垃圾处理方法。在厨余垃圾未进行分类的地区，绝大多数厨余垃圾都与生活垃圾一起进入填埋场或焚烧厂。由于填埋产生的渗滤液处理难度大以及城市发展带来的土地资源紧缺，

越来越多的国家开始禁止厨余垃圾进入填埋场处理。填埋产生的温室气体主要为甲烷，IPCC《国家温室气体清单》中给出了一阶衰减模型和质量平衡方法两种生活垃圾填埋产生甲烷的核算方法。Adhikari 等（2006）估算填埋 1 吨食物废弃物将会产生约 125 立方米填埋气体。Bernstad & Jansen（2012）将国外关于测算填埋产生的直接排放的相关研究总结如下：

表 3：厨余垃圾填埋产生的甲烷排放			
CH ₄ [kg/ton]	方法论	时间框架（年）	参考文献
31-7j ^{1,2,3}	文献数据的使用	50 ¹ ,100 ² , 无限期 ³	
56	垃圾 DDOC ⁴ 降解率 100%，负氧化离子	100	Smith et al. (2001)
52	95% 生物可利用碳降解，其中 84% 处于设计生命周期内	15（设计周期）	Diggelman and Ham (2003)
85	基于 C,H,O,N,S 容量的计算 （基于 Finnveden,1992;Sundqvist, 1999）	100	Kim and Kim (2010)
99	100% 生物可利用碳降解减去从垃圾填埋场泄露的碳损失	100 年或无限期	Bjarnadottir et al. (2002)
n.s.	n.s.	100 年和长期（分开的）	ILCD (2011a)
77	文献数据的使用	30	PCR (2008)
n.s.	100% 降解蛋白质、糖、淀粉，70% 降解纤维素， 氧化因子 =0.1-0.15。渗滤液系数 0.01。	伪稳态（100 年）和无限期	Sundqvist(1999)
1. Aye and Widjaya (2005). 2. Blengini (2008a,b). Cherubini et al. (2009). Cuereca et al.(2006). 3. Lee et al. (2007). 4. 异质可降解有机碳（被史密斯等假定为食物垃圾中湿垃圾的 75%）			

来源：Bernstad & Jansen, 2012

用填埋方式处理厨余垃圾，其中绝大部分碳最终转换为沼气，而中国生活垃圾填埋场的沼气利用率仅

为 35% 左右，不仅造成资源和能源的浪费，也对全球变暖产生巨大影响（徐涛，2013）。

2.4 焚烧

垃圾焚烧是垃圾中的可燃物在焚烧炉中进行燃烧，即通过适当的热分解、燃烧、熔融等反应，使垃圾经过高温下的氧化进行减容，成为残渣或者熔融固体物质的过程。

垃圾焚烧的温室气体排放主要包括焚烧过程中矿物炭焚烧造成的直接碳排放及企业运转消耗的电、热引起的碳排放，其中前者来源于垃圾中的矿物炭以及

助燃剂燃烧两个部分（张婷婷，2020）。厨余垃圾焚烧产生的排放通常取决于燃烧材料中 C,N,S,Cl,F 和金属元素的含量以及焚烧厂的技术工艺。目前，关于将哪些污染物排放列入焚烧产生的环境影响评估尚无定论，许多研究将温室气体排放关注重点放在了 CO₂、CH₄ 和 N₂O，在计算时使用的数据多基于文献数据，这些数据是否考虑了输入材料或焚烧技术的差异并不清晰，因此，不同研究对厨余垃圾焚烧产生的排放和能量回收测算差异较大（Bernstad & Jansen, 2012）。

表 4：关于厨余垃圾中的能量含量、焚烧过程中的能量回收和能量输入以及残留物产生的假设总结

低热值 (Gj/ton 湿垃圾)	低热值 (Gj/ton 干垃圾)	能量产生 (kwh/ton) 电能	能量产生 (kwh/ton) 热能	CO ₂ (kg/ton)	N ₂ O (kg/ton)	能量输入 (kwh/ton)	灰 / 渣的产生 (% 湿垃圾)	参考文献
1.7-6.3 ¹	8.6-21.0	89-520 ²	553-1364 ³	453-882 ⁴	0.01-0.15 ⁵	70-533 ⁶	0-25% ⁷	经评审的 文献参考
6.9 ⁸	19.7 ⁸	480（全部） ⁸		200-880 ⁹	n.s.	80 ¹⁰	14.6% ⁸	

1. Aye and Widjaya[2005]. Baky and Eriksson[2003]. Borjesson and Berglund[2007]. Fruegaard and Astrup [2011]. Smith et al. (2001). Lee et al.[2007]. Guereca et al.[2006]

2. Baky and Eriksson (2003).Fruegaard and Astrup (2011).Karman et al. (2005).Smith et al. (2001).

3. Baky and Eriksson (2003). Borjesson and Berglund (2007).Fruegaard and Astrup (2011). Karman et al. (2005).Smith et al. (2001). Khoo et al. (2010). Lee et al. (2007).

4. Baky and Eriksson (2003).Khoo et al. (2010).Lee et al. (2007). Smith et al. (2001).

5. Baky and Eriksson (2003).Khoo et al. (2010). Smith et al. (2001).

6. Aye and Widjaya (2005). Diggelman and Ham (2003).Guerreca et al. (2006). Fruegaard and Astrup (2011).

7. Baky and Eriksson (2003). Diggelman and Ham (2003). Guerreca et al. (2006). Karman et al. (2005). Khoo et al. (2010).Lee et al. (2007). Smith et al. (2001).

8. Sundqvist (1999).

9. Sundqvist (1999). Bjarnadottir et al. (2002). La Cour Jansen et al. (2007).

10. La Cour Jansen et al. (2007).

来源：Bernstad & Jansen, 2012

考虑到厨余垃圾含水率较高，直接焚烧需要大量辅助燃料，许多研究认为直接焚烧厨余垃圾会产生显著的温室气体排放。Kim 等（2013）认为每吨干食物垃圾焚烧可以实现 9.047 吉焦的能量回收和 657 千克的二氧化碳减排。也有许多研究认为，厨余垃圾含水率高，单位质量的热值过低（2100 ~ 3100 千焦 / 千克），不能满足垃圾焚烧的热值要求。当前中国自主设计的供热锅炉热效率可以达到 65%，热电联产可以达到 50%，而单纯发电的热效率只能达到 23%（周晓萃等，2012）。欧盟在《废弃物框架指令》中明确，当

垃圾焚烧的 $R1 \geq 0.6$ （R1 为能源效率标准，2008 年 12 月 31 日之后许可建设的焚烧厂需要满足 $R1 \geq 0.65$ ）时才会认定垃圾焚烧为“垃圾管理优先次序原则”中的“回收利用”。也就是说，在焚烧厂能效水平偏低的情况下，为了实现能量回收，需投入大量的燃料和辅料，而回收的能量转化成电能却十分有限。如果没有经过合理、完善的焚烧发电能效评估，难以判断焚烧发电项目是否实现真正有效的“回收利用”。张婷婷（2020）认为塑料作为影响垃圾焚烧温室气体排放量的关键类别，可单独收集提高其分离率。

2.5 好氧堆肥

好氧堆肥是在人工控制下，在一定的水分、碳氮比 (C/N) 和通风条件下通过微生物的发酵作用和一系列的物理、化学反应，将不稳定有机物通过分解转化为安全、稳定的腐殖质物质的过程 (杨帆, 2014)。

堆肥是一项公认的高效处理有机垃圾的技术，与其他技术相比，堆肥能有效实现厨余垃圾的减量化、资源化和无害化。但是，由于堆肥过程的特殊生化反应和运行条件的限制，堆肥过程中排放的几种气体在一定程度上造成了二次污染 (杨帆, 2014)。CO₂、N₂O、CH₄ 和 NH₃ 的排放是好氧堆肥过程中主要考量的排放。多数研究认为堆肥产生的 CO₂ 排放对全球变暖产生的影响为中性，少量研究认为其产生了实质性影响。根据 IPCC 关于农业温室气体排放的指南，堆肥过程产生的 CO₂ 不计为全球变暖的贡献因子，因此堆肥过程中产生的温室气体主要考虑 CH₄ 和 N₂O。研究表明，堆肥 CH₄ 的产生量约占堆肥总碳的 0.1-12.6% (Hao 等, 2004; Wolter 等, 2004)。堆肥过程中产生的 N₂O 约占

堆肥总氮的 0.02-9.9% (Beck-Friis 等, 2001; Osada 等, 2001; Zeman 等, 2002; Szanto 等, 2007)。此外，堆肥过程中的氨挥发约占堆肥总氮的 20-60%，不仅造成空气污染，也造成养分资源流失 (Raviv 等, 2004; 贺琪等, 2005; Pagans 等, 2006; Petersen 和 Sommer, 2011)。堆肥过程中如何最大限度减少堆肥氮素损失和环境污染，是有效提高堆肥产品农用价值和环境效益的关键。目前针对堆肥过程中温室气体和 NH₃ 的减排技术研究主要集中在控制通气量、C/N、水分含量等因素上 (杨帆, 2014)。

现有研究表明，堆肥的能量输入差异较大，每吨厨余垃圾约需要 15.1-55.0 千瓦时电力或 0.01-15.3 升柴油投入。李楠等 (2020) 通过对浙江案例的调研，得出生物好氧堆肥处置的能源消耗为 642.376 兆焦耳 / 吨易腐垃圾。徐涛 (2013) 在关于深圳的研究中表明堆肥阶段的能耗为 430 兆焦耳 / 吨厨余垃圾 (Bernstad A. 和 la Cour Jansen J., 2011)。家庭堆肥能耗为 211 焦耳 / 吨厨余垃圾 (Lundie S. 和 Peters G. M., 2005)。



图片来源: <https://pixabay.com/photos/compost-garbage-biological-waste-3663514/>

2.6 厌氧消化

厨余垃圾厌氧消化是指厨余垃圾在没有溶解氧和硝酸盐氮的条件下，微生物将有机物转化为 CH_4 、 CO_2 、无机营养物质和腐殖质的过程。影响反应的环境因素主要有温度、pH 值、厌氧条件、碳氮比 (C/N)、微量元素（如 Ni、Co、Mo 等）以及有毒物质的允许浓度等。与其它工艺相比，厌氧消化具有诸多优势，预处理过程简单，可以产生大量沼气进行发电，处理周期短，还可以制造肥料等附加产品，以厌氧消化为代表的处理技术依旧是全球范围内的研究热点。

厌氧消化处理过程中产生的最大环境影响之一是甲烷逃逸，逃逸排放量因处理设施不同而有所不同。IPCC 认为沼气生产厂每处理 1 千克干垃圾就会产生 1 克（在 0-8 克区间内）甲烷逃逸（IPCC, 2006）。多项研究表明，厌氧消化工厂逃逸的甲烷大约占 0.5-2% 的沼气生产量，Eggleston 等（2006）认为这一比例甚至可高达 10%（Bernstad & Jansen, 2012）。

Fei 等（2021）对比了固体液体混合式厌氧消化（Solid-liquid Mixed Anaerobic Digestion）和液体废弃物厌氧消化（Liquid-phase Anaerobic Digestion）两种处理模式，两个模式的电力消耗分别为 481.6 千瓦时和 592.32 千瓦时，沼气生产分别为 420 毫升（克）挥发物（Volatile Solids）和 400 毫升（克）挥发物，然而发电产出分别为 492.7 千瓦时和 0 千瓦时。Guo & Yang（2019）认为 200 吨厨余垃圾通过厌氧消化方式处理可以生产 43350 千瓦时电力，同时降低温室气体排放 16087 千克，经济和环境效益都十分可观。

2.7 昆虫等生物转化

昆虫等生物转化处理主要指通过食物链方法，或者微生物在一定条件下参与分解，将厨余垃圾转化为其他生物种类的营养物质，已先后发展出利用蚯蚓、蝇类、黑水虻、黄粉虫、蟑螂和各类微生物菌等处置厨余垃圾的技术路线。

目前，关于昆虫等生物转化处理技术环境影响的研究较少。一项利用黑水虻进行昆虫转化的研究显示，该技术温室潜能表现为环境负荷，主要由电力（化石能源为主）消耗造成，幼虫干燥过程耗电占比最大（35%）。当黑水虻虫体干燥过程能耗降低至 0.17kWh/kg 时，温室效应由负荷变为减排，实现体系优化。改进鲜虫的干燥方式或储存条件，避免过多的能源消耗，在保障产品出路的前提下，才能实现应用优势（郭含文，2021）。

3. 不同处理方式温室气体排放比较

鉴于生命周期评价技术的复杂性和不同研究中处理工艺、边界假设的差异性，许多研究用对不同模式、不同工艺产生的全球变暖潜能值、资源能源消耗和垃圾资源化率进行了横向比较。本报告分别对国内外典型研究的结论进行了总结。

在国外相关研究中，Bernstad & Jansen (2012) 对不同研究中每吨厨余垃圾焚烧、填埋、厌氧消化、好氧堆肥的全球变暖潜势进行了总结。研究显示，仅考虑全球变暖潜能这一项评价指标，大规模厌氧消化被认为是最优选择，其次是小规模堆肥、大规模堆肥和有能量回收的焚烧，填埋和没有能量回收的焚烧最不被认可。

姜晓群等 (2021) 对日本食物废弃物不同资源化技术下的碳排放比较研究发现，厨余垃圾处置技术的优先序为：不考虑再生品的运输情况下，甲烷化（循环消化液）> 甲烷化（单纯）> 肥料化 > 废物固形燃料 > 甲烷化（与地下水混合）> 饲料化（液化）> 发电焚烧 > 无发电焚烧 > 甲烷化（混合焚烧）> 碳化 > 乙醇化 > 饲料化（额外干燥）> 焚烧可燃垃圾（无发电）；考虑再生品的运输情况下，甲烷化（循环消化

液）> 甲烷化 > 肥料化 > 废物固化燃料 > 饲料化（液化）> 甲烷化（污水处理混合）> 发电焚烧 > 无发电焚烧 > 甲烷化（混合焚烧）> 碳化 > 乙醇化 > 饲料化（干燥）> 焚烧可燃垃圾（无发电）。

联合国环境署关于北美地区食物浪费和厨余垃圾全生命周期研究也表明，基于温室气体排放考虑，厌氧消化优于好氧堆肥，填埋排名最后。

在报告重点分析的 30 篇关于中国厨余垃圾处理的研究中，我们依据研究结论中对厨余垃圾处理方式优先级建议进行了排序。在该研究结论中，某一处理方式 / 工艺排名占前 50% 及以上视为推荐，反之视为不推荐。在这 30 项研究中，有 13 项研究认为对厨余垃圾进行分类回收是实现垃圾处理环境效益最大化的第一步，论证了垃圾分类可以带来巨大的减排效益。在基于温室气体排放（或全球变暖潜能值）的比较中，有 13 项研究认为填埋将产生最多的温室气体排放，是最不推荐的处理方式，其次是焚烧；有 8 项研究认为厌氧消化是最优的处理方式；对于堆肥和焚烧的优先级结论略有差异，大多数对两者进行横向比较的研究认为好氧堆肥优于焚烧。

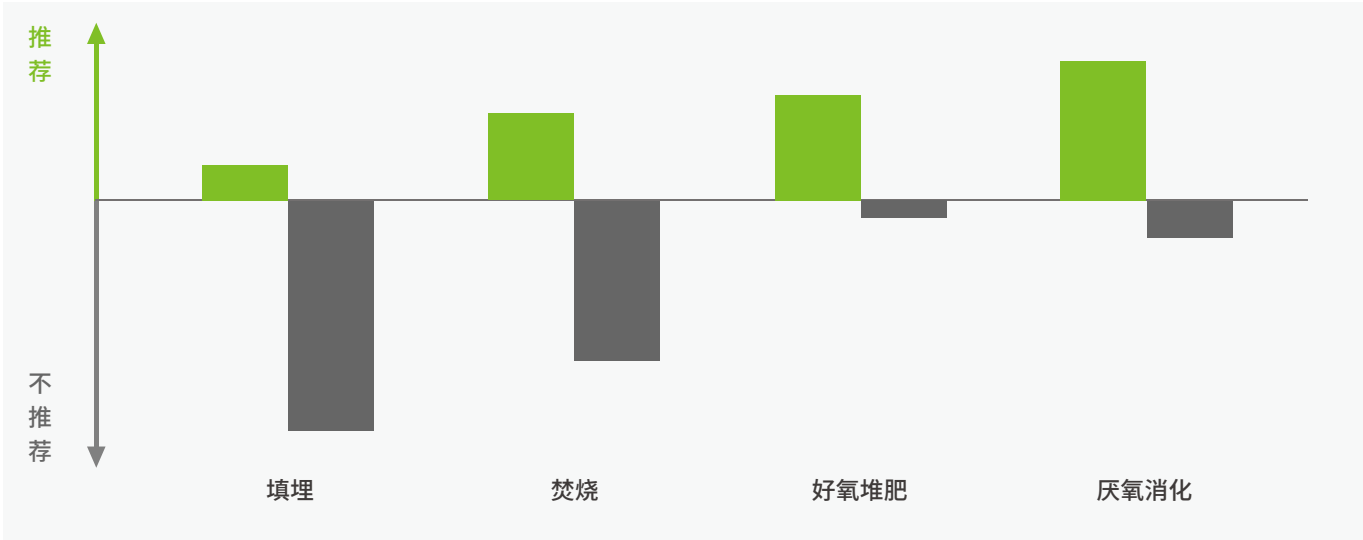


图 7：基于温室气体排放的厨余垃圾处理方式优先级比较

在垃圾资源化率方面，这 30 项研究集中关注能量回收发电，其中，焚烧发电率在 20-25%（Zhou 等，2018; Dong 等，2013; Zhou 等，2019; Chi 等，2015），沼气发电率为 39.1%（Zhou 等，2018; Zhou 等，2019）。目前厨余垃圾的资源化利用通常采用能源化、肥料化和饲料化实现。能源化主要有焚烧发电、发酵制沼气发电、热分解和发酵制氢等几种技术路线。焚烧产生的热能可以转化为蒸汽或电能，但因厨余垃圾含水率高热值低，需要添加辅料燃烧，同时存在产生二噁英等有毒有害物质的风险。热分解法是将厨余垃圾在高温下使垃圾中所含的能量转换为燃气、油和碳再进行回收利用。氢作为石化能源替代之一极具潜力，对厨余垃圾进行发酵制氢是一种新型处理方式，目前还不成熟。厨余垃圾的饲料化最初主要为直接饲喂禽畜，但是由于质量、销路等原因，加之存在安全风险，欧美大部分国家已经严禁直接使用厨余垃圾作为饲料饲养禽畜。以厨余垃圾作为原料饲喂昆虫再转化为蛋白质，可以解决直接饲喂动物的问题和风险，成为饲料蛋白质的来源。厌氧和好氧堆肥都可实现厨余垃圾肥料化。厌氧处理后的肥料存在不易降解的杂质，影响销售。好氧堆肥操作简单周期短，无论是集中堆肥还是家庭堆肥，都可有效实现厨余垃圾减量化、资源化和无害化（杨帆，2014）。

综合以上分析发现：

- 厨余垃圾处理最有利于温室气体减排、提升环境效益的操作顺序为减少前端食物浪费和厨余垃圾，同时进行垃圾分类和资源化利用，以此获得的环境效益远高于选择恰当的后端处理方式；
- 基于温室气体减排的考量，厨余垃圾处理方式的优先级为厌氧消化 > 好氧堆肥 > 焚烧 > 填埋，具体处理模式设计应参照此减排优先级进行优化；
- 考察不同厨余垃圾处理模式的能源资源消耗情况时，需全面分析能源、资源投入情况和能量回收情况，特别需要考虑能源转化率，避免低能源转化效率的焚烧发电；
- 实现垃圾资源化，特别是沼气、生物柴油、生物乙醇等能源产物的应用，可以在一定程度上实现节能减排。



图片来源：<https://pixabay.com/zh/photos/green-waste-compost-compost-bin-513609/>

四、政策建议

随着城市化进程加快和人们生活质量提高，厨余垃圾产生体量不断增加，垃圾处理及相关环境问题将日益凸显。现有研究和案例表明，优化处理工艺可以在一定程度上减少对空气、水、土等环境产生的环境影响。但从全生命周期角度看，前端做好厨余垃圾的减量、分类，比在后端选择妥善的处理方式、优化处理工艺更具环境效益。

除了后端处理部门，食物损失与浪费和厨余垃圾管理还涉及农业、食品加工与制造业、交通运输、电力系统等多个部门，从全生命周期和循环经济视角看，其能源消耗和温室气体排放不容忽视。许多国家的经验表明，废弃物领域是继能源领域之后的重点减排领域，减少废弃物处理的温室气体排放量是实现国家减排目标的有效途径之一。在中国实现碳达峰、碳中和的路径规划中，废弃物领域减排也是其中重要一环。为了优化厨余垃圾管理、与“双碳”目标实现协同，希望有关部门能综合考虑以下建议：

- 建立针对食物浪费和厨余垃圾管理的专题数据库，开展以数据为基础的厨余垃圾管理和政策、项目评估工作。基于日韩等发达国家的政策实践和管理经验，食物浪费和厨余垃圾相关数据是进行问题分析和决策的基础，对于国家制定法律和政策目标、各行业执行和评估相关成效至关重要，也是推广厨余垃圾 / 易腐垃圾分类收集、计量管理的前提。
- 设立国家层面的食物浪费减量目标，确立部门分工和具体任务，制定相应的量化目标和措施。在已经针对“反食品浪费”立法的国家中，往往将设定减量目标作为推动工作落地的第一步。参考已有的经验和实践，“反浪费”可以从以下两个角度着手设定减量目标。一是从食物生产、加工、配送环节减量；二是从消费环节，特别是餐饮行业和家庭减量。通过配合环境影响评估特别是温室气体排放，来设定食物浪费减量目标和路线图。
- 提升“资源化利用”在食物管理层级上的优先级。目前，中国对食物废弃物和厨余垃圾的管理重点仍

在后端处置，旨在通过各种技术工艺手段降低后端处理的环境影响，实现资源化利用。然而，着眼于后端处置的努力在消减食物浪费和厨余垃圾环境影响上远远不够，需要在管理层级理念上提升“资源化利用”的优先级，构建适合中国国情的食物管理层级理念，强调食物捐赠、饲料化、肥料化和不同优先层级工业用途的开发使用，避免低能效的焚烧发电。特别是在中国中长期的垃圾管理规划中，落实厨余垃圾前端减量、分类的管理思路，避免形成高污染、高碳排处理方式为主导的发展格局。

- 使用全生命周期评估全面考察不同厨余垃圾处理模式和处理工艺的环境影响。特别要结合“双碳”目标，考虑温室气体减排和资源能源消耗情况，按照“厌氧消化 > 好氧堆肥 > 焚烧 > 填埋”的梯次选择和优化处理模式。随着垃圾综合处理模式推广，综合考虑垃圾组分、地区差异等因素，发挥多种技术耦合协同作用，优化综合处理模式，提高温室气体减排效益和环境综合效益。
- 通过多种财政政策手段激励前端垃圾减量、垃圾分类和资源化利用。考虑到环境影响，对于厨余垃圾处理项目的投资，应优先考虑环境友好的选项，如厌氧消化、好氧堆肥，避免填埋和焚烧。补贴或奖励前端的减量和资源化利用行为，如食物捐赠；补贴垃圾资源化利用创新技术手段；对食物浪费和造成额外处理成本的浪费行为进行收费或收税等。
- 除了厨余垃圾温室气体排放，未来的政策研究还应向其它环境影响及货币化核算、食物行业产业进行延伸。一是将水、土、大气、生物多样性等更多维度和领域纳入对食物浪费和厨余垃圾处理的环境影响考察，二是根据碳社会成本等多种方法对环境损失进行货币化核算，以便进行全面的成本收益分析，三是将生命周期评价拓展到产品生产、加工制造、分发销售等食品行业全产业链，推动全产业链条的低碳管理，走向“循环经济”。

附录

附录一：中国垃圾分类、厨余垃圾管理相关政策

政策名称	主要内容	发布时间	发布部门
《北京市餐厨垃圾收集运输处理管理办法》	用于本市规划市区、郊区的城镇地区和开发区、科技园区、风景名胜及其它实行城市化管理的地区内餐厨垃圾的收集、运输、处理及相关管理活动，市市政管委负责本市餐厨垃圾收集、运输、处理的监督管理和本办法的组织实施。餐厨垃圾收集、运输和处理必须符合卫生、环保要求	2006 年 1 月	北京市城市管理委员会
《企业所得税法实施条例》	所得税三免三减半，企业从取得经营收入的第一年至第三年可免交企业所得税，第四年至第六年减半征收，适用于从事节能环保、沼气综合利用、海水淡化等行业的企业。	2007 年 12 月	国家税务总局
《重庆市餐厨垃圾管理办法》	在全市将布局一批餐厨垃圾处理场所进行回收处理。鼓励社会参与，通过招标等方式，确定餐厨垃圾收集、运输和处理单位。餐厨垃圾产生后 24 小时内，餐饮企业须将其交给收运单位运输；负责收运的单位每日至少到餐厨垃圾产生单位清运一次，当日须将其运至处理单位处理；运送实行密闭化运输，不得滴漏、撒落。 餐厨垃圾不得再用来喂猪。将餐厨垃圾与其他生活垃圾分类，实行单独收集、密闭储存；不得将餐厨垃圾排入雨水管道、污水排水管道、河道和厕所，不得将未经无害化处理的餐厨垃圾作为畜禽饲料；不得将废弃食用油脂或其加工产品用于食品加工和销售。对违规者按照法律法规实施处罚。	2009 年 9 月	重庆市人民政府
《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》	选择部分具备开展餐厨废弃物资源化利用和无害化处理条件的设区的城市或直辖市市辖区进行试点。试点工作的目标：建立适合我国城市特点的餐厨废弃物资源化利用和无害化处理的法规、政策、标准和监管体系；探索适合我国国情的餐厨废弃物资源化利用和无害化处理技术工艺路线；形成合理的餐厨废弃物资源化利用和无害化处理的产业链，提高餐厨废弃物资源化利用和无害化水平。	2010 年 5 月	国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部、环境保护部、农业部
《国务院办公厅关于加强地沟油整治和餐厨废弃物管理的意见》	提出规范餐厨废弃物管理，加强餐厨废弃物收运管理、建立餐厨废弃物管理台账制度和严肃查处有关违法违规行为等措施来加强餐厨废弃物的管理	2010 年 7 月	国务院
《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》	以城市为单位，支持试点城市餐厨废弃物收集、运输、利用 和处理体系建设和改造升级，以及法规、标准、管理体系等能力建设。对于餐厨废弃物资源化利用和无害化处理试点城市建设，中央财政采取预拨与清算相结合的综合财政补助方式予以支持，补助资金由地方政府根据有关建设方案统筹使用，专项用于餐厨废弃物收运和利用体系建设。财政部、国家发展改革委根据试点城市实施方案，综合考虑当地餐厨废弃物现状和年度项目投资计划，共同确定给予试点城市的中央财政补助资金额，并按照补助金额的 50% 向地方政府下拨启动资金。	2011 年 5 月	国家发展和改革委员会、财政部
《长沙市餐厨垃圾管理办法》	市城市管理行政主管部门是本市餐厨垃圾管理的行政主管部门；市人民政府应当建立健全食用油和食品市场监管制度和体系；管理坚持减量化、资源化、无害化的原则，实行统一收集运输、集中定点处置制度；餐厨垃圾的收集运输由市、区财政予以补贴，具体办法由市城市管理行政主管部门会同财政、物价等行政主管部门另行制定，报市人民政府批准后执行。	2011 年 6 月	长沙市人民政府

政策名称	主要内容	发布时间	发布部门
《关于印发“十二五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划的通知》	主要目标：到 2015 年，直辖市、省会城市和计划单列市生活垃圾全部实现无害化处理，设市城市生活垃圾无害化处理率达到 90% 以上，县具备垃圾无害化处理能力，县城生活垃圾无害化处理率达到 70% 以上，全国城镇新增生活垃圾无害化处理设施能力 58 万吨 / 日。 到 2015 年，全国城镇生活垃圾焚烧处理设施能力达到无害化处理总能力的 35% 以上，其中东部地区达到 48% 以上。 到 2015 年，全面推进生活垃圾分类试点，在 50% 的设区城市初步实现餐厨垃圾分类收运处理，各省（区、市）建成一个以上生活垃圾分类示范城市。 到 2015 年，建立完善的城镇生活垃圾处理监管体系。	2012 年 4 月	国务院
《成都市餐厨垃圾管理办法》	明确提出建立集中收运处理体系，对餐厨垃圾产生、收运、处理等环节提出了具体的管理要求，有利于实现对餐厨垃圾产生、收运、处理的全过程监管，防止餐厨垃圾污染环境和危害公共安全。《办法》第对城市管理、食药监、环保、质监、工商、农业、商务、公安等餐厨垃圾的主要监管部门职责进行了分别表述。同时还规定，由市和区（市）县食品安全委员会办公室负责餐厨垃圾管理的综合协调工作。	2012 年 10 月	成都市人民政府
《关于印发〈资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录〉的通知》	增值税即征即退。餐厨垃圾 100%，垃圾处理劳务 70%，废弃油脂 70%，再生资源 30-50%	2015 年 6 月	财政部、国家税务总局
《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》	主要目标：到 2020 年底，直辖市、计划单列市和省会城市（建成区）生活垃圾无害化处理率达到 100%；其他设市城市生活垃圾无害化处理率达到 95% 以上，县城（建成区）生活垃圾无害化处理率达到 80% 以上，建制镇生活垃圾无害化处理率达到 70% 以上，特殊困难地区可适当放宽。 —到 2020 年底，具备条件的直辖市、计划单列市和省会城市（建成区）实现原生垃圾“零填埋”，建制镇实现生活垃圾无害化处理能力全覆盖。 —到 2020 年底，设市城市生活垃圾焚烧处理能力占无害化处理总能力的 50% 以上，其中东部地区达到 60% 以上。 —到 2020 年底，直辖市、计划单列市和省会城市生活垃圾得到有效分类；生活垃圾回收利用率达到 35% 以上，城市基本建立餐厨垃圾回收和再生利用体系。 —到 2020 年底，建立较为完善的城镇生活垃圾处理监管体系。	2016 年 12 月	国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部
《生活垃圾分类制度实施方案》	到 2020 年底，基本建立垃圾分类相关法律法规和标准体系，形成可复制、可推广的生活垃圾分类模式，在实施生活垃圾强制分类的城市，生活垃圾回收利用率达到 35% 以上。这个通知的出台，将垃圾分类的目标正式明确，标志着我国垃圾分类进入快车道。	2017 年 3 月	国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部
《循环发展引领行动》	生活垃圾分类和再生资源回收有效衔接提出了具体的工作计划。如加强城市低值废弃物资源化利用，创新服务机制和模式，健全法规体系。 研究出台强制回收的产品和包装物名录及管理办法、建筑垃圾回收与资源化利用管理办法；理顺价格税费政策，探索垃圾计量收费等。 城市餐厨废弃物资源化处理率达到 20% 等量化目标。	2017 年 5 月	国家发展和改革委员会等十四部委

政策名称	主要内容	发布时间	发布部门
《关于推进党政机关等公共机构生活垃圾分类工作的通知》	提出 2017 年底前，中央和国家机关及省（区、市）直机关率先实现生活垃圾强制分类；2020 年底前，生活垃圾分类示范城市的城区范围内公共机构实现生活垃圾强制分类；其他公共机构要因地制宜做好生活垃圾分类工作。	2017 年 6 月	国管局、住房和城乡建设部等五部委
《餐厨垃圾处理厂运行维护技术规程（征求意见稿）》	适用于新建、改建或者扩建的餐厨垃圾处理厂的运行、维护、管理，运行参数符合国家现行标准要求。	2017 年 9 月	住房和城乡建设部
《关于推进资源循环利用基地建设的指导意见》	提出到 2020 年，在全国范围内布局建设 50 个左右资源循环利用基地，基地服务区域的废弃物资源化利用率提高 30% 以上，探索形成一批与城市绿色发展相适应的废弃物处理模式，切实为城市绿色循环发展提供保障。	2017 年 10 月	国家发展和改革委员会、财政部、住房和城乡建设部
《关于加快推进部分重点城市生活垃圾分类工作的通知》	2018 年 3 月底前，46 个重点城市出台生活垃圾分类管理实施方案或计划行动，从党政机关、军队单位、医院、学校等率先做起，把生活垃圾分类工作扩大到所有公共机构和相关企业；2020 年底，46 个重点城市基本建成生活垃圾分类处理系统，基本形成相应的法律法规和标准体系，形成一批可复制、可推广的模式。在进入焚烧和填埋设施之前，可回收物和易腐垃圾的回收利用率合计达到 35% 以上。2035 年前，46 个重点城市全面建立城市生活垃圾分类制度，垃圾分类达到国际先进水平。	2017 年 12 月	住房和城乡建设部
《关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见》	聚焦污水处理，垃圾处理、节水、节能环保等四方面：健全固体废物处理收费机制，建立健全城镇生活垃圾处理收费机制，完善危险废物处置收费机制，全面建立覆盖成本并合理盈利的固体废物处理收费机制，完善城镇生活垃圾分类和减量化激励机制，加快建立有利于促进垃圾分类和减量化、资源化、无害化处理的激励约束机制，探索建立农村垃圾处理收费制度。	2018 年 6 月	国家发展和改革委员会
《城市生活垃圾分类工作考核暂行办法》	按季度，对 46 个重点城市推行生活垃圾分类工作的进度进行监管及考核，主要从体制机制建设、示范片区建设、分类作业等 10 个方面计分，加强推进生活垃圾分类的进程。	2018 年 6 月	住房和城乡建设部
《“无废城市”建设试点工作方案》	到 2020 年，系统构建以固废减量和循环利用率为核心的“无废城市”建设指标体系，提出生活垃圾源头减量。	2018 年 12 月	国务院
《上海市生活垃圾管理条例》	生活垃圾分为可回收物、有害垃圾、湿垃圾和干垃圾。如果个人没有将垃圾分类投放，最高将面临高达 200 元人民币的罚款，单位混装混运最高罚款 5 万元人民币。	2019 年 7 月	上海市人民政府
《生活垃圾分类标志（GB/T 19095-2019）》	正式明确了生活垃圾分类的四分类标识方法，厨余垃圾（也称为湿垃圾）被单独标识。	2019 年 11 月	住房和城乡建设部
《易腐垃圾就地处置管理规范》	日处理规模 30 吨以下（单台日处理规模 10 吨以下）就地处置设施，对维护、安全生产、应急管理、产出物质量、污染物控制进行了规定。产出物满足 NY 525、DB33/T 2091 标准要求，并经相关部门检测合格的，可作为肥料或复合有机肥配置使用。产出物不能达到堆肥腐熟度要求的，不得直接作为肥料或复合有机肥配置使用的，应经过二次发酵腐熟，符合 GB 18877 和 DB33/T 2091 腐熟要求的，可作为有机肥原料利用，并做好数量统计和去向记录。	2020 年 5 月	浙江省杭州市市场监督管理局
关于印发《北京市厨余垃圾分类质量不合格不收运管理暂行规定》的通知	收集运输单位发现拟交付的厨余垃圾分类质量不合格的，应当主动与生活垃圾分类管理责任人联系，要求生活垃圾分类管理责任人改正。如果仍不合格的拍照向城镇执法部门举报。	2020 年 6 月	北京市城市管理委员会、北京市城市管理综合行政执法局
《家用型厨余垃圾生物处理机（征求意见稿）》	规定了家用型厨余垃圾生物处理机的分类、型号与命名、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存、使用说明，适用于家庭使用的对生活垃圾中可生物降解的厨余垃圾进行生物处理的设备。	2020 年 8 月	住房和城乡建设部

政策名称	主要内容	发布时间	发布部门
《城镇生活垃圾分类和处理设施补短板强弱项实施方案》	一是加快完善垃圾分类收集和分类运输体系。二是大力提升垃圾焚烧处理能力。在生活垃圾日清运量超过 300 吨的地区，加快发展以焚烧为主的垃圾处理方式，到 2023 年基本实现原生生活垃圾“零填埋”。在生活垃圾日清运量不足 300 吨的地区探索开展小型生活垃圾焚烧设施试点。三是合理规划填埋场建设。原则上地级以上城市以及具备焚烧处理能力的县（市、区），不再新建原生生活垃圾填埋场，现有生活垃圾填埋场将主要作为垃圾无害化处理的应急保障设施使用。四是因地制宜推进厨余垃圾处理设施建设。明确在开展生活垃圾分类且具备条件的地区，加快补齐厨余垃圾处理能力短板；尚未出台垃圾分类法规的地区，以及厨余垃圾资源化产品缺乏消纳途径的地区，厨余垃圾可纳入焚烧处理设施统筹处理。	2020 年 7 月	国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部、生态环境部
《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》	关于生活垃圾（包含厨余垃圾）主要作了以下修改：一是，明确固体废物污染环境防治坚持减量化、资源化和无害化原则（第四条）；二是，要求县级以上地方人民政府应当加快建立分类投放、分类收集、分类运输、分类处理的生活垃圾管理系统，实现生活垃圾分类制度有效覆盖（第四十三条）；三是，县级以上地方人民政府环境卫生主管部门负责组织开展厨余垃圾资源化、无害化处理工作。产生、收集厨余垃圾的单位和其他生产经营者，应当将厨余垃圾交由具备相应资质条件的单位进行无害化处理。禁止畜禽养殖场、养殖小区利用未经无害化处理的厨余垃圾饲喂畜禽（第五十七条）；四是县级以上地方人民政府应当按照产生者付费原则，建立生活垃圾处理收费制度。应当根据本地实际，结合生活垃圾分类情况，体现分类计价、计量收费等差别化管理，并充分征求公众意见。生活垃圾处理收费标准应当向社会公布（第五十八条）；五是健全保障机制。增加保障措施一章，从用地、设施场所建设、经济技术政策和措施、从业人员培训和指导、产业专业化和规模化发展、污染防治技术进步、政府资金安排、环境污染责任保险、社会力量参与、税收优惠等方面全方位保障固体废物污染环境防治工作。	2020 年 9 月	生态环境部
《关于进一步推进生活垃圾分类工作的若干意见》	主要目标。到 2020 年底，直辖市、省会城市、计划单列市和第一批生活垃圾分类示范城市力争实现生活垃圾分类投放、分类收集基本全覆盖，分类运输体系基本建成，分类处理能力明显增强；其他地级城市初步建立生活垃圾分类推进工作机制。力争再用 5 年左右时间，基本建立配套完善的生活垃圾分类法律法规制度体系；地级及以上城市因地制宜基本建立生活垃圾分类投放、分类收集、分类运输、分类处理系统，居民普遍形成生活垃圾分类习惯；全国城市生活垃圾回收利用率达到 35% 以上。参照《生活垃圾分类标志》（GB/T19095—2019），合理确定分类类别；推动源头减量；推动分类投放收集系统建设；	2020 年 11 月	住房和城乡建设部等 12 部委
关于印发《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》的通知	总体目标，对直辖市、省会城市和计划单列市等 46 个重点城市、地级城市，以及京津冀及周边、长三角、粤港澳大湾区、长江经济带、黄河流域、生态文明试验区等重点地区，提出了垃圾分类和处理系统建设发展目标。具体目标，到 2025 年底，全国城市生活垃圾资源化利用率 60% 左右、全国城市生活垃圾收运能力 70 万吨 / 日左右、全国城镇生活垃圾焚烧处理能力 80 万吨 / 日左右，城市生活垃圾焚烧处理能力占比 65% 左右。部署 10 个重点任务，分别是加快完善垃圾分类设施体系、全面推进生活垃圾焚烧设施建设、有序开展厨余垃圾处理设施建设、规范垃圾填埋处理设施建设、健全可回收物资源化利用设施等。	2021 年 5 月	国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部
《关于土地闲置费城镇垃圾处理费划转有关征管事项的公告》	住房和城乡建设等部门负责征收的按行政事业性收费管理的城镇垃圾处理费（以下简称城镇垃圾处理费）划转至税务部门征收。未按时缴纳的，由税务部门出具催缴通知，并通过涉税渠道及时追缴。	2021 年 5 月	国家税务总局，财政部、自然资源部、住房和城乡建设部、中国人民银行
《“十四五”循环经济发展规划》	重点任务，（一）构建资源循环型产业体系，提高资源利用效率。推进厨余垃圾、园林废弃物、污水厂污泥等低值有机废物的统筹协同处置。重点工程与行动，（一）城市废旧物资循环利用体系建设工程。厨余垃圾等城市废弃物分类利用和集中处置。 在政策保障方面：（一）健全循环经济法律法规标准。（二）完善循环经济统计评价体系。（三）加强财税金融政策支持。（四）强化行业监管。	2021 年 7 月	国家发展和改革委员会

附录二：研究文献列表

序号	地域	主题	处理方式	文献
1	山东	厨余垃圾	厌氧消化、好氧堆肥、湿热处理、焚烧、填埋	Anqi Gao et al. (2017)
2	香港机场	厨余垃圾	场内 / 场外焚烧、场内 / 场外厌氧消化、脱水 + 填埋、填埋	Chor-Man Lam et al. (2018)
3	苏州、杭州	厨余垃圾	厌氧消化、好氧堆肥、动物喂养、焚烧、填埋	Probhat Joshi et al. (2019)
4	兰州	厨余垃圾	厌氧消化、好氧堆肥、填埋、焚烧	Guodi Zheng et al. (2019)
5	上海	厨余垃圾	垃圾分类 + 厌氧消化、垃圾分类 + 餐厨垃圾的原位反应、焚烧、填埋	Sisi Chen et al. (2020)
6	苏州	厨余垃圾	商业餐厨垃圾处理回收一体化模式、焚烧、填埋	Zongguo Wen et al. (2016)
7	中国	厨余垃圾	厌氧消化前制造生物柴油, 厌氧消化后对沼气提纯生成生物甲烷 厌氧消化前制造生物柴油 厌氧消化后对沼气提纯生成生物甲烷 厌氧消化和堆肥 厌氧消化前制造生物乙醇	Hanwen Guo et al. (2021)
8	广州	厨余垃圾	厌氧处理、焚烧、填埋	Roosbeh Feiz et al. (2019)
9	中国	厨余垃圾	厌氧处理、焚烧、填埋	
10	杭州	城市生活垃圾	厌氧处理、焚烧、源头分类 + 填埋、填埋	Zhaozhi Zhou et al. (2018)
11	杭州	城市生活垃圾	厌氧消化、堆肥、填埋	Jun Dong et al. (2013)
12	中国	城市生活垃圾	焚烧、填埋、堆肥 + 填埋、堆肥 + 焚烧	Jinglan Hong et al. (2010)
13	杭州	城市生活垃圾	流化床焚烧、移动炉排焚烧、能量恢复填埋、无能量恢复填埋	Zhaozhi Zhou et al. (2018)
14	苏州、杭州	厨余垃圾	固液混合厌氧消化、液相厌氧消化	Xionghui Fei et al. (2021)
15	杭州	城市生活垃圾	厌氧消化、堆肥、填埋、焚烧	Yong Chi et al. (2015)
16	香港	厨余垃圾	智能餐厨垃圾回收箱、有机处理设施、填埋	Joonho Yeo et al. (2019)
17	深圳	城市生活垃圾、厨余垃圾	厌氧发酵、焚烧	Qianqian Yu & Huan Li(2020)
18	内蒙古科尔沁左翼后旗	城市生活垃圾	堆肥、厌氧发酵、焚烧、填埋	Zhiguo Wang et al.(2020)
19	北京	城市生活垃圾	焚烧、填埋	Wei Gu et al. (2021)
20	中国	厨余垃圾	厌氧发酵、填埋	Hewen Zhou et al.(2021)
21	深圳	厨余垃圾	厌氧发酵、填埋	Qianqian Yu & Huan Li(2021)
22	中国	厨余垃圾	个人厌氧发酵 + 生活垃圾焚烧、焚烧	Jingxin Zhang et al.(2020)

序号	地域	主题	处理方式	文献
23	中国	厨余垃圾	厨余垃圾前期处理、厌氧发酵、垃圾混合消化	Camilla Negri et al.(2020)
24	中国	厨余垃圾	厌氧发酵、填埋、焚烧	Yiying Jin et al.(2015)
25	南京	厨余垃圾	粉碎直排、厌氧发酵、焚烧	操家顺等 (2019)
26	金华	厨余垃圾	生物好氧堆肥、阳光厌氧发酵、焚烧、填埋	李楠等 (2020)
27	北京	厨余垃圾	生物降解堆肥、焚烧、填埋	杨帆 (2014)
28	深圳	厨余垃圾	分类收集 + 家庭堆肥 分类收集运输 + 厨余垃圾集中式堆肥 分类收集 + 厨余垃圾处理器 + 污水处理 + 污泥处置 分类收集运输 + 厨余垃圾压榨脱水 + 厌氧消化和焚烧处理 混合收集运输 + 焚烧处理 混合收集运输 + 卫生填埋	徐涛 (2013)
29	北京	厨余垃圾	垃圾分类、垃圾混合、填埋、焚烧、堆肥、回收	张婷婷 (2020)
30	沈阳	城市生活垃圾	焚烧、源头分类制 RDF 综合应用、填埋	周晓强 (2020)

附录三：垃圾处理工艺案例列表

案例名称	所在地	处理工艺	生活垃圾处理量 (吨 / 年)	厨余垃圾处理量 (吨 / 年)
沈阳市大辛生活垃圾处理厂	辽宁省沈阳市	焚烧	999000	550000
北京阿苏卫生活垃圾综合处理厂	北京	以堆肥工艺为主的综合处理，采取机械化高温、动态好氧发酵	400000	
北京南宫生活垃圾堆肥厂	北京	好氧式堆肥发酵	520000	
上海青浦生活垃圾处理厂	上海	主要为 33 天发酵	125000	75000
沈阳小型厨余垃圾处理设备	沈阳	好氧堆肥		7500
万州餐厨废弃物资源处置项目	重庆市万州区	有机质垃圾分类，厌氧处置		25000
宁波开诚生态技术有限公司 厨余垃圾处理项目	宁波	有机质垃圾分类，厌氧处置		12500~250000
普拉克环保系统（北京）有限公司 重庆市餐厨垃圾处理项目	重庆	ANAMET 厌氧处理		125000
高州市 BOT 模式 综合废弃物处理项目	广东茂名	通过 LCJ 超级厌氧微生物降解系统，餐厨垃圾等预处理后的无油浆料将进行水解及酸化过程，其后则于厌氧罐进行微生物降解	512500	62500
南安市餐厨垃圾资源化处理厂项目	泉州南安	采用以“物料接收 + 大物质分拣 + 精制制浆 + 除砂除杂 + 油水分离”为主的预处理工艺。预处理后采取厌氧发酵制沼气发电上网的形式。	50000	
定州市餐厨废弃物处置项目	定州	采用厌氧发酵工艺，本项目建成后采用餐厨废弃物、玉米秸秆、小麦秸秆、牛粪污、鸡粪为原料进行厌氧发酵。		36500
深圳市宝安区餐厨垃圾收运工程 BOT 项目	深圳	项目采用厌氧发酵制沼气工艺，同时对油脂进行加工，制成生物柴油成品。		18250
咸阳市餐厨垃圾资源化利用项目	咸阳	厌氧发酵		37500
山东省济南市链式生物处理器 循环农业处理项目	济南	饲料利用：“链式生物处理器循环农业产业项目—农业有机化、废物资源化、种养融合”的生产模式，是一种遵循生态循环科学理论体系建立的创新型多产业融合的生态产业项目		70000
广州市安芮环保科技有限公司 餐厨垃圾黑水虻处理项目	广州	饲料利用：项目主要工艺是黑水虻幼虫采食厨余垃圾消纳方式		25000

参考文献

- 操家顺, 赵嘉楠, 操乾, 吴阳, 罗景阳, 钱唐健, & 柏才华. (2019). 基于生命周期评价的两种城市生活垃圾处理模式对比. 环境保护科学, 45(6), 92–100. <https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2019.06.016>
- 陈冠益, 马文超, & 钟磊. (2018). 废物资源综合利用技术丛书—餐厨垃圾废物资源综合利用 (第一版). 化学工业出版社.
- 陈丽萍. (2013, 二月 27). 发改委正起草餐厨废弃物管理及资源化利用条例. 中国经济网. http://www.ce.cn/cysc/sp/info/201302/27/t20130227_21433038.shtml
- 郭含文. (2021). 厨余垃圾处理及资源化技术全生命周期评估 [PowerPoint]. IWM NAMA 垃圾低碳综合管理国际研讨会.
- “十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划, 1 (2016). <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201701/W020190905497906455466.pdf>
- 国家统计局. (2020). 中国统计年鉴. 国家统计局. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>
- 国务院办公厅关于印发“十二五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划的通知, 23 (2012). http://www.gov.cn/jzwgk/2012-05/04/content_2129302.htm
- 姜晓群, 谭灵芝, & 孙月阳. (2021). 日本食品废物不同资源化技术下的碳排放比较研究. 中国环境科学, 41(2), 959–966. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0107>
- 李金惠, 段立哲, 郑莉霞, 谈金银, & 张宇平. (2017). 固体废物管理国际经验对我国的启示. 环境保护, 16, 69–72. <http://113.31.19.22/>
- 联合国. (n.d). 目标 12: 采用可持续的消费和生产模式. 可持续发展. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/zh/sustainable-consumption-production/>
- 联合国环境规划署 & WRAP. (2021, 三月 4). 联合国: 可供消费者食用的所有食物中, 有 17% 被浪费. <https://www.unep.org/zh-hans/xinwenyuziyuan/xinwengao/lianheguokegongxiaofeizheshiyongdesuoyoushiwuzhongyou17beilangfei>
- 联合国粮食与农业组织. (2020). 2020 年粮食及农业相关可持续发展目标指标进展 关于粮农组织所监管指标的报告. 联合国. <http://www.fao.org/fileadmin/templates/SDG-progress-report/2020/pdf/sdg-progress-report-zh.pdf>
- 刘华, 刘文杰, & 杨长江. (2020). 走向数据、环境科学和公共政策相结合的“无废城市”生活垃圾管理. 绿色和平. <https://www.greenpeace.org/cn/wp-content/uploads/2020/10/%E2%80%9CE6%97%A0%E5%BA%9F%E5%9F%8E%E5%B8%82%E2%80%9DE7%94%9F%E6%B4%BB%E5%9E%83%E5%9C%BE%E7%AE%A1%E7%90%86.pdf>
- 路风辉, 扈华庚, & 陈满英. (2018). 国内餐厨垃圾处理产业现况及相关政策标准的研究. 环境科学与资源利用. <https://wap.cnki.net/touch/web/Conference/Article/HJGK201808002053.html>
- 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要, (2010). http://www.npc.gov.cn/wxzl/gongbao/2011-08/16/content_1665636.htm
- 日本农林水产省. (2017, 八月). Reducing Food Loss and Waste & Promoting Recycling ~ 《MOTTAINAI》 for Foods Once Again. ~ [PowerPoint]. No-Foodloss Project. <https://www.maff.go.jp/e/policies/env/attach/pdf/frecycle-3.pdf>
- 上海市餐厨垃圾处理管理办法, 45 (2005). <http://asianlii.org/chi/cn/legis/sh/laws/e5ea1e115223424ad74dfb9022a25c4c3972e0a8/>
- 王小铭, 陈江亮, 谷萌, 焦秀瑶, 蔡洪英, 张莹, 周怡然, 魏云梅, Nemanja Stanisavljevic, & 刘元元. (2019). “无废城市”建设背景下我国餐厨垃圾管理现状、问题与建议. 环境卫生工程, 27(6), 1–10.
- 吴剑. (2018, 九月 2). 我国生活垃圾焚烧发电厂的能效水平研究: 相比欧盟 我国焚烧厂整体能效水平偏低. 北极星固废网. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20180902/925037.shtml>

- 新华社 . (2010, 五月 29). 我国启动城市餐厨废弃物资源化利用和无害化处理 .
http://www.gov.cn/jrzq/2010-05/29/content_1616086.htm
- 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要 , (2016).
http://www.gov.cn/xinwen/2016-03/17/content_5054992.htm
- 徐涛 . (2013). 厨余垃圾生命周期评价—以深圳市为例 [硕士学位论文]. 华中科技大学 .
- 杨帆 . (2014). 生活垃圾堆肥过程污染气体减排与管理的生命周期评价研究 [博士论文]. 中国农业大学 .
- 叶圣豪 . (2020). 2019 年中国厨余垃圾处理行业概览 (页 1-30). 头豹 .
https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202009011406021854_1.pdf?1598999225000.pdf
- 苑星普 . (2013, 一月 22). 减少你的耗粮足迹! —联合国发起减少粮食损失与浪费的全球运动 (6: 33) .
<https://news.un.org/zh/audio/2013/01/302382>
- 张婷婷 . (2020). 基于温室气体排放的城市生活垃圾处理策略优化研究 [硕士学位论文]. 北京化工大学 .
- 赵薇 , 梁赛 , 于杭 , & 邓娜 . (2017). 生命周期评价方法在城市生活垃圾管理中的应用研究述评 . 生态学报 , 37(24), 8179–8206.
<https://doi.org/10.5846/stxb201611102280>
- 周晓萃 , 徐琳瑜 , & 杨志峰 . (2012). 城市生活垃圾处理全过程的低碳模式优化研究 . 环境科学学报 , 32(2), 498–505.
<https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2012.02.010>
- 周晓强 . (2013). 沈阳市生活垃圾资源化利用模式研究 [硕士学位论文]. 沈阳航空航天大学 .
- Adhikari, B. K., Barrington, S., & Martinez, J. (2006). Predicted growth of world urban food waste and methane production. Waste Management & Research, 24(5), 421–433. <https://doi.org/10.1177/0734242X06067767>
- Bernstad, A., & Jansen, J. la C. (2012). Review of comparative LCAs of food waste management systems—Current status and potential improvements. Waste Management, 32(2012), 2439–2455. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.07.023>
- Cho, L., Kang, M., Horvath, B., Yoo, J., Yoon, H., Kim, H., Ahn, K., Ryu, H., Nam, J., & Yakovleva, Y. (2017). Comprehensive Study of Waste Management Policies & Practices in Korea and Recommendations for LDCs and MICs (页 1–50). UNDP. Sustainable Development Goals Policy Brief Series ... - UNDP <https://www.undp.org/dam/usp/docs/USP...>
- Dong, J., Ni, M., Chi, Y., Zou, D., & Fu, C. (2013). Life cycle and economic assessment of source-separated MSW collection with regard to greenhouse gas emissions: A case study in China. Environmental Science Pollution Research, 20, 5512–5532.
<https://doi.org/10.1007/s11356-013-1569-1>
- EPA. (2018). National Overview: Facts and Figures on Materials, Wastes and Recycling. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>
- EPA. (n.d). Food Recovery Hierarchy (Sustainable Management of Food). United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/sustainable-management-food/food-recovery-hierarchy#simplified>
- European Commission. (2019). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION The European Green Deal (Document 52019DC0640). European Union.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document2>
- European Commission. (2020). Factsheet: From farm to fork: Our food, our health, our planet, our future (页 1–2). European Union. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_908
- European Commission. (n.da). Circular economy action plan (Environment). European Union.
https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en
- European Commission. (n.db). Food waste. https://ec.europa.eu/food/food/food-waste_en
- FAO. (2013). Food wastage footprint Impacts on natural resources (页 1–63). United Nations.
<http://www.fao.org/3/i3347e/i3347e.pdf>

- FAO. (n.d). Farm to Fork Strategy. for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. https://ec.europa.eu/food/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en
- Fei, X., Jia, W., Chen, T., & Ling, Y. (2021). Life-cycle assessment of two food waste disposal processes based on anaerobic digestion in China. *Journal of Cleaner Production*, 293(2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126113>
- Guo, H., Zhao, Y., Damgaard, A., Wang, Q., Wang, H., Christensen, T. H., & Lu, W. (2021). Quantifying global warming potential of alternative biorefinery systems for producing fuels from Chinese food waste. *Waste Management*, 130, 38–47.
- Guo, X., & Yang, X. (2019). The economic and environmental benefits analysis for food waste anaerobic treatment: A case study in Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 10374–10386. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04454-1>
- Hogan, B. (2015, 五月 29). Technology Trumps Food Waste in South Korea. *Food Waste Intelligence*. <https://blog.leanpath.com/technology-trumps-food-waste-south-korea>
- Kim, D.-Y. (2019). How the Volume-based Waste Fee Policy Increased Household Recycling Rates in the Republic of Korea (1995–2009) [Global Delivery Initiative, 页 1–10]. WorldBank. <https://olc.worldbank.org/system/files/Case%20Stude%20-%20How%20the%20Volume-based%20Waste%20Fee%20Policy%20Increased%20Household%20Recycling%20Rates%20in%20the%20Republic%20of%20Korea%20%281995%E2%80%932009%29.pdf>
- Kim, K. (2003). Volume-Based Waste Fee System. *Korea Environmental Policy Bulletin*, 1(1), 1–24.
- Kim, M. H., Song, H. B., Song, Y., Jeong, I. T., & Kim, J. W. (2013). Evaluation of food waste disposal options in terms of global warming and energy recovery: Korea. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 1–12. <https://doi.org/10.1186/2251-6832-4-1>
- Laurie Horning. (2014, 六月 26). Antigaspi: The National Campaign to Reduce Food Waste in France [Organizational website]. *Food Waste Intelligence*. <https://blog.leanpath.com/blog/food-waste-around-the-globe-france-antigaspi>
- Matamoros, C. A. (2019, 六月 2). How is food waste regulated in Europe? *Euronews*. <https://www.euronews.com/2019/02/06/how-is-food-waste-regulated-in-europe>
- McCarthy, N. (2021, March 5). The Enormous Scale of Global Food Waste. *Statista*. [https://www.statista.com/chart/24350/total-annual-household-waste-produced-in-selected-countries/Ministry of Agriculture Forestry and Fisheries \(MAFF\). \(2019, 八月 \). Reducing food loss and waste in Japan 「MOTTAINAI」 It is a message from Japan to the World \[PowerPoint\]. No-Foodloss Project. <https://www.maff.go.jp/e/policies/env/attach/pdf/frecycle-5.pdf>](https://www.statista.com/chart/24350/total-annual-household-waste-produced-in-selected-countries/Ministry of Agriculture Forestry and Fisheries (MAFF). (2019, 八月). Reducing food loss and waste in Japan 「MOTTAINAI」 It is a message from Japan to the World [PowerPoint]. No-Foodloss Project. https://www.maff.go.jp/e/policies/env/attach/pdf/frecycle-5.pdf)
- Ministry of Environment. (2012, 八月 2). Management manual for food waste fee system to be published. <https://eng.me.go.kr/eng/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=titleOrContent&searchValue=RFID&menuId=461&orgCd=&boardId=748&boardMasterId=522&boardCategoryId=&decorator=>
- payasyouthrow. (n.d). Waste Reduction Options. <http://payasyouthrow.org/solutions-2/>
- Stenmarck, Å., Jensen, C., Quested, T., Moates, G., Buksti, M., Cseh, B., Juul, S., Parry, A., Politano, A., Redlingshofer, B., Scherhauer, S., Silvennoinen, K., Soethoudt, H., Zübert, C., & Östergren, K. (2016). Estimates of European food waste levels (页 1–80). *FUSIONS EU*. <http://edepot.wur.nl/378674>
- Yu, K.-Y. (2017). Volume Based Waste Fee(VBMF) System for Municipal Solid Waste (Policies). *Seoul Solution*. <https://seoulsolution.kr/en/content/6326>
- Yu, Q., & Li, H. (2020). Moderate separation of household kitchen waste towards global optimization of municipal solid waste management. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123330>

著作权及免责声明

本报告由绿色和平与中华环保联合会共同发布。

除标注引用的内容（包括但不限于文字、数据、照片、图表、商标等，下同）外，本报告所有内容的著作权及其他知识产权归绿色和平所有。

如需引用本报告的内容，请注明出处。

本报告引用的内容均基于我们认可的已公开资料，但我们无法核实这些资料的完整性和准确性，绿色和平不承担任何相应的法律责任。

如果引用的公开信息涉及版权，请与我们联系。

GREENPEACE 绿色和平

绿色和平是一个全球性环保组织，
致力于以实际行动推动积极的改变，
保护地球环境。

地址：北京东城区东四十条 94 号亮点文创园 A 座 201 室

邮编：100007

电话：86（10）65546931

传真：86（10）64087851

www.greenpeace.org.cn