

我国城乡多源有机固废资源化利用发展研究

杨东海, 刘晓光, 戴晓虎*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 城乡多源有机固体废弃物(固废)资源化利用是“无废城市”建设、“循环经济”发展的重要依托,“双碳”目标的提出也对城乡多源有机固废资源化利用提出了新的更高要求。本文从生活垃圾、污水厂污泥、农业有机固废3个方面出发,梳理了我国城乡多源有机固废资源化利用的基本进展,凝练出城乡多源有机固废资源化利用在总体规划与顶层设计、协作管理与费用机制、技术创新及转化等方面存在的突出问题,提出了以生物处理为核心的多源协同资源化、以热化学处理为核心的多源协同安全处置、多源有机固废集约化/园区化协同处置等关键技术路径。研究建议,系统谋划面向减污降碳双重目标的中长期总体规划和顶层设计,健全制度体系并建立跨部门协作的管理体制和市场化的价格机制,加强多学科交叉与“产学研用”协同以推动关键核心技术创新应用与产业升级,以此纵深推进城乡多源有机固废资源化利用。

关键词: 城乡多源有机固废; 资源化; 减污降碳; 技术路径; 园区化

中图分类号: X705 **文献标识码:** A

Resource Recycling of Multi-source Organic Solid Wastes in Urban and Rural Areas of China

Yang Donghai, Liu Xiaoguang, Dai Xiaohu*

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The resource recycling of organic solid wastes in urban and rural areas is crucial for the development of waste-free cities and a circular economy. The carbon peaking and carbon neutralization goals proposed by China also impose new and higher requirements for the resource recycling of these multi-source organic solid wastes in urban and rural areas. This study summarizes the basic progress of the resource recycling of multi-source organic solid wastes in urban and rural areas in China from the perspectives of household wastes, sewage sludge, and agricultural wastes, and identifies the prominent problems in overall planning and top-level design, collaborative management and cost mechanism, as well as technological innovation and transformation. Moreover, it proposes three key technical paths for the resource recycling, including multi-source collaborative recycling centered on biological treatment, multi-source collaborative safe disposal centered on thermochemical treatment, and intensive/park-based collaborative disposal of multi-source organic wastes. Furthermore, the following suggestions are proposed: forming the medium- and long-term overall planning and top-level design for pollution and carbon reduction, improving the institutional system by establishing a cross-departmental collaborative management system and a market-based pricing mechanism, and strengthening interdisciplinary integration and industry-university-research-application collaboration to promote the innovative application of key core technologies and industrial upgrading.

Keywords: multi-source organic solid wastes in urban and rural areas; resource recycling; reduction of pollution and carbon emissions; technical path; park planning

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-07-19

通讯作者: *戴晓虎, 同济大学环境科学与工程学院教授, 研究方向为有机固废处理与资源化; E-mail: daixiaohu@tongji.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“绿色低碳转型中废弃物循环利用问题研究”(2022-XZ-63)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

近年来，世界主要经济体普遍将发展循环经济作为破解资源环境约束、应对气候变化、培育经济新增长点的基本路径，一些发达国家和地区提出了“无废社会”的目标。例如，欧盟发布了《欧洲绿色新政》（2019年），提出到2050年资源开采与经济脱钩、实现零废弃物的目标^[1]。在我国，随着“无废城市”建设的深入推进、“双碳”目标的提出，城乡有机固体废弃物（固废）的资源化利用面临着新的更高要求；实施全面节约战略、推进各类资源节约和集约利用、加快构建废弃物循环利用体系，成为重要的发展任务。城乡多源有机固废资源化利用对于实施全面节约战略、保障国家资源安全、积极稳妥推进“双碳”目标、加快发展方式绿色转型具有重要意义。

城乡多源有机固废包括生活垃圾（如家庭厨余垃圾、餐厨垃圾、其他厨余垃圾）、污水厂污泥、农业有机固废（如农业秸秆、畜禽粪污）等。随着经济快速发展、居民生活水平提高，我国城乡多源有机固废的产生量迅速增长，年产生量超过 6×10^9 t（约占固废产生总量的50%），居世界首位^[2]。城乡有机固废种类多、产生量大、覆盖面广，具有高混杂、高有机、高含水、易腐败等特性；如不妥善处理和利用，将严重污染环境、造成资源极大浪费，也会排放大量的 CH_4 、 N_2O 等温室气体。在世界范围内，有机固废是 CH_4 的第三大排放源，相应占比达到26%^[1]。我国《甲烷排放控制行动方案》（2023年）也对有机固废的处理与资源化利用提出了明确要求。

传统上，我国城乡有机固废以填埋处置为主，导致资源未得到有效利用^[3]。近年来，我国对固废问题的重视程度、科技投入都在提高，促进了城乡有机固废处理技术的迅速发展，基本形成以焚烧处理为主，厌氧消化、好氧堆肥为辅，应急填埋保底的处理处置体系；生活垃圾、污水厂污泥的无害化处理率分别为100%、61.6%，畜禽粪污、农业秸秆的综合利用率分别为78%、88.1%^[2-4]。也要注意，我国城乡有机固废处理处置仍侧重末端治理，资源化利用水平不高，与发达国家相比还有较大的提升空间，主要体现在垃圾分类后焚烧设施产能过剩、湿垃圾厌氧沼渣资源化利用率

有待提升、区域发展不平衡、存量填埋设施环境风险隐患大等方面。污泥厌氧消化是国外污水处理厂回收有机物化学能的主要方式，厌氧消化比例超过60%，而我国仅有不足5%的污水处理厂采用了这一工艺^[5]。畜禽粪污和秸秆以还田利用为主，而高值资源化利用模式未得到有效开发。在国家大力推动协同减污降碳、“无废城市”建设、循环经济发展的背景下，明晰面向未来的城乡多源有机固废绿色低碳发展路径、构建可持续发展模式，是有机固废处理处置行业亟待研究的课题。

本文围绕城乡多源有机固废资源化利用主题，梳理相关废弃物的产生与处理处置现状，剖析资源化利用面临的突出问题，针对性提出实施路径和发展建议，以期对有机固废行业绿色低碳发展、城乡人居环境明显改善等提供理论支撑与应用参考。

二、我国城乡多源有机固废资源化利用的发展现状

（一）生活垃圾产生量与处理处置现状

生活垃圾主要包括干垃圾、湿垃圾、可回收物、有害垃圾。2022年，我国地级以上城市和县城的生活垃圾清运量为 3.12×10^8 t，包含城市生活垃圾清运量 2.44×10^8 t，县域生活垃圾清运量 6.7×10^7 t^[3]。自2019年起，在全国范围内推广垃圾分类，已有46个重点城市基本建成生活垃圾分类系统^[6]。从垃圾分类的实施情况来看，在保证精准分类质量的前提下，餐厨垃圾分出量约占生活垃圾清运量的10%~15%，家庭厨余垃圾、其他厨余垃圾分出量约占生活垃圾清运量的10%~20%^[7-9]。从上海市垃圾分类的实施效果来看，2021年湿垃圾日平均产量超过 1×10^4 t，约占生活垃圾总量的40%^[10]。按照湿垃圾占比为40%进行估算，我国湿垃圾年产生量约为 1.25×10^8 t。随着垃圾分类的深入推进，厨余垃圾的产生量将持续增长，预计2025年我国厨余垃圾产生量可达 1.7×10^8 t^[11]。

我国城镇生活垃圾在早期以混合填埋为主，随着垃圾填埋设施趋于相对饱和以及“无废城市”建设、垃圾分类的推进实施，垃圾焚烧设施建设进入高峰期；垃圾填埋比例逐年降低，而焚烧处理比例明显增加。2022年，全国地级以上城市的生活垃圾无害化处理率接近100%，共建有焚烧厂648座、卫

生填埋场 444 座、其他处理设施 307 座；垃圾焚烧处理量约为 1.95×10^8 t，占处理总量的 79.9%，卫生填埋处理生活垃圾约为 3.04×10^7 t，相应占比为 12.46%^[3]。

湿垃圾高含水、易腐败，未分类生活垃圾采用焚烧处理会浪费大量的能源；在垃圾分类后，湿垃圾通过厌氧生物处理可稳定易腐有机物，同时回收生物质能。发达国家的湿垃圾处理主要采用厌氧消化技术，占比约为 90%^[12]。2011—2015 年，我国在 100 个城市开展了餐厨废弃物资源化利用和无害化处理试点，主要采用湿式厌氧处理技术。自 2016 年起，我国在普遍推行垃圾分类制度后才开始建设厨余垃圾处理设施，起步较晚；目前在湿垃圾处理方面形成了以厌氧消化技术为主、好氧制肥技术为辅、昆虫法和饲料化等为补充的处理技术路线^[13]。截至 2020 年年底，我国建成湿垃圾集中处理设施 216 座，日处理能力为 3.9×10^4 t，其中 87.5% 的处理设施采用厌氧消化工艺；在建湿垃圾处理设施 197 座，建成后将增加日处理能力 2.4×10^7 t^[13]。

（二）污水厂污泥产生量与处理处置现状

污泥是城镇生活污水处理的过程产物，污水在净化处理后有超过 50% 的污染物聚集在污泥中。污泥富集了有机物、氮磷营养物质、病原菌、重金属等，具有“污染”“资源”双重属性，若处理不当会对水、土壤、大气造成严重污染，危害居民身体健康。随着我国城镇化进程加快，污泥产生量快速增加。2022 年，我国地级以上城市和县城累计年处理污水量为 7.38×10^{10} m³，相应的污泥年产生量为 7.88×10^7 t（含水率 80%），居世界首位；其中，地级以上城市的污泥产生量为 6.85×10^7 t，占污泥总产量的 87%^[3]。未来，随着污水处理基础设施的进一步完善，预计 2025 年我国城镇污泥年产量可达 9×10^7 t^[5]。

我国污泥处理处置起步较晚，早期存在“重水轻泥”现象，以简易填埋为主，造成占用土地、浪费资源、存在二次污染风险等问题。近年来，国家提高了对污泥问题的重视程度，加大科技投入，支持研发了适合国情、针对泥质的关键技术与装备并开展了工程示范；污泥的无害化处理处置比例逐年提高，基本形成了厌氧消化+土地利

用、好氧发酵+土地利用、干化焚烧+灰渣填埋或建材利用、深度脱水+应急填埋 4 条处理处置技术路线^[5]。截至 2022 年年底，全国建成约 400 个污泥处理处置项目（不含填埋处置），年处理总规模为 4.85×10^7 t，污泥无害化处理率约为 61.6%。其中，焚烧+灰渣填埋或建材利用、厌氧消化+土地利用、好氧发酵+土地利用技术路线的应用占比分别为 65.4%、15.6%、9.6%，其他处理处置方式占比为 9.4%^[4]。

（三）农业有机固废产生量与处理处置现状

农业有机固废主要包括畜禽粪污、农作物秸秆，产生量大、种类多，是城乡多源有机固废的重要组成部分。畜禽粪污指畜禽养殖过程中排放的废弃物，包括畜禽粪便、养殖废水；含有大量有机物、氮磷营养物质、细菌和病原体，是农业面源污染的主要来源、畜牧业碳减排的重要环节。2015 年，全国畜禽粪污年产量约为 3.8×10^9 t，其中畜禽直接排泄的粪便约为 1.8×10^9 t、养殖过程产生的废水量约为 2×10^9 t，综合利用率不足 60%^[14]。在《第二次全国污染源普查公报》（2020 年）的基础上测算，2021 年全国畜禽粪污年产量约为 3.05×10^9 t，其中畜禽直接排泄的粪便约为 1.44×10^9 t，养殖过程产生的废水量约为 1.61×10^9 t。2021 年的全国畜禽粪污产量相比 2015 年降幅为 19.7%，主要原因是国家推行节水型清粪工艺。农业农村部的统计数据表明，2022 年我国畜禽粪污综合利用率达到 78%，相比 2015 年提高了 30% 以上。畜禽粪污的利用途径主要有好氧发酵肥料化利用、厌氧发酵制沼气，形成了南方地区的“猪-沼-粮（果、鱼）”、北方地区的“四位一体”等多元化生态农业模式。

农作物秸秆是重要的生物质固废，资源化潜力极大。按照我国粮食作物种植面积测算，2022 年秸秆理论资源量约为 9.77×10^8 t，可收集的秸秆量约为 7.37×10^8 t；水稻、小麦、玉米秸秆是主要类型，分别为 2.2×10^8 t、 1.75×10^8 t、 3.4×10^8 t。根据《全国农作物秸秆综合利用情况报告》（2022 年），我国初步形成了以秸秆农用为主、多元利用的发展格局，2021 年全国农作物秸秆利用量为 6.47×10^8 t，秸秆综合利用率为 88.1%。秸秆还田是我国秸秆处理处置的主要途径，还田量为 4×10^8 t，秸秆离田利用量

为 2.47×10^8 t；饲料化、肥料化、燃料化、基料化、原料化利用比例分别为76.9%、7.8%、8.9%、3.8%、2.6%。

整体来看，我国城乡多源有机固废无害化处理与资源化利用取得了一定的进展，形成了以焚烧处理为主，厌氧消化、好氧堆肥为辅，应急填埋保底的处理处置体系。然而，我国有机固废产量大、涉及面广，高混杂、高堆存、高风险等问题尤为突出，现有的处理能力依然不能满足分类处理需求，资源化处理相对滞后。“十四五”时期，我国生态文明建设进入协同推进减污降碳、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期，对城乡多源有机固废处理与资源化提出了新的更高要求。有机固废处理承载着减污降碳双重任务，实现协同减污降碳是后续的重点发展方向。

三、我国城乡多源有机固废资源化利用存在的突出问题

（一）有机固废处理处置与碳减排、循环经济融合统筹不足，总体规划与顶层设计缺乏

发达国家和地区普遍将“零废弃”、循环经济作为经济社会发展的重点战略，将减量化、资源化列入有机固废管理的优先层级，在较高层面制定中长期发展规划。我国发布了“无废城市”、垃圾分类、循环经济、减污降碳等方面的政策文件，用于规范和推动2030年前有机固废行业的发展，但没有制定中长期推进有机固废资源化利用的总体目标、时间表、路线图；着眼未来，城乡多源有机固废处理处置需兼顾减污、降碳、资源化利用。我国有机固废处理处置仍侧重末端治理，而未形成全过程（从源头到末端）减排增效的综合治理体系，造成上下游脱节、资源化利用水平和能源效率低、与碳减排和循环经济的融合统筹不足。主要原因有：统筹污染控制、资源化利用、碳减排的法律规章与标准体系欠缺，未形成覆盖城乡多源有机固废处理处置全生命周期的碳排放核算与评价体系，碳减排未纳入约束性指标。需在减污降碳双重约束下构建我国城乡多源有机固废资源化利用的全链条技术和管理体系，提高无害化处理与资源化利用水平。

（二）跨部门协作管理机制和费用机制不完善

城乡多源有机固废管理涉及多个部门，而各部门发布的相关标准主要针对独立管辖范围内的有机固废及处理处置环节；不同部门制定的标准可能存在不协调之处，导致城乡多源有机固废的处理处置各环节尚未贯通，不利于处理产物资源化利用和行业健康发展^[5]。例如，厌氧消化+土地利用是实现污泥和湿垃圾资源化利用的最佳技术路线，但稳定化水平较低、各部门管理边界不清晰、跨部门政策不协调，导致我国污泥土地利用比例远低于发达国家水平^[5]。

城乡多源有机固废具有“污染”“资源”双重属性。污染物削减是首要任务，但目前有机固废的处理收费整体偏低，忽视了污染削减带来的环境效益，不合理的价格机制不利于行业可持续发展。以秸秆和畜禽粪污为例，收购成本高、政府补贴机制缺乏、市场激励机制不足，没有形成可持续的商业模式。费用机制不完善也导致城乡多源有机固废处理处置的最终产品（如沼气、热能、电能、其他资源化产品）存在入网困难、市场化流通不畅等问题。

（三）关键技术创新及转化不足

近年来，有机固废的资源化利用开始得到国家高度重视，科学技术、生态环境等部门开始支持相关技术研发和产业发展。然而，我国城乡多源有机固废处理主要以末端污染控制为主，资源化水平与发达国家存在较大差距，通过关键技术攻关提升资源化利用水平成为发展亟需。传统的湿垃圾厌氧资源化处理普遍存在沼液处理、沼渣出路方面的问题^[6]。干发酵处理效率高、占地面积小，是欧洲有机垃圾的主要发酵工艺；而在我国应用占比非常低，直接用于厨余垃圾处理需进行技术改进和应用优化^[13]。有机固废具有多介质、多组分交互作用的复杂特性，加之我国污泥有机质低、含砂量高，采用传统的厌氧消化工艺存在转化效率低、停留时间长、运行效益差的瓶颈。污泥是有机-水分高度混杂的非均相复杂体系，有机组分亲水性较强，传统的固液分离方式效率低、能耗高。当前，规模化养殖粪污量大且集中，就近消纳土地不足，引发了种养结合失衡的问题；畜禽粪污和秸秆以还田利用为主，缺乏高值资源

化利用技术。此外，“产学研”融合度不高，不少研究成果停滞在实验室阶段，科技成果转化不足，规模化应用难度较大。核心技术、工艺体系尚未突破，资源转化效率、产品附加值不高，装备智能化、自动化水平有待提升，不适应产业高质量发展需求。

四、我国城乡多源有机固废资源化利用的关键技术路径

(一) 以生物处理为核心的多源有机固废协同资源化技术路径

针对城乡多源有机固废，通过厌氧生物处理实现有机物的分解和生物质能的回收；沼气经过净化、提纯后作为清洁能源使用，沼肥可还田利用或生产有机肥。以在镇江市、肥城市、晋城市等地开展的城乡多源有机固废协同厌氧工程示范为基础，未来继续加大科技投入，着重从能量回收的角度，突破基于功能材料、电子调控、代谢调控的生物定向转化新原理和新方法，进一步提升有机物转化效率，推广应用协同厌氧消化回收生物质能、沼气热电联产或提纯并网；从物质循环的角度，大力推广稳定化产物土地利用、氮磷营养物质回收利用，尤其关注不可再生的战略性磷资源的回收，贯通沼渣、沼液资源化利用途径^[17]。

发达国家和地区近年来提出了利用生物质制备高值生物燃料、生物基化学品的发展布局，以此部分保障能源安全，如生物质能源约占欧盟可再生能源的60%，以生物柴油为重点，生物天然气、生物航空煤油等为补充^[18]。我国在城乡多源有机固废燃料化、高值化利用方面与发达国家和地区存在较大差距，未来应积极探索利用生物天然气制备绿色甲醇，用作远洋船舶的“零碳”燃料；利用城乡多源有机固废制备生物基平台化学品、生物基塑料、生物基溶剂、生物基表面活性剂等生物基高值产品，用于部分替代化石能源和矿产资源，提升经济和环境效益。

(二) 以热化学处理为核心的城乡多源有机固废协同安全处置技术路径

城乡有机固废热化学处理方式主要有协同焚烧、水泥窑协同、热解气化、热解炭化等。以垃圾

焚烧设施为例，协同处置餐厨与厨余垃圾厌氧沼渣、市政污泥、园林垃圾等有机固废，可以解决焚烧设施入炉垃圾不足的问题，兼顾解决污泥、沼渣的出路难题。生活垃圾中的矿物碳主要来自塑料、橡胶等，增加对塑料的分选和利用将减少矿物碳释放。为了进一步实现碳减排，需要采用余热回收拓宽能源转化与深度利用、应用蒸汽高参数技术提升发电效率、研发节能技术与设备降低厂用电率、减少自身能源与物料消耗等举措。在资源循环、污染物控制、碳减排等方面，热解气化、热解炭化技术具有应用优势，相应的行业关注度逐步提高：前者将城乡多源有机固废在高温下转化为 H_2 、 CO 、 CH_4 等气态产物，高热值的合成气可作为传统天然气的替代燃料，也可在催化剂作用下高效转化为高品质液体燃料，形成热解“气化+X”的资源化模式；后者将城乡多源有机固废转化为可用于燃料供应、土壤改良、建材利用、吸附剂的热解炭。

(三) 城乡多源有机固废集约化 / 园区化协同处置技术路径

城乡多源有机固废园区化协同处置将多类处理设施聚集在同一园区内，链接各类有机固废处理处置设施中能量代谢过程的关键节点，促进能量的梯级利用和余热回收，提高园区整体的能量利用率和资源回收率^[19]；通过焚烧和卫生填埋设施，针对园区内无法回收利用的有机固废残渣进行末端兜底处置。建设产业园区将同步实现项目布局优化、集约化管理、土地资源节约等目标，共用处理处置设施，改善资源能源使用效率、发挥协同效应、提高管理水平、消除“邻避”效应、规避社会责任风险，在最大程度上发挥协同处置优势。目前，城市多源有机固废园区化协同处置已经在上海市、深圳市、张家港市等地开展了先行示范与实践，推动了固废减量化、资源化、无害化、低碳化，为全国“无废城市”建设提供了先进经验。

将焚烧类、填埋类、有机厌氧处置类等分类别集聚布局，激励垃圾焚烧等能源中心与填埋中心、有机处置中心、污泥处理中心紧密耦合，联合处置城乡多源有机固废和二次污染物，发挥协同处置效益，提高集约化管理水平。针对园区内各类处理处置设施开展工艺设备共用、资源能源

共享、环境污染共治，支撑城乡多源有机固废协同处置的全链条集成创新，提高物质和能源的利用效率^[19]。开展以生物处理、热化学处理为核心的城乡多源有机固废协同处置技术示范，构建多源协同的综合解决方案，形成集约化/园区化协同处置技术路径。

五、我国城乡多源有机固废资源化利用的发展建议

(一) 系统谋划面向减污降碳双重目标的中长期总体规划 and 顶层设计

新发展形势对城乡多源有机固废的处理处置提出了更高要求。需结合经济社会发展、城镇化、人口流动与城市群发展、生产与消费的结构变化等趋势，考虑“无废城市”建设、绿色低碳转型、“双碳”等目标任务要求，兼顾区域发展不均衡等客观因素，因地制宜选择有机固废资源化循环利用的实施路径和配套措施。在现行管理政策与发展规划的框架下，研究和制定中长期城乡多源有机固废的总体规划，明确总体目标、阶段目标、路线图、时间表、优先序，拓展并深化有机固废资源化循环利用试点工作；着力突出降碳的引领作用，加强城乡多源有机固废资源化利用与“双碳”行动方案的深入衔接，更好支撑“无废城市”建设、减污降碳协同治理^[20]。

从理念、技术、标准三方面出发，构建污染控制、碳减排双重指标约束下的全链条体系。城乡多源有机固废的资源化利用成为国际共识，在理念上需要实现从有机固废向资源的转变、从污染控制单一目标向污染控制与碳减排双重目标的转变。在技术方面，将碳减排纳入约束性指标，综合设计污染控制、碳减排双重指标约束下的技术发展路径；从污染控制、碳排放两方面出发，开展效应评估、提出技术优化措施，将有机固废资源化作为分布式能源发展的重点^[21]。在标准方面，加快建立污染控制、资源化利用、碳排放相互结合且协同管控的法律规章和标准体系，明晰产业标准、技术要求、环境保护措施，完善碳排放理论和核算方法，构建城乡多源有机固废全生命周期碳排放核算与评价体系，为行业低碳发展提供保障。

(二) 健全制度体系，建立跨部门协作的管理体制和市场化的价格机制

城乡多源有机固废的资源化利用涉及多个管理部门，标准不统一、责任主体不清晰、管理数据不一致、产物出路不畅的情况一直存在。建议构建跨部门协作管理机制，制定一致的国家标准和行业标准，贯通城乡多源有机固废的处理处置环节，推动不同来源有机固废的协同处理处置，提升资源化利用效率；协同开展有机固废资源化循环利用建设，加强生态环境、发展改革、工业和信息化、住房和城乡建设、财政等部门的协作联动，理顺并衔接好各部门的分管职责和配合工作；统筹城市固废管理、循环经济建设、空间布局规划、产业转型发展，构建跨部门协同管理的制度体系。同步健全有机固废资源化循环利用的监管体系和评估机制，强化统计追溯的监管机制，提高精细化管理水平，确保政策措施的有效实施和精准落地。

从费用机制的角度出发，明确经费来源渠道，完善有机固废资源化产品的定价和价格补贴机制，促进有机固废资源化产品的高效流通，建立市场化、多元化运行机制。针对有机固废收费低、企业运营效益低、新技术推广困难的现状，建议改变采用公共经费处理有机固废的现状，按照处理处置成本合理收取费用，形成“谁污染谁付费”的市场化价格机制；设立专门科技计划，明确资金支持渠道，推广成熟技术并引导新技术应用。对于农作物秸秆、畜禽粪便等有机固废，加强对收购价格的指导，保障企业投资的基本收益；对于城市生活垃圾，建立有价、低价有机固废回收统筹机制，驱动城市环卫系统、再生资源系统网络的有效衔接，推进生活垃圾两网融合。未来，综合运用价格机制、财税政策、金融工具等，构建多元商业合作模式，完善收费机制与资金支持体系，形成可持续的商业模式，推动行业可持续发展^[22]。

(三) 加强多学科交叉与“产学研用”协同，推动关键核心技术创新应用与产业升级

面向污染控制、碳减排双重目标，以资源化手段，通过包括生物学、材料学、信息学在内的多学科交叉融合，推动城乡多源有机固废行业

的科技创新。突出科技创新引领作用，以技术装备升级为重点，突破关键核心技术、加速科技成果转化为主攻方向，提高城乡多源有机固废的资源化利用效率和产品附加值；推动有机固废由资源化利用向高值化利用转变，构建高效协同的产业技术创新体系，全面提升产业技术水平和国际市场竞争力。应用云计算、“互联网+”、物联网等信息技术，构建有机固废综合管理和公共信息服务系统，纳入智能城市建设体系，提升有机固废环境管理的信息化水平。加强“产学研用”协同，发挥高校、科研院所、企业、政府在技术创新链中的各自优势，着力解决制约产业发展水平的技术“瓶颈”，形成支撑高效资源化的新原理、新方法，构建以技术应用为导向的“产学研用”全链条创新模式。

城乡多源有机固废主要是生物质类有机固废，其中的碳、氢组分主要来自生物合成过程，因而由城乡多源有机固废制备的生物基燃料及生物基化学品具有碳中性特征。重点突破有机固废生物基燃料及化学品制备技术，以生物质能及生物基化学品部分替代化石能源和矿产资源^[23]。① 在生物处理方面，推动生物基燃料及生物基化学品技术创新，提高资源转化效率；探索生物天然气的

高值化利用途径，关注城乡多源有机固废制备氢能、氢能的技术路径；研发利用城乡多源有机固废制备生物基高值化学品及材料（如生物基表面活性剂、生物基塑料、生物基平台化学品、植物激素）^[18]，重点关注城乡多源有机固废中具有战略价值的资源（如磷资源）回收利用，提高行业的绿色、低碳发展质量。② 在热化学处理方面，追求由“被动”焚烧向“主动”焚烧的转变，提升能源利用效率，降低烟气污染物排放强度；构建高效热解气化体系，开发合成气高效制备生物基燃料的新技术；应用催化热解碳化技术制备热解炭，推动热解炭以成型燃料、建材原料、土地改良及功能吸附材料等形式进行高值利用（见图1）。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 11, 2024; Revised date: July 19, 2024

Corresponding author: Dai Xiaohu is a professor from the College of Environmental Science and Engineering, Tongji University. His major research fields include sludge treatment and resource recovery. E-mail: daixiaohu@tongji.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Waste Recycling in Green Low-Carbon Transition” (2022-XZ-63)

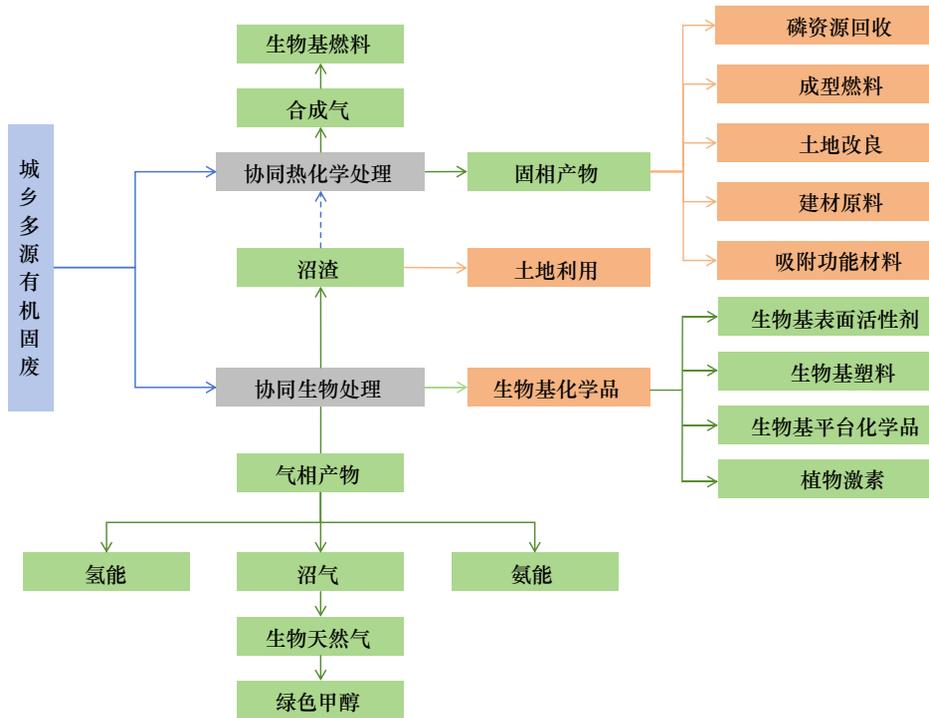


图1 城乡多源有机固废资源化、能源化技术创新发展方向

参考文献

- [1] 杨东海, 华煜, 武博然, 等. 双碳背景下有机固废资源化处置技术发展思考 [J]. 环境工程, 2022, 40(12): 1-8, 36.
Yang D H, Hua Y, Wu B R, et al. Consideration on development of organic solid waste resource treatment and disposal technology under the background of double carbon [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(12): 1-8, 36.
- [2] 李龙涛, 李万明, 孙继民, 等. 城乡有机废弃物资源化利用现状及展望 [J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 264-271.
Li L T, Li W M, Sun J M, et al. Research status and prospects of the resource utilization of organic waste in urban and rural areas [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(3): 264-271.
- [3] 国家统计局. 中国城乡建设统计年鉴 2022 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistics. China urban-rural construction statistical yearbook 2022 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [4] 柴宝华, 李文涛, 元伟, 等. 我国市政污泥处理处置现状研究 [J]. 新能源进展, 2023, 11(1): 38-44.
Chai B H, Li W T, Qi W, et al. Status of municipal sludge treatment and disposal in China [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, 11(1): 38-44.
- [5] 戴晓虎, 侯立安, 章林伟, 等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 145-153.
Dai X H, Hou L A, Zhang L W, et al. Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 145-153.
- [6] 孟小燕, 王毅. 我国推进“无废城市”建设的进展、问题及对策建议 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 995-1005.
Meng X Y, Wang Y. Progress, problems and countermeasures of promoting construction of “zero-waste city” in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 995-1005.
- [7] 张彤, 张立秋, 封莉, 等. 北京市垃圾分类后厨余垃圾与分类前生活垃圾性质变化分析 [J]. 环境工程, 2022, 40(12): 22-28.
Zhang T, Zhang L Q, Feng L, et al. Analysis of changes in characteristics of kitchen waste after sorting and domestic waste before sorting in Beijing [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(12): 22-28.
- [8] 陈倩倩, 杨栋, 黄颖, 等. 宁波市不同区分类垃圾组成与理化特性研究 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1064-1070.
Chen Q Q, Yang D, Huang Y, et al. Composition and physico-chemical properties of classified municipal solid waste in different districts of Ningbo City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 1064-1070.
- [9] 肖黎娜, 叶志隆, 吝涛. 基于社区分类的厦门市家庭生活垃圾产量及其形成机制 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 307-313.
Xiao L S, Ye Z L, Lin T. Analysis of household waste generation and its driving pattern based on community classification [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(1): 307-313.
- [10] 毕珠洁, 郇俊, 王川. 上海生活垃圾处理碳排放现状与预测研究 [J]. 环境卫生工程, 2023, 31(5): 1-8.
Bi Z J, Tai J, Wang C. The status and prediction of carbon emission from domestic waste treatment in Shanghai [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2023, 31(5): 1-8.
- [11] Li J S, An D H, Shi Y T, et al. A review of the physical and chemical characteristics and energy-recovery potential of municipal solid waste in China [J]. Energies, 2024, 17(2): 491.
- [12] 李玉爽, 李金惠. 国际“无废”经验及对我国“无废城市”建设的启示 [J]. 环境保护, 2021, 49(6): 67-73.
Li Y S, Li J H. International “zero waste” experience and its enlightenment to the construction of “zero waste city” in China [J]. Environmental Protection, 2021, 49(6): 67-73.
- [13] 王凯军, 石川, 刘越. 有机固废厌氧发酵产物的转化制备与应用进展 [J]. 环境工程学报, 2021, 15(6): 1840-1861.
Wang K J, Shi C, Liu Y. Review on typical products preparation and application in organic waste anaerobic fermentation treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(6): 1840-1861.
- [14] 呼利涛, 袁浩然, 刘晓风, 等. 我国农村废弃物分类资源化利用战略研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(4): 103-108.
Hu H T L, Yuan H R, Liu X F, et al. A study on the classification and resource utilization of rural waste in China [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(4): 103-108.
- [15] 杜瑾. 上海城市居民生活垃圾分类的协同治理机制研究 [D]. 上海: 上海师范大学(硕士学位论文), 2020.
Du J. Study on collaborative governance mechanism of domestic waste classification of urban residents in Shanghai [D]. Shanghai: Shanghai Normal University (Master's thesis), 2020.
- [16] 曾谦, 倪哲, 陈君, 等. 有机固废沼渣特性及其资源化探究 [J]. 环境工程, 2022, 40(12): 61-70, 78.
Zeng Q, Ni Z, Chen J, et al. Organic waste digestate: A review of its characteristics and resources recovery [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(12): 61-70, 78.
- [17] Khan S, Anjum R, Raza S T, et al. Technologies for municipal solid waste management: Current status, challenges, and future perspectives [J]. Chemosphere, 2022, 288: 132403.
- [18] 慕彦君, 雪晶, 鲜楠莹. 欧盟生物产业发展现状及趋势研究 [J]. 当代石油石化, 2024, 32(4): 33-39.
Mu Y J, Xue J, Xian N Y. Research on the development status and trend of bio-industry in EU [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2024, 32(4): 33-39.
- [19] 温宗国, 张佳乐, 费凡, 等. 城市多源固废协同处置机制及园区化规划研究 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(9): 5001-5010.
Wen Z G, Zhang J Y, Fei F, et al. Study of urban multi-source solid waste collaborative disposal mechanism and park planning method [J]. China Environmental Science, 2023, 43(9): 5001-5010.
- [20] 杜祥琬, 钱易, 陈勇, 等. 我国固体废物分类资源化利用战略研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(4): 27-32.
Du X W, Qian Y, Chen Y, et al. A study on the classification and resource utilization of solid waste in China [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(4): 27-32.
- [21] 刘丹, 田翠翠, 张千湖. 深圳市“无废城市”建设与碳减排协同路径探索 [J]. 可持续发展, 2023, 13(1): 192-198.
Liu D, Tian C C, Zhang Q H. Research on the cooperative path of Shenzhen “zero waste city” construction and carbon emission reduction [J]. Sustainable Development, 2023, 13(1): 192-198.

- [22] 朱黎阳, 郭占强. 加快构建废弃物循环利用体系是实施全面节约战略的重要举措 [J]. 资源再生, 2022 (10): 22–23.
Zhu L Y, Guo Z Q. Accelerating the construction of waste recycling system is an important measure to implement the overall saving strategy [J]. Resource Recycling, 2022 (10): 22–23.
- [23] Angulo-Mosquera L S, Alvarado-Alvarado A A, Rivas-Arrieta M J, et al. Production of solid biofuels from organic waste in developing countries: A review from sustainability and economic feasibility perspectives [J]. Science of the Total Environment, 2021, 795: 148816.