环保视角下城市生活垃圾资源化路径探索

万鹏[1] 罗进[2]
1. 武汉市固体废弃物处理中心 湖北 武汉 430012；
2. 武汉市生活垃圾分类促进中心 湖北 武汉 430012

摘 要 城市生活垃圾资源化是破解“垃圾围城”困境、推动城市绿色转型的关键抓手。立足环保维度，需统筹推进源头减量、分类回收与末端资源化利用全链条协同，构建“减量化、资源化、无害化”三位一体的治理格局。借助技术创新赋能，推动生活垃圾向能源与再生材料转化，可实现环境效益与经济效益的协同增效。基于此，本文聚焦环保视角下城市生活垃圾资源化路径展开探讨，为相关治理实践提供参考。

关键词 环保视角下；城市生活垃圾；资源化路径

Exploration of Resource Utilization Pathways for Municipal Solid Waste from an Environmental Protection Perspective

Wan Peng[1], Luo Jin[2]
1. Wuhan Municipal Solid Waste Treatment Center, Wuhan 430012, Hubei Province, China
2. Wuhan Municipal Solid Waste Classification Promotion Center, Wuhan 430012, Hubei Province, China

Abstract The resource utilization of municipal solid waste (MSW) is a key strategy to address the challenge of "waste besieging cities" and promote urban green transformation. From an environmental protection perspective, it is essential to coordinate and advance the entire chain of source reduction, classified recycling, and end-stage resource utilization, thereby establishing an integrated governance framework centered on "reduction, resource utilization, and harmlessness." Leveraging technological innovation to facilitate the conversion of MSW into energy and recycled materials can achieve synergistic environmental and economic benefits. Based on this, this paper explores the resource utilization pathways for MSW from an environmental protection standpoint, aiming to provide references for relevant governance practices.

Key words Environmental Protection Perspective; Municipal Solid Waste; Resource Utilization Pathway

伴随城市化进程的持续提速，生活垃圾产生量的急剧攀升已成为制约城市可持续发展的突出难题。其中，垃圾治理亟待突破“末端被动处置”的传统范式，转向“源头精准防控+资源循环再生”的协同治理模式。通过分类回收细化、焚烧发电提质、厌氧发酵增效等技术创新实践，深度挖掘生活垃圾蕴含的“城市矿产”价值。

1 环保背景的核心目标

环保语境下，城市生活垃圾治理的核心导向在于全面推进垃圾“减量化、资源化、无害化”处置，依托从源头管控到末端处置的全链条治理框架，推动城市发展模式向循环经济与绿色转型方向演进。其中，减量化的关键在于源头把控，通过倡导绿色生活理念与理性消费模式，从源头削减垃圾生成量；资源化聚焦于垃圾的能源化转化与再生材料回收，挖掘其潜在利用价值[1]。

2 城市生活垃圾的类型

结合城市生活垃圾物质属性与后续处置需求的差异，学界与实务界普遍将其划分为4大类：可回收物，涵盖废纸、塑料、玻璃、金属及织物等具备回收利用价值的资源类废弃物；厨余垃圾，既包含居民家庭产生的易腐垃圾，也包括餐饮企业、农贸市场产生的餐厨废弃物等有机垃圾；有害垃圾，则特指废荧光灯管、废药品及其容器等可能对人体健康或自然环境构成直接或潜在威胁的废弃物；其他垃圾则指除上述3类之外，如陶瓷碎片、尘土、污染纸巾、一次性餐盒等难以回收的废弃物。推行垃圾分类的核心目的，正是助力垃圾减量化、资源化与无害化目标的落地实现[2]。

3 城市生活垃圾资源化的核心路径

3.1 源头减量，从根本上控制垃圾产生

1.推广绿色生活与消费模式。我国针对塑料污染出台《关于进一步加强塑料污染治理的意见》等政策文件，禁止生产销售厚度小于0.025 mm的超薄塑料购物袋、厚度小于0.01 mm的聚乙烯农用地膜、一次性发泡塑料餐具等产品，并逐步限制不可降解塑料袋在零售、餐饮、酒店等场景的应用。鼓励使用国产

可降解替代产品，先行发展聚乳酸、聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯等生物基可降解材料，要有相关降解标准要求（如生物降解率大于90%），用于塑料替代，应用于快递包装、地膜等，推行绿色设计与用品多样化，强化材料循环性，减少环境污染泄漏。针对生活垃圾源头减量，倡导“光盘行动”，净菜进城，简化商品包装能有效减少厨余垃圾和纸塑垃圾，“光盘行动”提供小菜、半菜的选择等理性消费引导和数字化监控餐厨垃圾量且督促少浪费；净菜进城要求蔬菜产地先去除烂菜和不能食的部分并进行净菜化预处理，减少了毛菜运输的无效物流[3]。

2.落实生产者责任延伸制度。生产者责任延伸制则要求生产者对其产品包装的设计负有全生命周期的责任，利用生态设计提高其包装易回收、可循环的性能。推动包装企业提供包装设计合理、用材节约、回收便捷、经济适用的包装整体解决方案，自有研制轻克重、高刚性、功能化包装材料及其生产线，自主研发商品及快递一体化的包装等。要求企业按照《限制商品过度包装要求食品和化妆品》等强制性标准，在设计上优先选择包装单一材料、轻量化（如瓶盖重量节减0.3 g）、易于拆卸，并保证包装的空隙率规范。同时，遵循包装“减量化、重复使用、可回收”原则（3R原则），源头提升包装的回收率和再循环率，降低其环境负荷[4]。

3.2 分类回收，提升资源回收效率

1.健全分类收运体系。“前端分类投放+中端分类专车+末端分类利用”闭环系统需要依靠智能化设施和物联网。前端采用带有独立二维码的户用分类容器，实现垃圾前端投放溯源及数据获取；中端采用带有GPS、车载重量等功能的分类清运专用车，将各类垃圾专车运往相应的末端场所；末端根据不同垃圾种类分别采用利用能源方式进行处置，例如垃圾焚烧发电、厌氧发酵制沼气发电、可回收物利用材料再生、有毒有害垃圾无害化利用安全填埋，以及通过数字平台把全过程数据集成，最终完成生活垃圾产生—传输、运输—投放、处置的闭环、全程垃圾分类利用闭环。智能垃圾分类设备基于物联网技术、积分技术等多种要素，有效激发居民参与垃圾分类的行为和准确度，也是智能垃圾分类设备常用的组成部分。设置二维码或人脸识别等设备以区分使用者身份，自动称重、AI识别自动收集用户投放的垃圾种类和重量，给居民账户添加相应的分类积分。非接触操控（隔空手势可通过无纸介质进行空中打印控制）既保证了清洁操作性又提高了操作性。借助智能垃圾分类设备大数据平台对居民投放量、投放垃圾分类准确率数据实时监测分析，垃圾分类管理平台可精准调控清运需求，提高清运效率。

2.“两网融合”模式。推动再生资源回收网和环卫收运网融合，也就是再生资源“两网融合”具体实现方法包括，在社区按一定的服务范围比如1 km服务半径或一定的服务人口，如每1 000～1 500户设置1个回收点合理设置回收点，和现有的环卫中转站结合起来（或改建）回收可回收垃圾，进行收集、转运。中间环节是建设高效分拣的绿色分拣中心，通过智能磅秤、光选机分拣设备开展精细分拣，实现数据化管理。末端通过集散市场或集散基地对接到下游的“利废企业”，形成“收—分—再利用”垃圾分类回收产业链条[5]。

3.3 资源化处理技术，将垃圾转化为能源与材料

1.能源化利用。焚烧发电技术是将垃圾通过机械炉排或循环流化床等进行焚烧处理，温度控制在850～1 100 ℃范围，垃圾体积减小90%以上，重量减轻80%以上；焚烧垃圾产生的热量加热锅炉产生高温高压蒸汽，带动汽轮发电机组发电，每吨垃圾产生300～500 kW·h电力，焚烧也可作为对外供热，为防止污染，焚烧烟气排入环境中还需要“脱硝+脱酸+吸附+布袋除尘”工艺措施处理，最终控制极臭二噁英的排放浓度应在0.1 ngTEQ/m^3以下，实现垃圾能源化和无害化的目的。厌氧发酵厨余垃圾厌氧发酵利用厌氧微生物新陈代谢于缺氧环境中的作用来将厨余废液中的有机物降解生成沼气；沼气可焚毁用于供热或者上网发电，含有油脂等成分的固体降解产物提取出油脂，提纯制备生物柴油，实现碳循环利用。

2.材料再生。对于生活垃圾的资源化处理，针对不同种类垃圾都有相应的资源化处理方法。对于收集下来的废旧塑料，经过预处理和再造粒处理。首先进行分类，将塑料品种分开，同时除去部分杂质，然后再破碎、清洗。塑料破碎、清洗碎片经烘干处理后，通过挤出机加热，在一定温度下熔化，熔体塑化过模具被拉出一根根纤维，再冷却后锯制出颗粒，成为再生塑料。对废纸的处理回收一般是干法加工废纸，废纸水力破碎为纸浆后，筛选、净化除去残存的塑料、铁钉等杂质。净化过后的纸浆浓缩调制后进入抄造过程，可得到再生纸浆或再生纸产品。有些特殊危险废物（如危险废物焚烧飞灰）因其成分中富含重金属、二噁英等有害成分，比较适合高效的无害化和资源化的方法去对其进行处理。高温熔融技术就是其中一种，很高的温度下，这些飞灰中的二噁英能被完全去除，重金属也被固定于经高温熔融后的产品的玻璃体相中，在得到的产品中重金属是相对安全的，并且得到的原料可制备建筑材料，实现危险废物的全害化处理等[6]。

3.生物处理。黑水虻生物转化法是处理餐厨垃圾的一种生物转化法。黑水虻幼虫食性广、食量大、生长快，在有利条件下，幼虫在旺盛生长期可持续采食。餐厨垃圾须分拣、除杂、破碎制浆后投喂黑水虻幼虫；利用上述黑水虻生物转化法处理餐厨垃圾，可高效将餐厨垃圾转化成昆虫蛋白，黑水虻幼虫中生物质粗蛋白含量高，是水产或畜禽饲料高蛋白来源。

3.4 低碳化与无害化保障

1.运输环节减排。推广新能源环卫车及清运路径优化是降低生活垃圾分类收集运输环节碳排放的重要手段。例如，逐步用纯电动和氢燃料电池环卫车替代已有的柴油车辆，而纯电动、氢燃料电池的全生命周期二氧化碳排放远小于普通汽油、柴油车；清运路径优化可利用遗传算法、强化学习等智能化算法，结合实时路况和预测的垃圾体量优化垃圾清运路径，能够大幅减少全运行过程总行驶里程的20%～30%。实践中利用“车—桩—路”协同策略、智能调度平台，可以在使运输环节减少碳排放的同时，极大降低运输环节的油耗和车辆折旧、维修成本。

2.末端污染控制。在生活垃圾处理处置过程中，生活垃圾焚烧烟气净化、生活垃圾填埋场渗沥液处理处置、垃圾飞灰处理是避免和减少环境污染最关键的环节。焚烧烟气采用“SNCR炉内脱硝+半干法脱酸+活性炭吸附+布袋除尘”，烟气处于850 ℃以上，留足2 s多的时间，使有毒恶臭气体二噁英充分分解，烟气排正常大气中SO_2（24 h平均值）小于80 mg/m^3、NO_x（24 h平均值）小于250 mg/m^3。填埋场渗沥液采用“渗沥液预处理+MBR（膜生物反应器）+NF/RO（纳滤/反滤）”工艺组合处理其较高的有机组分COD、氨氮等，以实现污水达标外排。飞灰中二噁英和重金属属危险废物,飞灰必须经稳定固化（螯合固化适合于稳定固化）达《生活垃圾填埋场污染控制标准》后再运往填埋场核心区垃圾填埋，或进行飞灰水洗处理可利用水泥窑协同处置或高温焚烧、高温烧结法处理飞灰、高温烧结法处理飞灰低温热解。

4 结束语

综上所述，城市生活垃圾资源化的探索是一项需要全社会的共同参与、全员参与的系统工程，需要技术创新的推动，需要先进管理模式的塑造，更需要全民参与到行动中来。从源头少产生到处理末端高品位利用，每一段旅程的抵达都意味着我们向着资源节约型、环境友好型社会又前进了一步。未来还需要更多的努力，更加完善的探索实践，使垃圾分类和资源化回收真正成为城市肌体的组成部分，最终实现人与自然的和谐共生的长期目标，才能绘就“无废城市”的多彩画卷。

参考文献

[1]邓乔云,杨毅,杨进.基于社区实践的城市生活垃圾分类管理研究[J].中国资源综合利用,2024,42(10):168-170.

[2]张煜,蔺自豪.“无废城市”视角下生活垃圾管理问题及优化路径[J].清洗世界,2024,40(10):169-171.

[3]欧阳君华.城市生态环境资源保护和利用综合性规划分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(19):118-120.

[4]陈学武.城市垃圾分类管理及资源化利用策略研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(18):148-149,155.

[5]范双美.共建共享原则下城市生活垃圾分类体系优化研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(16):163-165.

[6]胡汉琴.城市生活污水资源化利用与环保技术研究[J].新农民,2024(22):78-80.

（本文编辑 吴文博）

