

循环经济与固体废弃物资源化利用综述

张 玲

安徽理工大学 安徽淮南

【摘要】随着经济社会快速发展,固体废弃物产生量持续增长,给环境带来巨大压力。循环经济理念为固体废弃物管理提供了新的思路,通过“减量化、资源化、无害化”原则,推动废弃物从传统的末端治理向全过程管理转变。本文系统综述了固体废弃物资源化利用的技术路径、管理政策和实践案例,重点分析了化工园区固废综合利用、城乡有机固废资源化、建筑废弃物再生利用等关键技术进展。研究表明,通过技术创新、政策引导和市场化机制协同推进,固体废弃物资源化利用可显著提升资源利用效率,减少环境污染。未来需要进一步完善标准体系、创新商业模式、加强国际合作,推动固体废弃物资源化利用高质量发展,助力实现碳达峰碳中和目标。

【关键词】循环经济; 固体废弃物; 资源化利用; 废弃物管理; 可持续发展

【收稿日期】2025 年 5 月 8 日

【出刊日期】2025 年 6 月 18 日

【DOI】10.12208/j.aes.20250019

A review of circular economy and solid waste resource utilization

Ling Zhang

Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui

【Abstract】 With the rapid development of the economy and society, the amount of solid waste continues to grow, placing enormous pressure on the environment. The concept of a circular economy provides new ideas for solid waste management by promoting the transformation of waste from traditional end-of-pipe treatment to whole-process management through the principles of "reduction, resource utilization, and harmless treatment." This paper systematically reviews the technical pathways, management policies, and practical cases of resource utilization of solid waste, with a focus on analyzing key technological advancements such as comprehensive utilization of solid waste in chemical parks, resource utilization of urban and rural organic solid waste, and recycled use of construction waste. The study shows that through the coordinated advancement of technological innovation, policy guidance, and market-based mechanisms, resource utilization of solid waste can significantly improve resource efficiency and reduce environmental pollution. In the future, it is necessary to further improve the standard system, innovate business models, and strengthen international cooperation to promote high-quality resource utilization of solid waste and contribute to achieving the carbon peak and carbon neutrality goals.

【 Keywords 】 Circular economy; Solid waste; Resource utilization; Waste management; Sustainable development

引言

随着全球工业化进程的加速和城镇化水平的不断提高,固体废弃物的产生量呈现持续快速增长态势,给生态环境带来了前所未有的压力。在这一背景下,传统的“开采-生产-消费-丢弃”线性经济模式已难以适应可持续发展的要求,循环经济理念应运

而生,为实现固体废弃物的减量化、资源化和无害化处理提供了新的思路和方法。循环经济强调通过优化资源利用方式,实现“资源-产品-再生资源”的闭环循环,最大限度地减少废弃物产生,提高资源利用效率。

固体废弃物作为放错位置的资源,其资源化利

用不仅能够缓解环境压力,还能创造显著的经济效益。根据相关研究,我国每年产生的固体废弃物中蕴含着巨大的资源价值,若能得到有效利用,可替代大量原生资源。特别是在当前推进碳达峰、碳中和的背景下,固体废弃物资源化利用对减少碳排放、促进绿色低碳发展具有重要意义。通过资源化利用,可以减少原材料开采过程中的能源消耗和碳排放,同时避免废弃物填埋或焚烧产生的温室气体排放。

近年来,我国固体废弃物资源化利用技术取得了显著进展。在工业固废方面,赤泥、磷石膏、电镀污泥等难处理废弃物的资源化技术不断创新;在城乡有机固废领域,厌氧发酵、好氧堆肥、黑水虻处理等技术日益成熟;在建筑废弃物方面,再生骨料、再生砖等产品已实现规模化应用。这些技术进步为固体废弃物的高效资源化利用提供了有力支撑。与此同时,相关政策法规体系也在不断完善。《循环经济促进法》的修订、《“十四五”循环经济发展规划》的出台,以及各地制定的建筑垃圾、餐厨垃圾等专项管理办法,为固体废弃物资源化利用创造了良好的制度环境。

然而,我国固体废弃物资源化利用仍面临诸多挑战。首先,技术水平参差不齐,部分领域的资源化利用效率较低,产品附加值不高。其次,市场化机制不健全,废弃物资源化利用的经济效益尚未充分显现。再次,管理体系有待完善,部门职责交叉、监管不到位等问题依然存在。此外,公众参与度不高,分类投放意识薄弱,也制约了资源化利用效果的提升。

从国际视角来看,发达国家在固体废弃物资源化利用方面积累了丰富的经验。德国通过建立完善的双元回收系统,实现了包装废弃物的高效回收利用;日本推行“循环型社会”建设,形成了完善的废弃物分类回收体系;瑞典通过先进的垃圾焚烧发电技术,使生活垃圾资源化率达到 99%以上。这些国际经验为我国推进固体废弃物资源化利用提供了有益借鉴。

在此背景下,本文旨在系统梳理循环经济理念下固体废弃物资源化利用的研究进展和实践经验。首先,将分析固体废弃物资源化利用的技术体系,包括不同种类废弃物的处理技术和资源化途径;其次,探讨政策支持和管理体系建设,分析如何通过制度创新推动资源化利用;再次,总结行业应用和区域实践案例,提炼可推广的成功经验;最后,展望

未来发展趋势,提出推进固体废弃物资源化利用的政策建议。

通过系统研究,本文期望能够为政府决策、企业实践和公众参与提供参考,推动固体废弃物资源化利用水平不断提升,助力生态文明建设和绿色低碳发展。同时,也希望为相关领域的学术研究提供新的思路和方法,促进循环经济理论的深化和实践的创新。最终,通过多方共同努力,实现固体废弃物从“治理负担”向“资源宝库”的转变,为建设美丽中国和实现可持续发展目标作出贡献。

需要特别说明的是,本文的研究将立足于中国国情,同时借鉴国际先进经验,注重理论与实践相结合,力求提出具有可操作性的对策建议。在研究过程中,将采用文献分析、案例研究、比较分析等方法,确保研究结论的科学性和可靠性。希望通过本研究,能够为推动我国固体废弃物资源化利用提供有益参考。

1 固体废弃物资源化技术体系研究

固体废弃物资源化技术体系的建立和完善是实现循环经济的关键环节。随着科技创新持续推进,各类固体废弃物的资源化利用技术不断创新突破,形成了多层次、多路径的技术体系。本章将系统梳理主要固体废弃物资源化技术的研究进展和应用实践。

化工园区作为工业集聚区,其固体废弃物的综合治理尤为重要。张琳娜(2024)的研究表明,基于循环经济理念的化工园区固体废弃物综合利用需要建立分类收集、分级利用的技术体系。通过构建废弃物交换平台,实现园区内企业间废弃物的资源化循环,不仅可以降低处理成本,还能创造经济效益。该研究特别强调,针对不同性质的化工固废应采取差异化的资源化路径:对于高热值废弃物优先进行能源化利用,对于含有价金属的废弃物重点开展金属回收,对于惰性废弃物则考虑作为建筑材料原料。这种按质利用的模式显著提升了资源化效率,为化工园区绿色循环发展提供了技术支撑^[1]。

在耐火材料废弃物资源化方面,最新的研究展示了创新性的技术路径。Zhi 等(2024)通过系统实验发现,通过精确控制耐火材料废弃物的粒径分布,并添加适量 refractory waste,可以显著提高 Al₂O₃-C 耐火材料的机械强度和抗热震性能。这项研究采

用等静压成型技术,实现了废弃物的高附加值利用。特别值得关注的是,该研究确立了最佳工艺参数:当废弃物添加量控制在 15%-20%,粒径分布采用三级配比时,制得的耐火材料产品性能最优。这一技术不仅解决了耐火材料废弃物的处置难题,还降低了新材料的生产成本,实现了环境效益和经济效益的双赢^[2]。

城乡有机固废的资源化利用是当前研究的热点领域。杨东海等(2024)系统总结了我国城乡多源有机固废资源化利用的技术路径。研究指出,针对农村地区的畜禽粪便、秸秆等农业废弃物,适宜采用厌氧发酵产沼技术,实现能源化利用;对于城镇餐厨垃圾,则推荐采用好氧堆肥或黑水虻养殖等技术,生产有机肥或蛋白饲料。该研究特别强调,需要根据有机固废的特性差异,建立分类收集、分类处理的技术体系。同时,研究还提出了“集中处理与分布式处理相结合”的模式,即在人口密集区建设大型处理设施,在偏远地区推广小型化处理设备,这一模式有效解决了有机固废处理的规模经济问题^[3]。

城市废弃物管理是一个系统工程,需要从多个维度进行优化。Zhou(2024)通过对中国城市废弃物管理案例的深入分析,提出了可持续的城市废弃物管理框架。研究发现,成功的城市废弃物管理需要实现技术系统、政策体系和社会参与的协同。在技术层面,应建立覆盖分类收集、运输、处理和处置的全链条技术体系;在政策层面,需要完善法律法规、经济激励和监管机制;在社会层面,则要加强公众教育和参与。该研究特别指出,数字化技术的应用可以显著提升管理效率,例如通过智能分类设备提高分类准确性,利用大数据优化收运路线等。这些创新实践为其他城市提供了有益借鉴^[4]。

赤泥作为氧化铝生产过程中产生的大宗工业固体废弃物,其资源化利用一直是个技术难题。Jia 等(2024)系统综述了赤泥的工程化利用技术路径,提出了三个主要方向:建筑材料制备、有价金属回收和土壤化改良。在建筑材料方面,赤泥可用于生产砖瓦、水泥等产品;在金属回收方面,可提取铁、铝、钛等有价元素;在土壤改良方面,通过中和处理可用于矿区生态修复。该研究特别强调,不同来源的赤泥性质差异较大,需要根据具体特性选择合适的资源化路径。同时,研究还指出,赤泥的资源化利

用应该遵循“以废治废”的原则,例如利用赤泥处理酸性废水,实现双重环境效益^[5]。

综上所述,固体废弃物资源化技术体系正在不断完善和创新。从化工园区到城乡有机固废,从耐火材料到赤泥,各类固体废弃物都找到了适合的资源化路径。这些技术进步为推进循环经济、建设资源节约型社会提供了有力支撑。未来还需要进一步加强技术研发,突破难处理废弃物资源化的技术瓶颈,同时注重技术的经济性和适用性,推动资源化技术的大规模应用。

需要特别指出的是,固体废弃物资源化技术的发展必须与市场需求相结合。一方面要通过技术创新提高资源化产品的质量和附加值,另一方面要培育资源化产品市场,打通从废弃物到产品的整个链条。此外,还需要建立完善的标准体系,规范资源化技术的应用和产品的使用,确保环境安全和人体健康。只有技术、市场、标准协同发展,才能实现固体废弃物资源化利用的可持续发展。

从更宏观的视角来看,固体废弃物资源化技术体系的建设还需要与区域发展规划相衔接。不同地区的产业结构、废弃物特性、市场需求存在差异,需要因地制宜制定技术路线。例如,在工业集聚区重点发展工业固废资源化技术,在农业区重点发展农业废弃物利用技术,在城市区重点发展生活垃圾资源化技术。这种差异化的发展策略可以更好地发挥技术效益,促进区域循环经济体系的构建。

最后,固体废弃物资源化技术的发展还需要加强国际合作。通过引进消化国外先进技术,参与国际标准制定,开展联合研发等方式,提升我国固体废弃物资源化技术的国际竞争力。同时,也要推动我国成熟的技术和设备走出去,为全球固体废弃物治理贡献中国智慧和方案。

2 重点领域资源化利用实践进展

固体废弃物资源化利用在多个重点领域取得了显著进展,这些实践不仅验证了技术可行性,更为规模化推广积累了宝贵经验。本章将系统梳理有机固废、建筑废弃物、危险废物等关键领域的资源化利用实践进展。

近年来,有机固废处理与资源化利用受到广泛关注。2024 年全国有机固废处理与资源化利用大会的召开,标志着该领域进入快速发展阶段。本次大

会集中展示了厌氧消化、好氧堆肥、昆虫处理等多种技术路线的创新成果。特别值得注意的是,大会重点探讨了城乡有机固废协同处理模式,通过建立区域性的处理中心,实现规模化处理和资源化利用。与会专家强调,有机固废资源化利用要注重产品多元化开发,除传统的沼气、有机肥外,还可提取高附加值生物基化学品,提升经济效益。这些探讨为有机固废资源化利用提供了新的思路和方向^[6]。

在固体废弃物制备人造土壤方面,陈君等(2024)的研究取得了重要突破。该研究系统评估了利用建筑渣土、河道淤泥、污泥等固体废弃物制备人造土壤的技术可行性。通过优化配方和工艺参数,开发出适用于不同用途的人造土壤产品,包括绿化种植土、农田改良土等。研究特别关注重金属控制问题,通过添加稳定剂和采用特定工艺,确保人造土壤的环境安全性。实践表明,这项技术不仅解决了固体废弃物处置难题,还为城市绿化和土壤改良提供了优质材料,实现了环境效益和经济效益的统一^[7]。

橡胶纤维加筋膨胀土技术的开发为建筑废弃物资源化利用开辟了新途径。王荣昌(2024)通过系统研究,建立了橡胶纤维加筋膨胀土的临界状态及峰值抗剪强度估算模型。该研究将废旧轮胎加工成的橡胶纤维与膨胀土按特定比例混合,显著改善了膨胀土的工程特性。实验数据表明,当橡胶纤维掺量在0.5%-1.0%时,加筋土体的抗剪强度提高约30%,同时保持良好的变形特性。这一技术成功应用于路基填筑工程,既消耗了大量废旧轮胎,又解决了膨胀土地区工程建设难题,显示出良好的推广应用前景^[8]。

建筑废弃物资源化利用的价值评估是推动该领域健康发展的重要基础。胡晓丽(2024)通过构建科学的预测模型和评估体系,对建筑废弃物产生量及其资源化利用价值进行了系统研究。该研究建立了基于灰色预测和神经网络相结合的产量预测模型,准确率达到85%以上。在价值评估方面,创新性地引入了全生命周期评价方法,综合考虑环境效益和经济效益。研究结果显示,建筑废弃物资源化利用的潜在价值被严重低估,如果考虑环境外部性,其实际价值可比传统评估方法提高40%以上。这一研究为建筑废弃物资源化项目的投资决策提供了科学依据^[9]。

电镀污泥的资源循环利用技术取得重要进展。郭宗庆等(2024)开发了高效回收电镀污泥中有价金属的新工艺。该工艺采用湿法冶金技术,通过优化浸出条件和分离纯化步骤,实现了铜、镍、铬等金属的高效回收,回收率均达到90%以上。特别值得一提的是,该技术还实现了废水的循环利用和残余物的无害化处理,真正实现了全过程清洁生产。目前,该技术已在多个电镀园区推广应用,不仅解决了电镀污泥的污染问题,还为企业创造了可观的经济效益^[10]。

这些实践进展表明,固体废弃物资源化利用正在从理论探索走向工程实践,从单一技术突破走向系统化解决方案。在各个重点领域,技术创新与工程实践相互促进,推动资源化利用水平不断提升。然而,要实现更大范围的推广应用,还需要解决一些共性问题。

首先,需要建立更加完善的标准体系。目前,部分资源化产品缺乏统一的质量标准,影响了市场接受度。以人造土壤为例,需要根据不同用途制定相应的理化指标要求和环境安全标准。其次,要突破经济性瓶颈。通过技术创新降低处理成本,同时开发高附加值产品,提升项目的经济效益。再次,要创新商业模式。推广第三方治理、环境绩效合同管理等模式,吸引更多社会资本参与。

从政策层面看,需要进一步完善激励机制。除了现有的补贴政策外,还可考虑建立绿色采购制度,优先采购资源化产品。同时,要严格落实生产者责任延伸制度,促使企业从源头减少废弃物产生,并积极参与资源化利用。

展望未来,重点领域的资源化利用实践将继续深化。一方面,要推动现有技术的优化升级,提高资源化效率和产品质量;另一方面,要加强跨领域技术融合,如将人工智能、大数据等新技术应用于废弃物分类和处理过程。此外,还要注重区域协同,通过建立跨区域的资源化利用网络,实现规模效益。

总之,重点领域的资源化利用实践进展显著,为全面推进固体废弃物资源化利用奠定了坚实基础。通过持续的技术创新、模式创新和政策创新,固体废弃物资源化利用必将为实现循环经济和可持续发展作出更大贡献。

3 政策支持与管理体系建设

固体废弃物资源化利用的深入推进,离不开完善的政策支持体系和管理制度的保障。近年来,我国在固体废弃物管理领域的政策体系不断健全,管理机制持续创新,为资源化利用创造了良好的制度环境。本章将系统分析当前政策支持与管理体系建设的进展与特点。

化工废盐与废弃PVC的协同资源化处理研究展示了政策引导下技术创新与产业实践的有机结合。王东旭(2024)通过系统研究,开发了化工废盐与废弃PVC协同处理的新工艺。该研究不仅解决了两种危险废物的处置难题,还实现了资源的高效回收。值得注意的是,这一技术的成功开发得益于危险废物管理政策的完善,特别是危险废物转移联单制度和经营许可证制度的严格执行,为技术创新提供了明确的政策框架。研究结果表明,在现有政策体系下,通过优化工艺参数,可以实现废盐中钠元素的回收利用和PVC中氯元素的安全处置,为同类废物的协同处理提供了技术范例^[11]。

在资金支持政策方面,国家发改委推出的循环经济助力降碳项目投资补助政策产生了显著效果。根据政策规定,符合条件的循环经济项目最高可获得1亿元的中央预算内投资补助。这一政策极大地调动了企业参与固体废弃物资源化利用的积极性。2024年的实施情况表明,该政策特别注重大宗固体废弃物的规模化利用,重点支持建筑垃圾、尾矿、煤矸石等废弃物的资源化项目。政策实施过程中,通过建立严格的申报和评审机制,确保资金投向技术先进、效益显著的项目,发挥了良好的引导作用。这种以奖代补的方式,有效降低了企业的投资风险,推动了资源化利用项目的落地实施^[12]。

建筑垃圾资源化利用的地方实践为管理体系创新提供了有益经验。漳州市制定的建筑垃圾资源化利用实施方案,体现了地方政府在固体废弃物管理中的积极探索。该方案建立了从产生、运输到处置的全过程管理制度,特别强调了源头分类的重要性。方案要求新建工程项目必须编制建筑垃圾减量化和资源化利用方案,并将相关要求纳入施工许可审批环节。同时,通过建立建筑垃圾资源化利用企业名录和产品推荐目录,规范市场秩序,促进资源化产品的推广应用。这一地方实践表明,将管理要求嵌入项目建设流程,是实现建筑垃圾有效管理的重要

途径^[13]。

生物技术在固体废弃物处理中的应用为管理体系建设提供了新的思路。吕欣蓝(2024)关于黑水虻幼虫处理生物絮团对虾养殖系统固体废弃物的研究,展示了生物处理的优势。该研究不仅验证了黑水虻处理技术的有效性,还探讨了相应的管理要求。研究表明,生物处理技术的成功应用需要建立配套的质量控制体系,包括虫种筛选、饲养环境控制、产物质量检测等环节。这一研究提示我们,对于创新的废弃物处理技术,需要同步建立相应的技术标准和管理规范,确保处理过程的安全性和处理产物的质量稳定性。这种技术与管理协同创新的模式,值得在其他领域推广^[14]。

制砖行业的固体废弃物资源化利用实践反映了标准体系建设的重要性。Ge等(2024)对制砖固体废弃物资源化利用的研究表明,标准化是推动行业健康发展的重要保障。该研究系统总结了利用粉煤灰、煤矸石、污泥等固体废弃物生产砖瓦的技术路径,并强调了产品标准的关键作用。研究发现,虽然固体废弃物制砖技术已相对成熟,但由于缺乏统一的产品标准,不同企业产品质量参差不齐,影响了市场接受度。因此,研究建议加快制定固体废弃物建材产品的质量标准和应用技术规范,为产品推广应用提供技术依据。这一建议对推动整个固体废弃物资源化利用行业的规范化发展具有重要参考价值^[15]。

综合来看,我国固体废弃物资源化利用的政策支持与管理体系建设呈现出以下几个特点:

首先,政策体系更加完善。从中央到地方,形成了多层次、多维度的政策框架。中央层面提供宏观指导和资金支持,地方层面结合实际情况制定具体实施方案。这种上下联动的政策体系,既保证了政策的统一性,又兼顾了地方特色。

其次,管理手段不断创新。除了传统的行政许可和处罚措施外,越来越多地运用经济激励、信息公示、信用管理等方式。特别是通过建立固体废弃物管理信息系统,实现了全过程可追溯,提高了管理效率。

第三,标准规范逐步健全。针对不同类型的固体废弃物资源化利用,陆续制定了一系列技术标准和管理规范。这些标准规范的实施,为资源化利用提供了技术支撑,保障了处理过程和产品的质量安

全。

然而，当前的政策支持与管理体系建设仍存在一些需要完善的地方：

一是政策协调性有待加强。不同部门出台的政策有时存在交叉或矛盾，影响了实施效果。需要建立更好的部门协调机制，确保政策的一致性和协同性。

二是监管能力需要提升。特别是对分散化、小规模的资源化利用项目，监管覆盖不足。应创新监管方式，运用现代信息技术提高监管效能。

三是公众参与机制不够完善。固体废弃物管理需要社会各界的共同参与。应建立健全公众参与渠道，发挥社会监督作用。

4 行业应用与区域实践创新

固体废弃物资源化利用在不同行业和区域的实践创新，充分展现了循环经济理念的落地成效。这些实践不仅解决了废弃物处置难题，还创造了显著的经济和社会效益，为全面推进资源循环利用积累了宝贵经验。本章将重点分析水电行业、碳捕集、城区改造等领域的创新实践，以及多源固废协同利用的区域模式。

水电行业在推进循环经济方面展现出前瞻性的实践创新。Wu（2024）的研究系统总结了水电行业践行循环经济的可持续实践和未来前景。研究表明，水电站在建设和运营过程中产生的固体废弃物，包括开挖料、混凝土废料等，都可通过创新技术实现资源化利用。特别值得关注的是，一些水电站将产生的废弃混凝土加工成骨料，用于当地基础设施建设，既降低了废弃物处置成本，又减少了新材料开采。此外，研究还指出，水电行业正在探索将退役水电站的构件进行再利用，如将涡轮机等设备改造为装饰艺术品或教学器材。这些创新实践为能源行业的绿色转型提供了有益借鉴^[16]。

碳捕集与封存领域的技术比较研究为工业固废资源化提供了新思路。Wang（2024）通过对比研究直接固体-气体碳酸化和直接水相碳酸化两种碳捕集技术，揭示了其在固体废弃物处理中的应用潜力。研究发现，利用钢渣、粉煤灰等工业固废作为碳捕集中和剂，既可实现二氧化碳的固定，又能改善固废的工程特性。这种“以废治废”的模式，在电厂和钢铁厂等碳排放大户中具有广阔应用前景。实践表

明，采用固废基碳捕集材料，可使碳捕集成本降低20%以上，同时实现固废的增值利用。这一技术创新为工业固废的高值化利用开辟了新途径^[17]。

城区改造废弃物资源化利用的产业化实践取得了显著进展。蔡芮等（2023）开展的“综合利用城区改造废弃物生产高效节能环保建筑材料关键工艺研究及产业化开发”项目，建立了完整的产业链条。该项目创新性地将建筑废弃物分类处理后，通过优化配比和特殊工艺，生产出保温隔热性能优异的环保建材。特别值得一提的是，项目采用了模块化生产线设计，可根据废弃物特性灵活调整工艺参数，保证了产品的稳定性和适应性。目前，该技术已在多个旧城改造项目中推广应用，不仅消化了大量建筑垃圾，还为城市建设提供了绿色建材，实现了经济效益和环境效益的双赢^[18]。

多源固废协同利用的区域实践展示了系统化解决方案的优越性。石垚等（2023）以东莞海心沙国家资源循环利用示范基地为例，深入研究了城市多源固废协同利用与区域绿色循环发展模式。该基地创新性地构建了“分类收集-精细分选-协同处理-高值利用”的全链条技术体系，实现了生活垃圾、工业固废、建筑垃圾等不同来源废弃物的协同处理。实践表明，通过建立固废资源化产业园区，可以形成规模效应，降低处理成本，同时促进产业链上下游协同发展。这一模式为其他地区推进固体废弃物资源化利用提供了可复制的经验^[19]。

城市固体废弃物处理及资源化利用途径的研究进一步丰富了区域实践的的内涵。李大明（2023）系统分析了城市固体废弃物的处理技术路线和资源化利用途径。研究特别强调了因地制宜的重要性，指出不同城市应根据自身产业结构、废弃物特性和市场需求，选择适合的资源化路径。例如，工业城市可重点发展工业固废资源化技术，旅游城市可侧重餐厨垃圾和包装废弃物的循环利用。该研究还提出建立区域协同机制的建议，通过跨区域合作，实现废弃物处理设施的共享和资源化产品的市场互通，提升整体资源化效率^[20]。

这些行业应用与区域实践创新呈现出以下几个显著特点：

首先，技术创新与模式创新深度融合。各行业和地区不仅注重新技术的研发应用，还积极探索适

合的管理模式和商业模式。如水电站将废弃物资源化与生态旅游相结合,城区改造项目将建筑垃圾处理与房地产开发联动,形成了良性发展机制。

其次,系统化解解决方案成为趋势。从单一废弃物处理向多源固废协同处理发展,从末端治理向全过程管理延伸。这种系统化思维有效提升了资源化利用的整体效益。

第三,产业协同效应日益显现。通过构建资源循环利用产业链,实现了废弃物处理与资源再生产产业的融合发展。如东莞海心沙基地就形成了废弃物处理、资源再生、产品制造等环节紧密衔接的产业体系。

然而,行业应用与区域实践也面临一些挑战:

一是技术适用性问题。某些在特定行业或区域成功的技术,在其他场景下可能难以直接应用。需要加强技术评估和适应性改进。

二是市场培育不足。资源化产品的市场认可度有待提高,需要建立健全产品质量标准和认证体系。

三是政策支持仍需加强。特别是在跨区域合作、产业协同等方面,需要完善相关政策和协调机制。

5 技术创新与系统优化研究

固体废弃物资源化利用领域的技术创新与系统优化研究正在向纵深发展,不仅关注单项技术的突破,更注重整个资源化系统的协同优化。本章将系统分析水路运输、生物处理、含油污泥资源化等关键环节的技术创新,以及建筑废弃物回收网络优化等系统化研究进展。

水路运输在固体废弃物资源化利用系统中扮演着重要角色。Zhang 等(2023)对水路运输阻抗及其影响因素进行了系统研究,为优化固体废弃物的跨区域资源化利用提供了重要参考。研究表明,水路运输相比陆路运输具有成本低、运量大、能耗少等优势,特别适合大宗固体废弃物的长距离运输。然而,运输时效性差、受天气影响大等因素制约了其广泛应用。该研究通过建立多目标优化模型,提出了降低运输阻抗的综合方案,包括优化码头布局、改进装卸工艺、开发专用运输船舶等。这些创新措施可使水路运输效率提升 25%以上,为构建经济高效的固体废弃物区域协同处理体系提供了技术支撑^[21]。

生物处理技术在固体废弃物资源化中的应用范围不断拓展。Bi 等(2023)系统综述了生物处理技

术在固体废弃物路基中的应用原理和实践效果。研究发现,通过特定的微生物菌剂处理,可以显著改善某些固体废弃物作为路基材料的工程性能。例如,对建筑垃圾再生骨料进行生物固化处理,可提高其抗压强度和耐久性;对污泥进行生物稳定化处理,可消除异味并改善力学特性。该研究还建立了生物处理效果的预测模型,为工程应用提供了理论指导。这些技术创新不仅拓展了固体废弃物的资源化途径,还为基础设施建设提供了新的材料选择^[22]。

含油污泥资源化利用的基础研究取得重要突破。勾星月(2023)针对页岩气开采产生的含油污泥,开发了高效资源化利用新技术。该研究通过优化热解条件和催化剂选择,实现了油品的高效回收和残渣的安全处置。创新性地采用阶梯式热解工艺,使油品回收率达到 85%以上,同时产生的残渣满足建材原料要求。研究还建立了全过程环境影响评价模型,证实该技术具有显著的环境效益。这一突破为油气开采行业的固体废弃物治理提供了新的技术选择,对推动能源行业绿色发展具有重要意义^[23]。

建筑废弃物资源化回收网络的优化研究展现出系统化思维的重要性。解金昊(2023)以 L 公司为例,对建筑废弃物资源化回收网络节点布局进行了深入研究。通过建立多目标规划模型,综合考虑运输成本、处理成本、环境影响等因素,提出了最优的回收站点布局方案。该研究创新性地引入了时空优化概念,根据城市建设周期动态调整网络结构。研究表明,科学的网络布局可使整体运营成本降低 15%-20%,同时显著提升资源化效率。这一研究为建筑废弃物资源化体系的优化设计提供了方法论指导^[24]。

固体废弃物在环境修复中的应用研究拓展了资源化利用的新领域。于秀明等(2023)探索了利用固体废弃物吸附含铀(VI)废水的应用效果及性能机制。研究发现,经过适当改性的粉煤灰、钢渣等工业固废对铀离子表现出良好的吸附性能,最高去除率可达 95%以上。该研究不仅阐明了吸附机理,还建立了吸附动力学模型,为工程应用提供了理论依据。这一技术创新既解决了放射性废水处理难题,又实现了固体废弃物的高值化利用,显示出良好的应用前景^[25]。

6 系统优化与未来发展展望

随着固体废弃物资源化利用实践的深入推进,

系统优化和未来发展趋势成为关注焦点。本章将基于现有研究成果,系统分析清洁生产理念落实、PET化学升级回收、餐厨废弃物管理等领域的创新工具应用,并对未来发展方向进行展望。

清洁生产理念在固体废物治理中的高效落实路径研究显示,需要建立全生命周期的管理体系。叶思颖(2023)指出,从产品设计阶段就应考虑废弃物的可回收性和可降解性,通过生态设计减少末端治理压力。在制造环节,要推行绿色生产工艺,减少固体废物的产生。研究表明,通过实施清洁生产审核和环境管理体系认证,企业可降低15%-30%的固体废物产生量。这种源头防控理念的落实,需要政策引导、技术支持和企业自觉的协同推进^[26]。

PET化学升级回收技术的研究为塑料废弃物资源化开辟了新途径。Yang(2023)系统综述了将PET废弃物转化为高附加值化学品的各种技术路线。包括糖醇解、甲醇解等化学回收方法,可以将PET分解为单体或其他有用化学品。特别值得注意的是,新型催化剂的开发使反应条件更加温和,回收效率显著提高。这些技术创新不仅解决了塑料污染问题,还实现了碳资源的循环利用,符合循环经济发展方向^[27]。

餐厨废弃物管理工具的创新推动了资源化效率的提升。Yin等(2023)开发了一系列智能管理工具,包括基于物联网的收运系统、基于大数据的产生量预测模型等。这些工具的应用使餐厨废弃物收运效率提高20%以上,资源化利用率达到85%以上。研究特别强调,管理工具的创新需要与商业模式创新相结合,才能实现可持续发展。例如,通过建立餐厨废弃物处理与有机农业的联动机制,形成闭环循环系统^[28]。

磷石膏资源化利用现状分析揭示了工业固废资源化的系统性问题。侯慧敏等(2022)采用物质流分析方法,系统追踪了磷石膏的产生、处理和利用全过程。研究发现,虽然磷石膏资源化技术不断进步,但整体利用率仍不足40%。这主要是由于资源化产品市场认可度低、运输成本高等系统性问题。研究建议,需要从政策扶持、标准制定、市场培育等多方面协同发力,才能突破资源化瓶颈^[29]。

煤基产业的资源循环利用与低碳流程再造研究展示了传统产业绿色转型的路径。许文娇等(2023)

提出,通过流程再造和技术创新,实现煤基固体废弃物的源头减量和资源化利用。包括开发低废生产工艺、推进废弃物协同处置、构建产业循环链等具体措施。研究表明,这种系统化改造可使煤基产业的固体废物综合利用率提升至70%以上,同时显著降低碳排放^[30]。

高湿固体废物水热炭化处理技术的研究为有机固废处理提供了新的解决方案。刘志鹏等(2022)系统分析了水热炭化技术的原理、工艺条件及产物特性。研究发现,通过控制反应温度、时间等参数,可以定向调控水热炭的品质,使其适用于土壤改良、吸附材料等不同用途。该技术特别适合处理含水率高的有机废弃物,具有能耗低、产物价值高等优势^[31]。

盐碱地改良实践案例显示了固体废物资源化利用在生态修复领域的潜力。鲍雅辉(2022)报道了利用固体废物改良盐碱地的成功实践。通过将特定比例的粉煤灰、脱硫石膏等工业固废与土壤混合,显著改善了盐碱地的理化性质。这种“以废治废”的模式,既消纳了固体废物,又改善了生态环境,实现了双赢^[32]。

工业固体废物在混凝土中的应用研究持续推进。王晨晨等(2022)综述了不同工业固废对混凝土性能的影响规律。研究发现,粉煤灰、矿渣等废料可以部分替代水泥,改善混凝土的工作性和耐久性。然而,不同来源的固废性能差异较大,需要建立更加精确的配合比设计方法^[33]。

固体废物再利用系统效率评价研究为管理决策提供了科学依据。陈帆(2022)构建了包含环境效益、经济效益、社会效益的多维度评价指标体系。通过实证研究发现,当前固体废物再利用系统的整体效率仍有较大提升空间,特别是在资源化产品的市场价值实现方面存在明显短板^[34]。

园林废弃物资源化循环利用技术研究丰富了有机固废处理技术体系。孙晓杰等(2020)系统总结了堆肥、基质生产、能源化利用等多种技术路径。研究强调,要根据园林废弃物的特性选择适当的资源化方式,同时注重产品的市场化开发^[35]。

畜禽养殖业固体废物资源化利用研究关注农业源废弃物的处理。焦亚茹(2015)以天津市为例,分析了规模化养殖场固体废物处理现状。研究指出,需要建立适合不同规模的资源化模式,包括沼

气工程、有机肥生产等^[36]。

区域循环经济实践研究为系统优化提供了重要参考。徐明升（2014）以平顶山市为例，探讨了基于循环经济理念的固体废弃物管理模式。研究强调，要结合区域产业特点，构建特色化的循环经济体系^[37]。

逆向物流激励机制研究关注回收体系建设的动力问题。田婷（2015）通过建模分析，提出了促进废弃物回收的激励机制设计方案。包括押金返还、处理费补贴等多种政策工具^[38]。

城市矿产理论研究为固体废弃物资源化提供了理论支撑。王昶等（2014）系统阐述了城市矿产的概念内涵和发展路径。研究指出，要重视废弃物中蕴含的资源价值，通过技术创新实现高效提取^[39]。

资源化管理体系研究从系统角度提出优化建议。欧阳丰瑞（2007）构建了包含法律法规、经济政策、技术标准等要素的管理框架。这一研究为后续政策制定提供了重要参考^[40]。

基于以上研究，固体废弃物资源化利用的未来发展将呈现以下趋势：

首先，技术创新将更加注重系统性和协同性。从单项技术突破向技术集成创新转变，形成整体解决方案。

其次，智能化、数字化技术将深度应用。通过物联网、大数据、人工智能等技术，实现废弃物管理的精准化和智能化。

第三，产品导向型资源化模式将得到推广。更加注重资源化产品的市场价值开发，提升经济效益。

第四，政策体系将更加完善。建立涵盖源头减量、过程控制、末端治理的全过程政策框架。

第五，国际合作将进一步加强。在全球范围内分享经验、协调政策，共同推进固体废弃物治理。

为实现这些发展目标，需要采取以下措施：

一是加大科技创新投入，突破关键核心技术瓶颈。

二是完善法律法规体系，强化制度保障。

三是培育资源化产品市场，建立绿色消费体系。

四是加强宣传教育，提升公众参与度。

五是推动国际合作，共享发展经验。

总之，通过系统优化和技术创新，固体废弃物资源化利用将迈向更高质量的发展阶段，为生态文明建设和可持续发展作出更大贡献。

参考文献

- [1] 张琳娜. 基于循环经济的化工园区固体废弃物综合利用研究[J].生态与资源,2024,(12):54-56.
- [2] Zhi G ,Lei P ,Zuochuang W , et al.The Influence of Particle Size Distribution and the Addition of Refractory Waste on the Mechanical Strength and Thermal Shock Resistance of Al₂O₃-C Refractory Formed by Isostatic Pressing[C]//中国金属学会,中国硅酸盐学会,中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司.第九届国际耐火材料学术会议文集.Puyang Refractories Group Co., Ltd.,2024:323-328.
- [3] 杨东海,刘晓光,戴晓虎. 我国城乡多源有机固废资源化利用研究[J].中国工程科学,2024,26(06):202-209.
- [4] Zhou Z .Sustainable Waste Management in Urban Area——A Case Study of the Waste Management of the Cities in China[C]//Comenius University in Bratislava.Proceedings of the 8th International Conference on Economic Management and Green Development (part4) .Qiqihar University, Faculty of Architecture and Civil Engineering,2024:114-124.
- [5] Jia K ,Zhou Z ,Singh V S , et al. A review of the engineered treatment of red mud: Construction materials, metal recovery, and soilization revegetation[J].Results in Engineering,2024, 24102927-102927.
- [6] 牛方,朱延平,李盈颀. 2024 年全国有机固废处理与资源化利用大会在上海召开[J].中国纺织,2024,(07):100-101.
- [7] 陈君,彭思伟,张伟军. 固体废弃物制备人造土壤研究进展与展望[J].能源环境保护,2024,38(05):58-66.
- [8] 王荣昌.橡胶纤维加筋膨胀土临界状态及峰值抗剪强度估算模型研究[D].青岛理工大学,2024.
- [9] 胡晓丽.建筑废弃物产量预测与资源化利用价值评估研究[D].东华理工大学,2024.
- [10] 郭宗庆,王梅.电镀污泥的资源循环利用技术[C]//中国环境科学学会,中国光大国际有限公司.中国环境科学学会 2024 年科学技术年会论文集(二).东北大学冶金学院辽宁省冶金资源循环科学重点实验室,2024:291-295.
- [11] 王东旭.化工废盐与废弃 PVC 协同资源化处理研究[D].天津理工大学,2024.
- [12] 国家发改委: 循环经济助力降碳项目最高可获得中央预算内 1 亿元投资补助[J].再生资源与循环经济,2024,

- 17(04):33.
- [13] 蔡柳楠,何娟,陈锦新. 漳州市人民政府办公室关于印发漳州市建筑垃圾资源化利用实施方案的通知[J].漳州市人民政府公报,2024,(03):44-50.
- [14] 吕欣蓝.黑水虻 (*Hermetia illucens*) 幼虫处理生物絮团对虾养殖系统固体废弃物效果研究[D].上海海洋大学,2024.
- [15] Ge H ,Zhang J ,Wu Z .Review of Solid Waste Resource Utilization for Brick-making[C]//Universiti Tun Hussein Onn Malaysia,Malaysia.第四届环境资源与能源工程国际学术会议论文集.School of Resources and Environment Engineering, Jiangxi University of Science and Technology,; 2024:342-347.
- [16] Wu J .Embracing circular economy concepts in hydropower generation:A review of sustainable practices and future prospect[C]//Department of Civil Engineering,University of Birmingham.Proceedings of the 4th International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering (part2).Guangdong Country Garden School,;2024:460-466.
- [17] Wang J .Comparative study of direct solid-gas carbonation and direct aqueous carbonation for carbon capture and storage[C]//Department of Civil Engineering,University of Birmingham.Proceedings of the 4th International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering (part1) .Department of Chemical Engineering,The University of Manchester,;2024:2-9.
- [18] 蔡芮,综合利用城区改造废弃物生产高效节能环保建筑材料关键工艺研究及产业化开发.甘肃省,秦安县弘图建材有限公司,2023-12-27.
- [19] 石垚,李会泉,陈少华,等. 城市多源固废协同利用与区域绿色循环发展研究——以东莞海心沙国家资源循环利用示范基地为例[J].中国科学院院刊,2023,38(12):1804-1817.
- [20] 李大明. 城市固体废弃物处理及资源化利用途径研究[J].造纸装备及材料,2023,52(06):173-175.
- [21] Zhang S ,He X ,Ke J .Research Review of Impedance and The Influencing Factors on Waterway Transport[C]//中国科学技术协会,交通运输部,中国工程院,湖北省人民政府 .2023 世界交通运输大会(WTC2023)论文集(下册).School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology,;2023:643-658.
- [22] Bi W ,Cao X ,Li J .Review on Principle and Application of Bio-Treatment on Solid Waste Soils as Road Subgrade[C]//中国科学技术协会,交通运输部,中国工程院,湖北省人民政府 .2023 世界交通运输大会(WTC2023)论文集(上册).College of Traffic & Transportation,Chongqing Jiaotong University;School of Materials Science and Engineering,Chongqing Jiaotong University;School of Civil Engineering,Chongqing Jiaotong University,;2023:259-267.
- [23] 勾星月.页岩气开采产生的含油污泥资源化利用基础研究[D].重庆大学,2023.
- [24] 解金昊.L 公司建筑废弃物资源化回收网络节点布局研究 [D].济南大学,2023.
- [25] 于秀明,朱文韬,杨斌,等. 固体废弃物吸附含铈(VI)废水的应用及性能[J].精细化工,2023,40(12):2553-2564+2576.
- [26] 吁思颖. 研究固体废物治理如何高效落实清洁生产理念 [J].清洗世界,2023,39(04):147-149.
- [27] Yang W .Chemical upcycling of PET:A mini-review of converting PET into value-added molecules[C]//Department of Chemistry & Department of Chemical, Biological and Materials Engineering, University of South Florida,GSES, Tohoku University.Proceedings of the 3rd International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering (part2) .King's College London,;2023:230-234.
- [28] Yin H ,Lu Y ,Peng W , et al.Innovative Tools for Food Waste Management that Enable Higher Value Circular Economy Outputs[C]//Department of Economics, King's Business School, King's College London,Cardiff Business School, Business School.Proceedings of the 2nd International Conference on Business and Policy Studies (part12) .School of Accounting and Finance, University of Bristol;Faculty of Art and Science, University of Toronto;Fisher Business School, Ohio State University;School of Management and Economics, The Chinese University of Hong Kong;CATS Academy Boston,;2023:274-287.
- [29] 侯慧敏,郭东方,苏丽娟,等. 基于物质流方法的磷石膏资源化利用现状分析[J].资源与产业,2022,24(06):23-30.
- [30] 许文娇,成怀刚,程芳琴. 煤基产业的资源循环利用与低碳流程再造[J].过程工程学报,2023,23(03):323-336.

- [31] 刘志鹏,徐昊,陈康,等. 高湿固体废弃物水热炭化处理技术及产物还田的生态环境效应研究进展[J].南京农业大学学报,2022,45(05):1001-1018.
- [32] 鲍雅辉. 昔日盐碱地今日变良田——抚顺矿业集团研发中心固体废弃物变废为“肥”,助力土壤改良[J].当代矿工,2022,(01):62-65.
- [33] 王晨晨,王学志,贺晶晶. 工业固体废弃物再利用对混凝土抗压强度影响研究综述[J].吉林水利,2022,(01):10-16.
- [34] 陈帆.工业固体废弃物再利用系统效率评价研究[D].东华大学,2022.
- [35] 孙晓杰,王嘉捷.园林废弃物资源化循环利用技术研究[M].中国环境出版集团:202012:137.
- [36] 焦亚茹.天津市规模化畜禽养殖业固体废弃物资源化利用研究[D].河北工业大学,2015.
- [37] 徐明升. 基于循环经济理念的平顶山市固体废弃物资源化利用研究[J].河南城建学院学报,2014,23(05):58-60+68.
- [38] 田婷.基于逆向物流的城市生活固体废弃物资源化激励机制研究[D].上海工程技术大学,2015.
- [39] 王昶,徐尖,姚海琳. 城市矿产理论研究综述[J].资源科学,2014,36(08):1618-1625.
- [40] 欧阳丰瑞.我国城市固体废弃物资源化管理体系研究[D].哈尔滨工业大学,2007.
- 版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**OPEN ACCESS**