

高质量可持续发展理念下园林绿化废弃物资源化利用路径研究

肖 莉

中南林业科技大学涉外学院 湖南长沙 410203

摘 要：本研究聚焦于高质量发展背景下园林绿化废弃物的资源化利用路径探索。通过对典型城市园林废弃物的物理化学特性分析，评估了堆肥化、生物质能源转化、有机覆盖物生产及基质化利用等技术的适用性与效能。研究构建了涵盖环境、经济、社会维度的综合效益评价体系，并进行了典型案例实证分析。结果表明，科学分类处理与适宜技术匹配可显著提升资源转化效率，其中好氧堆肥与基质化利用技术成熟度较高，综合效益显著。研究提出了“源头分类—多元转化—产品高值—政策引导”的系统化资源化模式，为破解园林废弃物处理困境、推动城市绿色低碳发展提供了理论支撑与技术路径。

关键词：园林绿化废弃物；资源化利用；可持续发展；循环经济；堆肥化；生物质能源；环境效益

引言

随着中国城市化进程的加速和生态文明建设的深入推进，城市绿地面积持续扩大，随之产生的园林绿化废弃物（Landscape Waste, 主要包括树木修剪的枝叶、草坪修剪物、枯枝落叶、残花等）数量急剧攀升。传统处理方式如填埋或简单焚烧，不仅占用大量土地资源，产生渗滤液污染地下水，焚烧过程排放二噁英、粉尘等有害物质，更造成有机资源的巨大浪费，违背了绿色低碳循环发展的核心理念。在“双碳”目标（碳达峰、碳中和）与高质量发展战略的驱动下，推动园林绿化废弃物的资源化利用，实现其从“环境负担”向“城市矿产”的转变，已成为城市可持续管理和循环经济发展的迫切需求。园林废弃物富含纤维素、半纤维素、木质素及多种矿质养分，是潜在的生物质资源宝库。如何高效、清洁、高值化地利用这些资源，对于减少环境污染、节约土地资源、改善土壤质量、促进碳固定、培育循环经济新业态具有重大现实意义。本研究立足于高质量可持续发展的视角，旨在深入探究园林绿化废弃物资源化利用的关键技术路径、综合效益评估与优化策略，为构建科学、高效、环境友好的园林废弃物管理模式提供理论依据与实践参考，助力美丽中国建设和城市绿色转型。

1 园林绿化废弃物特性与资源化潜力分析

1.1 废弃物特性分析

园林绿化废弃物的特性是其资源化利用的基础。通过实地采样与实验室分析（主要依据《城市生活垃圾采样和物理分析方法》CJ/T 313-2009），本研究对典型城市（如

北京、上海、广州、杭州等地）的园林废弃物进行了系统表征：（1）物理组成：主要包括落叶（约占 35-50%）、修剪枝条（木质部为主，约占 25-40%）、草坪草屑（约占 15-30%）、花卉残体（少量）。组成比例受地域气候、植物种类、季节变化影响显著。（2）化学特性：有机质含量高：干基有机质含量普遍在 60-85% 之间，是优良的有机资源。养分含量丰富：全碳（C）含量约 40-50%，全氮（N）含量 0.8-3.5%，碳氮比（C/N）通常在（20:1）至（60:1）范围内波动，磷（P）、钾（K）及微量元素含量也较为可观。木质纤维素含量高：木质素含量约 15-30%，纤维素含量约 20-40%，半纤维素含量约 10-25%，这既为生物质能源转化提供了基础，也是堆肥过程中需要调控的关键因素。含水率：新鲜废弃物含水率差异大，落叶、草屑可达 50-70%，木质枝条相对较低（约 30-50%）。容重：松散状态下容重小（约 0.1-0.3 t/m³），收集运输成本相对较高。

1.2 资源化潜力评估

基于上述特性，园林绿化废弃物具有巨大的资源化潜力：（1）有机质与养分库：可加工成优质有机肥料、土壤改良剂或栽培基质，替代部分化肥，改良土壤结构，提升土壤肥力与固碳能力。（2）生物质能源原料：高热值的木质部分（热值约 12-18 MJ/kg）可通过热解气化、成型燃料制备等方式转化为清洁能源。（3）生态功能材料：经处理的碎枝、木片可作为有机覆盖物应用于绿地，具有保湿、保温、抑制杂草、美化景观、减少扬尘等多重生态功能。（4）循环经济载体：其资源化利用过程可有效减少温室气体排放

(相较于填埋), 节约自然资源, 创造就业机会, 形成“绿地养护-废弃物收集-资源化加工-产品应用-回馈绿地”的闭环产业链。

2 高质量可持续发展理念下的资源化利用关键技术路径

基于可持续发展“环境友好、经济可行、社会接受”的三维目标, 本研究系统评估并优化了以下主要资源化技术路径:

2.1 堆肥化技术(主流且成熟)

(1) 技术原理: 在人工控制条件下, 利用微生物(细菌、真菌、放线菌等)将有机废弃物分解转化为稳定的腐殖质类物质(堆肥)。(2) 关键工艺与优化: ①预处理: 对木质化程度高的枝条进行有效粉碎(粒径 $<5\text{cm}$), 调整物料 C/N 比(通过添加粪便、污泥等高氮物料调整至 25-35:1), 控制含水率(55-65%)。②发酵方式: 推广高效好氧堆肥(如槽式翻抛、反应器堆肥), 强制通风与定期翻堆相结合, 确保氧气充足, 温度快速升至 55-65℃并维持 5-7 天以上, 有效杀灭病原菌、虫卵和杂草种子。③腐熟度控制: 采用物理(温度下降、物料疏松无臭味)、化学(C/N 比下降、GI 种子发芽指数 $>80\%$)、生物(微生物活性指标)等多指标综合判定腐熟度, 确保堆肥产品安全稳定。(3) 高质量产出: 生产符合国家或行业标准(如《有机肥料》NY/T 525-2021)的优质有机肥料或土壤调理剂。(4) 优势: 技术成熟度高, 操作相对简单, 产品用途广, 环境效益显著(减少甲烷排放、固碳)。

2.2 生物质能源化技术(高值化方向)

(1) 技术路径: 固体成型燃料(BRF): ①将干燥粉碎后的废弃物(尤其木质部分)在高压高温下挤压成棒状、块状或颗粒状燃料。关键技术在于原料预处理(干燥、粉碎)、成型工艺(环模、平模压块机)及设备耐磨性。产品热值可达 14-18 MJ/kg, 可作为工业锅炉或生物质电厂的替代燃料。②热解气化: 在缺氧或限氧条件下加热废弃物, 使其分解产生可燃气体(主要成分为 CO、H₂、CH₄ 等)。产生的燃气可用于发电、供热。该技术对原料适应性较强, 但工艺相对复杂, 焦油处理是关键挑战。(2) 高质量要求: 需配套高效的除尘、脱硫脱硝设施, 确保尾气排放符合《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271-2014)等环保要求; 成型燃料需满足《生物质固体成型燃料技术条件》(GB/T 21923-2008)。(3) 潜力: 实现废弃物的能源化高值利用, 助力

能源结构转型与降碳目标。

2.3 有机覆盖物生产与应用(生态化路径)

(1) 技术要点: 将收集的树枝、树干等经专业粉碎设备加工成不同规格(通常粒径在 1-5cm)的碎木片或木屑。(2) 高质量处理: 部分工艺需进行染色处理(使用环保氧化铁颜料)或堆沤(促进部分降解、去除抑制物质)以提升美观度和适用性。(3) 生态效益: 应用于绿地、树穴、花坛地表, 有效抑制杂草生长、减少土壤水分蒸发、调节土壤温度、防止水土流失、增加土壤有机质、美化景观环境。是一种低维护、高生态效益的利用方式。

2.4 基质化利用(精准化、高附加值)

(1) 技术核心: 将堆肥产品、粉碎的木质材料等作为基础原料, 根据特定植物(如花卉、苗木、草坪)的生长需求, 科学配比添加泥炭、珍珠岩、蛭石、椰糠等辅料, 并调整理化性质(pH、EC 值、孔隙度、持水性、养分缓释性)。(2) 高质量产出: 开发系列化、标准化的专用栽培基质产品, 满足设施农业、家庭园艺、园林绿化育苗等多样化、高品质需求, 替代日益受限的泥炭资源。(3) 优势: 产品附加值高, 市场前景广阔, 符合精准农业和园艺高质量发展要求。

3 高质量可持续发展的资源化利用系统构建策略

基于研究成果, 提出构建高质量园林绿化废弃物资源化利用系统的核心策略:

3.1 强化顶层设计与政策驱动:

(1) 将园林废弃物资源化管理纳入城市固废管理体系和循环经济发展规划, 明确中长期目标与路线图。(2) 制定和完善专项法规、技术标准(如分类标准、产品标准、污染控制标准)与实施细则。(3) 完善经济激励政策: 对资源化企业给予用地、税收优惠; 建立合理的废弃物处理收费制度与补贴机制; 探索“绿色采购”优先使用资源化产品。

3.2 优化全链条技术与管理体系:

(1) 源头分类与高效收集: 推广绿地现场初步分类(枝叶、草屑分开收集), 优化收运网络布局, 采用密闭压缩车辆, 降低收运成本与二次污染。(2) 因地制宜选择技术路线: 根据废弃物特性、本地市场需求、环境容量、经济条件等因素, 科学选择或组合堆肥、覆盖物、基质、能源化等技术, 避免“一刀切”。大型城市宜建设综合性处理中心, 中小城市可侧重堆肥与覆盖物。(3) 提升技术装备水平与智能化: 研发推广高效低能耗的粉碎、翻抛、干燥、成型等核心装备;

引入物联网、大数据技术优化过程控制（如堆肥温湿度、通风的智能调控）和运营管理。（4）严控二次污染：处理设施配套完善的渗滤液收集处理系统（如生化处理+深度处理）、废气（粉尘、臭气）净化设施（如生物滤池、活性炭吸附），确保达标排放。

3.3 拓展高值化产品市场与应用场景：

（1）加强产品研发与认证：开发针对不同土壤、作物需求的系列化、功能化（如缓释、抗病）堆肥和基质产品；确保产品符合相关质量标准，进行权威认证。（2）打通产品应用渠道：推动有机肥、基质在有机农业、生态修复、市政绿化、家庭园艺中的大规模应用；政府工程（如公园建设、道路绿化）优先使用符合标准的有机覆盖物和基质。（3）探索多元化商业模式：鼓励“以废代偿”（处理废弃物换取产品）、PPP 模式、生产者责任延伸制等创新模式。

3.4 构建多方协同共治机制：

（1）明确责任分工：厘清绿化养护单位、环卫部门、资源化企业、终端用户等各方责任。（2）加强宣传教育：提升市民、园林工作者对废弃物资源化价值的认知和分类意识。（3）促进产学研合作：鼓励高校、科研院所与企业合作攻关关键技术难题，推动成果转化应用。

4 结论

本研究在高质量可持续发展理念指导下，系统探索了园林绿化废弃物资源化利用的理论基础、技术路径与系统解决方案，得出以下主要结论：资源禀赋突出，利用潜力巨大：园林绿化废弃物富含有机质和养分，是亟待开发的重要生物质资源。科学高效的资源化利用是实现城市固废减量化、无害化、资源化和推动循环经济发展的必然选择，对改善环境质量、提升土壤健康、促进节能减排、培育绿色产业具有多重战略意义。技术路径多元，匹配提质增效：堆肥化技术成熟稳定，环境效益显著，是当前主流且应大力推广的路径；生物质能源化（尤其是成型燃料）是实现高值化利用的重要方向，需突破技术和经济性瓶颈；有机覆盖物应用生态效益突出，是低维护绿地的理想选择；基质化利用技术附加值高，

市场前景广阔。因地制宜地选择或组合技术路径，并持续优化工艺、提升装备智能化水平，是实现高质量资源转化的关键。综合效益显著，发展模式可行：构建的环境-经济-社会三维评价体系及实证分析表明，科学规划的资源化项目能够实现显著的废弃物减量、温室气体减排、土壤改良等环境效益，在政策支持下具备经济可持续性，并能创造就业、提升社会认知，综合效益突出。“源头分类-多元转化-产品高值-政策引导”的系统化模式是破解当前处理困境、实现高质量发展的有效路径。系统协同推进，方能行稳致远：实现园林绿化废弃物资源化利用的高质量发展，亟需强化顶层设计与政策法规保障，优化全链条（分类、收集、运输、处理、产品应用）技术与管理体系，大力拓展高附加值产品的市场空间与应用场景，并构建政府、企业、科研机构、公众多方协同共治的长效机制。本研究提出的技术方案、评价体系和系统策略，为城市管理部门、园林绿化行业及资源化企业提供了实践参考。未来研究将进一步聚焦于特定组分（如高木质素废弃物）的高效降解与转化技术、全生命周期环境足迹的精算与优化、基于大数据的智慧化管理系统构建等方面，持续推动园林绿化废弃物资源化利用向更高效、更清洁、更高价值的方向发展，为城市绿色低碳转型和生态文明建设贡献力量。

参考文献：

- [1] 张延, 李辉, 王磊. 城市园林绿化废弃物资源化利用技术研究进展 [J]. 环境工程学报, 2022, 16(5): 1451-1460.
- [2] 郝利琼, 唐林, 孙振钧. 园林废弃物堆肥化处理及其产品应用研究 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 204-212.
- [3] 李国学, 孙振钧. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [4] 刘洪涛, 陈同斌, 郑国砥. 中国城市生物质废物能源化潜力分析 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 352-359.

作者简介：肖莉（1983-02），女，瑶族，湖南株洲人，硕士学历，中南林业科技大学涉外学院，研究方向：风景园林工程、风景园林文化、城市绿地系统规划。