

# 建筑固废“正-逆向”协同资源化 理论构建与应用前瞻

肖建庄<sup>1,2\*</sup>, 王玻<sup>1</sup>, 段珍华<sup>1</sup>, 崔晓达<sup>2</sup>, 王军<sup>3</sup>, 杜欢政<sup>4</sup>, 王韬<sup>5</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 广西大学双碳科学与技术研究院, 南宁 530004; 3. 中建西部建设股份有限公司, 成都 610017; 4. 同济大学马克思主义学院, 上海 200092; 5. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 针对我国建筑固废资源化率仍然不高、处置不当易引发环境与安全风险, 本文提出了建筑固废“正-逆向”协同资源化理论, 旨在破解资源化过程中重末端处理、轻源头减量、忽视市场拉动的系统性瓶颈。贯通以末端处置为核心的“正向”资源化、以源头减量和市场需求为牵引的“逆向”资源化, 拓展了以动态反馈、利益协调、风险控制为核心机制的理论内涵。构建了包含技术、政策、市场维度的立体化实施路径: 优化预处理技术, 开发可拆解、可重构、模块化生产线, 研发高附加值的再生产品, 拓展枢纽化处置技术; 完善标准体系, 构建跨区域的奖惩联动、利益分配与协同机制; 建立绿色认证体系, 创新政府与市场协同模式, 将生产企业纳入碳交易体系。在相应理论框架下, 设计了“正值资源化率”评价指标, 结合上海市的案例完成评价指标的实证应用, 发现当前上海市建筑固废“正值资源化率”仅为39.3%; “正值资源化率”指标具有通用性, 可作为各地区系统评估资源化效果的方法论工具。建筑固废“正-逆向”协同资源化理论是推动“无废城市”建设、实现2030年我国建筑固废资源化率55%阶段性目标的基础支撑, 有助于促进建筑固废资源化管理的系统性变革。

**关键词:** 建筑固废; 资源化; “正-逆向”协同; 正值资源化率; 资源化枢纽; 低碳

**中图分类号:** TU-02 **文献标识码:** A

## Forward-Reverse Synergy Reclamation of Construction and Demolition Waste: Theoretical Framework and Application Prospect

Xiao Jianzhuang<sup>1,2\*</sup>, Wang Bo<sup>1</sup>, Duan Zhenhua<sup>1</sup>, Cui Xiaoda<sup>2</sup>, Wang Jun<sup>3</sup>,  
Du Huanzheng<sup>4</sup>, Wang Tao<sup>5</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Science and Technology for Carbon Peak and Neutrality, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. China West Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610017, China; 4. School of Marxism, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Confronting the low recycling rate of construction and demolition wastes (CDWs) and the improper disposal that can easily trigger environmental and safety risks, this study proposes a forward-reverse synergy reclamation theory for CDWs, aiming to break the

收稿日期: 2025-09-29; 修回日期: 2025-11-03

通讯作者: \*肖建庄, 广西大学双碳科学与技术研究院 / 同济大学土木工程学院教授, 研究方向为再生混凝土材料、结构与建造;

E-mail: jzxiao@gxu.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3803400); 广西科技计划项目(桂科LT2504240009)

本刊网址: ssc.ae.engineering.org.cn

bottlenecks of overemphasizing end-of-pipe treatment while underestimating source reduction and market incentives. The study integrates a “forward” recycling approach centered on end-of-pipe disposal with a “reverse” recycling approach driven by source reduction and market demand, and expands the theoretical connotation that centers on dynamic feedback, interest coordination, and risk control. Furthermore, implementation pathways are designed across technical, policy, and market dimensions. Technically, it is proposed to optimize pretreatment technologies, build disassemblable, reconfigurable, and modular production lines, develop high-value-added recycled products, and expand hub-based disposal technologies. In terms of policies, the standards system should be improved to establish cross-regional mechanisms for incentive/penalty linkage, benefit distribution, and coordination. As for market pathways, it is suggested to establish green certification systems, innovate government-market collaboration models, and incorporate production enterprises into the carbon trading system. Under this theoretical framework, the study proposes a positive resource recovery rate as a novel evaluation indicator. A case study of Shanghai demonstrates the empirical application of the indicator, revealing that the current positive resource recovery rate for CDWs in Shanghai is only 39.3%. The positive resource recovery rate is universally applicable and can serve as a methodological tool for systematically assessing the recycling effectiveness across different regions. The forward-reverse synergy reclamation theory for CDWs provides a fundamental support for the construction of zero-waste cities and for achieving the interim target of a 55% CDW recycling rate by 2030, contributing to the systemic transformation in CDW recycling management.

**Keywords:** construction and demolition waste; reclamation; forward-reverse synergy; positive resource recovery rate; recycling hub; low carbon

### 一、前言

我国经济社会发展迅速，城镇化进程持续推进，城镇化率从1990年的26.4%提升至2024年的67%<sup>[1]</sup>。快速城镇化产生了量大且成分复杂的建筑固体废弃物（建筑固废），现实中的违规堆填和不当处置不仅引发水体污染、土壤退化、农田林地侵占等环境问题<sup>[2]</sup>，而且伴生较为严重的公共安全风险（如某城市特大滑坡事故的成因即为建筑固废堆体失稳）。2024年，第三轮中央生态环境保护督察行动通报了多个省份的建筑固废违规处置情况，凸显了建筑固废治理面临的困境。据估算，2020年我国城市建筑固废年产生量超过 $2 \times 10^9$  t，约占城市固体废物总量的40%<sup>[3,4]</sup>；而在上海市，2024年的建筑固废排放总量为 $1.397 \times 10^8$  t，占当年固体废物总量的79.3%<sup>[5]</sup>。这表明，建筑固废治理成为城市可持续发展的核心议题之一。

对建筑固废进行资源化处理是解决上述问题的关键路径。与以往将建筑固废直接排放至自然界的模式不同，资源化旨在将建筑固废转化为再生材料并重新投入建筑行业进行循环利用。近年来，相关政策、标准体系逐步完善，驱动我国建筑固废资源化技术与产业取得良好进展。2020年，35个城市的建筑固废资源化利用率约为50%，高出全国城市平均水平约10个百分点<sup>[6]</sup>。《城乡建设领域碳达峰实施方案》（2022年）要求，2030年我国建筑固废资源化率达到55%。《关于进一步加强城市建筑垃圾治理的意见》（2025年）要求，2027年全国地级及以上城市的建筑固废资源化率达到50%。需要指出

的是，相比发达国家70%~95%的建筑固废资源化水平<sup>[7-9]</sup>，国内仍存在明显差距，因而有效提升建筑固废资源化率仍是重要任务。

当前，主要通过“资源化”这个节点来衔接建筑生命周期（含规划、设计、建造、管理、运行、维护、拆除）中的拆除环节与规划环节，由此构成“正向”资源化循环模式，推动建筑业全产业链的闭环发展。在技术层面，主要关注工艺流程与处置<sup>[9]</sup>，如通过筛分、破碎等工艺将建筑固废转化为再生骨料，进而制备再生骨料混凝土<sup>[10-16]</sup>、路基填料<sup>[17-19]</sup>等；工程弃土则可资源化再生砖<sup>[20-23]</sup>、陶粒<sup>[24]</sup>、流态填充材料<sup>[25-28]</sup>等。在管理层面，重点探究政策工具对资源化的影响，通过成本效益分析等方法辨识出政策工具结构待优化、市场主体参与不足、市场化成本偏高等问题<sup>[29-33]</sup>。这些研究成果支持了工程实践，但较多沿袭“正向”资源化思路并侧重末端的固废消纳处理，而在关联源头减量、固废处置、再生产品市场需求方面缺失相对系统的理论框架，导致建筑固废资源化项目长期依赖政策扶持，难以形成可持续的商业模式。这反映了建筑固废资源化的现有理论在系统性、内生动力设计上存在不足，亟需探索能够引领全链条、多主体协同的新理论框架。

本文尝试贯通传统的“正向”资源化、以源头减量和市场需求为导向的“逆向”资源化，提出建筑固废“正-逆向”协同资源化理论，拓展以动态反馈、利益协调、风险控制为核心机制的理论内涵，构建包含技术、政策、市场维度的立体化实施路径；设计“正值资源化率”指标，支持对资源化

实效的全面评估,结合典型城市案例验证所提理论的适用性。相关工作面向现实重大需求,兼有理论创新性和实践操作性,可为提高我国建筑固废资源化利用水平提供基础参考。

## 二、建筑固废资源化理论的发展现状与演进逻辑

### (一) 建筑固废资源化理论的进展与挑战

可将建筑固废资源化理论的发展过程划分为初步资源化阶段、体系化探索阶段、系统化发展阶段、综合创新阶段4个主要阶段。当然,该阶段划分仅是源于对部分国家发展实践的归纳总结,并不意味着具有绝对的普适性;后发国家在技术引进和政策借鉴的基础上,结合自身国情实际,发展新理念、运用新技术,有可能实现跨越式发展。此外,仍有部分国家以填埋等传统处置方式为主,尚未经历完整的资源化发展过程。

初步资源化阶段位于20世纪40—60年代,以被动处置、简单回填为基本特征。在战争结束后,一些国家开始将废砖、废混凝土碎块等用于路基工程、用作回填材料,初步探索了在新建建筑中应用的可能性<sup>[34]</sup>。体系化探索阶段位于20世纪60—80年代,发展背景是环境保护意识逐步兴起,开展了固废的分类与资源回收,侧重铝材、钢材等高价值废弃物,技术思路较为粗放,并未将建筑固废资源化作为独立议题。系统化发展阶段位于20世纪90年代—21世纪初,受可持续发展理念的推动,初步形成了建筑固废资源化的理论系统框架。相关技术研发较为活跃且进展加快,以基于再生骨料混凝土的15 m预应力梁综合验证为代表<sup>[35]</sup>,建筑固废资源化利用逐步纳入政策体系。在实践方面,1994年德国首次在承重结构中采用了120 m<sup>3</sup>的再生混凝土,证明了现浇结构中的应用可行性<sup>[36]</sup>;1998年德国发布了《再生骨料混凝土指南》,指导了达姆施达特市“森林螺旋城”项目实施<sup>[37]</sup>。2000年以来,建筑固废资源化进入综合创新阶段,逐步构建了“正向”资源化理论体系,将拆除、回收纳入建筑生命周期管理并形成闭环循环模式。在工艺技术持续革新的基础上,相关政策和标准体系不断完善,如德国发布DIN 4226-100(2002年),日本发布JIS A5021:2005、JIS A5022:2007、JIS A5023:2006等

再生混凝土标准。

在我国,建筑固废资源化技术与应用模式经历了快速演进:“十一五”时期启动资源化探索,“十二五”时期强调高性能利用,“十三五”时期推进精细化处理,发布《“无废城市”建设试点工作方案》(2018年);“十四五”时期发布《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》等政策文件,将建筑固废明确为大宗固废资源化的重点对象。据调研统计,我国95%以上的省份拥有建筑固废资源化工厂。

当前主流的“正向”资源化理论侧重废弃物产生后的末端处理与转化,尽管技术工艺与标准制定较为成熟,但依然难以应对我国未来更高的资源化目标。一是技术路径与经济效益失衡,现有的资源化设施过度关注建筑固废的消纳需求以及再生产品的技术指标达标,而忽视了再生产品的市场容量与竞争力,导致项目无法市场化运行、长期依赖财政补贴,难以形成可持续的商业模式。二是“正向”资源化理论实施过程中,资源化产业链上各环节相互割裂,缺乏整体效益的协同优化。三是配套的政策工具相对单一,多为目标考核、末端补贴形式,缺乏促进源头减量、拉动市场需求的内生激励机制,导致资源化工作易陷入“为达标而达标”的发展困境,难以开展可持续、规模化的应用推广。这些局限性表明,单一的“正向”资源化理论难以独立支撑2030年我国资源化率55%的阶段发展目标,亟待理论突破与技术创新协同以适应新发展要求。

### (二) “正-逆向”协同资源化理论的演进逻辑

为响应建筑固废资源化对系统性理论创新的需求,在梳理“正向”理论成果与局限性的基础上,系统拓展了“逆向”资源化理论的内涵,论述了“正-逆向”协同的可行性与合理性,明晰了协同资源化理论的构建逻辑。

“逆向”资源化理论的提出源于对“正向”理论局限性的反思。区别于一般工业领域中局限于“回收-拆解-再制造”物流网络的“逆向”概念(多用于设施选址与路径优化)<sup>[6,38-40]</sup>,本研究构建的“逆向”资源化理论,立足建筑生命周期源头,强调以减量化优先为原则,依托市场需求反向牵引资源化路径优化。相关理念与当前建筑业中常见的绿色建筑、生态设计等概念有着本质区别:绿色建筑

侧重建筑全过程中的节能与节材，生态设计更多基于成本控制、企业责任、环境保护伦理而在设计阶段主动降低能耗与材料消耗；两者仍属于“正向”思维的产物，没有充分考虑后端资源化环节的实际能力、再生产品的具体市场需求。“逆向”资源化理论从再生产品的可行性与价值出发，针对性地减少下游难以处置的原料，同时降低再生原料和产品的碳排放因子；通过促进再生原料的充分利用，有效替代原生的自然资源，避免因资源开采与初加工产生的碳排放；实施面向拆解的设计，从源头减少分选、破碎等后续环节的能耗，直接降低资源化过程的碳足迹。

“逆向”资源化理论的核心要素涉及三方面：源头减量设计、资源化过程优化、市场需求牵引。

① 源头减量设计以末端资源化需求为导向，在减少材料使用、降低固废产生的前提下，优先选用市场接纳度高的材料，同时考虑构造的可拆解性，由此降低未来的回收分离难度与能耗。② 资源化过程优化依据源头来料的特性与下游产品的标准，对分选、破碎等关键工艺进行动态调控与精细化改进，以将优质的源头来料高效转化为符合市场规格的高品质再生产品，兼顾再生原料价值最大化、系统性减少对自然资源的消耗与依赖，进而促进建筑生命周期内的碳减排。③ 市场需求牵引强调开拓再生产品的稳定应用渠道，通过政策激励与市场培育，主动创造并扩大绿色消费需求，确保资源化价值链的畅通与闭环。

“逆向”资源化理论是对“正向”理论局限性的回应与必要补充，并非意图以“逆向”取代“正向”，而是将二者协同并构成资源化体系中不可偏废的两方面要素。“正向”理论已在处理技术、标准体系方面积累深厚基础，为资源化体系提供坚实的外在支撑；“逆向”理论则从源头和需求端切入，致力解决资源化的动力机制和经济效益问题，为资源化体系提供关键的内在导引；两方面协同，将形成从源头预防到末端利用的资源化完整理论体系。国家正在大力推动的“无废城市”建设，也为这种协同提供了充分的实践场景。构建能够有机整合“正向”处理能力、“逆向”驱动机制的协同资源化理论，不仅是应对当前资源化瓶颈的基础理论创新之举，而且为“无废城市”建设等重大任务提供新的发展思路。

### 三、建筑固废“正-逆向”协同资源化理论框架与运行机制

#### （一）建筑固废“正-逆向”协同资源化理论框架

建筑固废“正-逆向”协同资源化理论涵盖建筑固废“正向”“逆向”资源化过程并强调两者的协同优化，贯通建筑生命周期、固废处置流程、产品生产流程3个核心部分，构成完整的闭环系统（见图1）。

在“正向”供应链中，建筑设计、建造、运维分别为拆解提供材料、结构、工艺及结构状态等信息，可显著提升拆解效率并降低作业成本。拆解产生的固废作为原料进入回收、分选、处置环节；经分选，不可用于再生产品制造的材料（如木材、塑料）将送往焚烧设施进行能量回收，其余的合格部分作为再生原料回用于再生建材的生产，相应产品进一步支持低碳建筑设计与建造。

在“逆向”需求链中，建筑设计提出产品功能需求，再生建材生产商据此进行原材料质量控制；资源化过程中的处置、分选、回收、拆解环节均需针对相关质量要求进行优化；为了获取高品质固废并降低拆解成本，需对运维、建造、设计策略进行回溯调整。

在行业监管、市场驱动的共同作用下，建立“正向”“逆向”协同的供需平台，支持资源动态匹配、数据反馈共享、技术标准协同，促成“环境-经济”要素均衡的全产业链，保障建筑固废资源化产业的信息化、智能化、标准化发展。

#### （二）建筑固废“正-逆向”协同资源化运行机制

建筑固废“正-逆向”协同资源化理论框架以动态反馈机制、利益协调机制、风险控制机制作为核心支撑。① 动态反馈机制指通过正向供应、逆向需求之间的实时数据交互，驱动建筑生命周期内资源效率的持续提升。将正向供应链中的信息数据（如材料属性与用量、施工工艺、结构可拆解性）、逆向需求链中的信息数据（如再生建材性能要求、产品质量标准）集成至云端平台，实现供需精准匹配，减少资源浪费，并为新型建材研发提供导向。实时反馈还支持降低隐形成本（如通过反馈优化设计减少拆解难度与成本），提高建筑固废资源化系统的自适应能力并确保始终符合时代与社会的发展

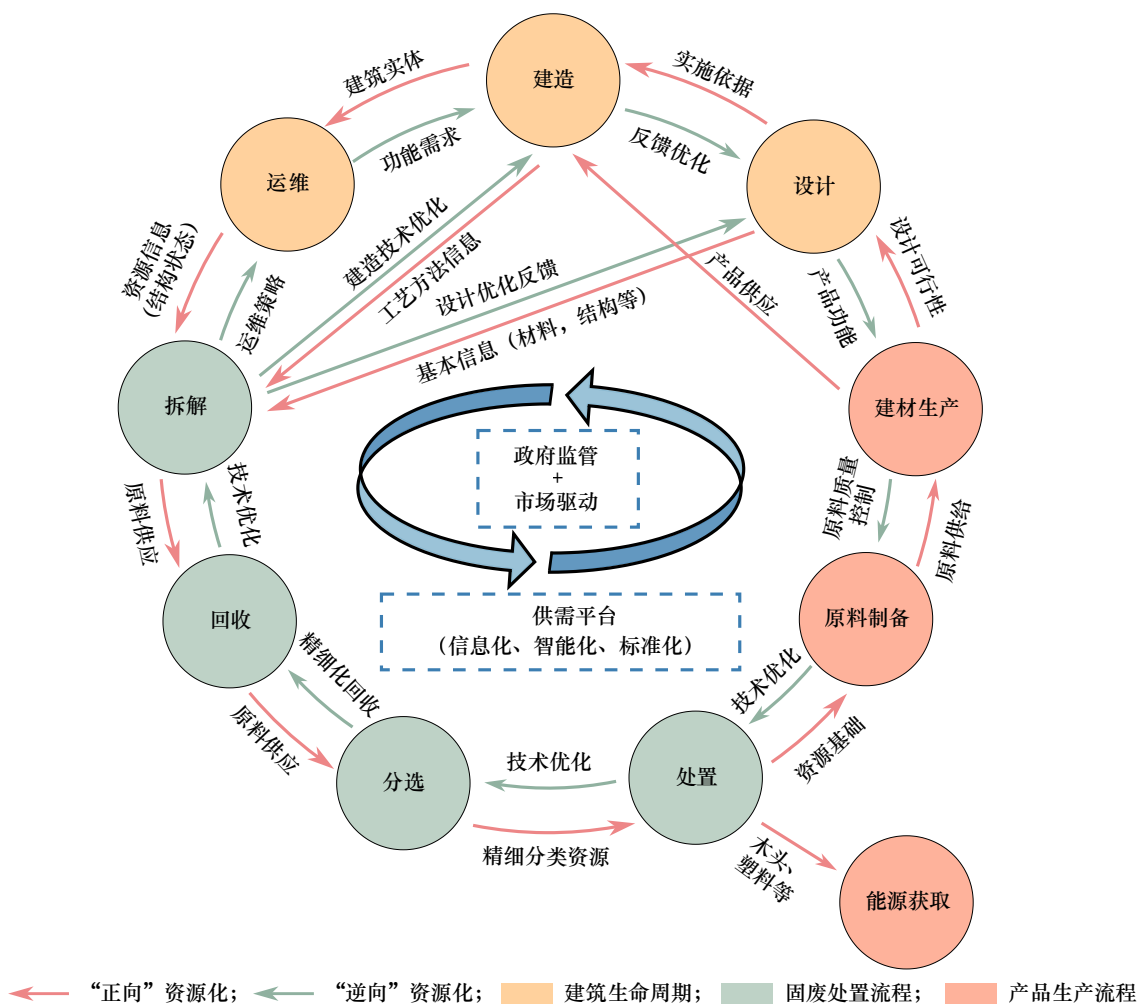


图1 建筑固废“正-逆向”协同资源化理论框架

需求。② 利益协调机制指平衡产业链中各参与方（如管理部门、房地产开发商、施工企业、回收处理企业、资源化厂、业主）的经济利益、责任分担、环境目标，化解潜在冲突，激发协同合作动力，构建“经济激励-责任约束-社会认同”三维驱动体系。运用法规规章、标准规范等工具，合理加强对建筑固废违规排放的监管与惩罚力度；从事建筑固废资源化利用的企业可获得税收减免或财政补贴待遇，以加快引导产业健康发展。面向建筑用户开展绿色宣传，逐步改善市场消费偏好，提升再生产品和低碳建筑的市场溢价能力，推动建筑固废资源化转向市场内生驱动的高质量发展形态。③ 风险控制机制指系统识别、评估、规避建筑固废资源化全过程中可能出现的技术、经济、环境、管理类风险，保障建筑固废资源化系统的稳定运行。在技术层面，采用模块化、标准化设计，预留适当的技

术冗余度以应对未来的不确定性。在经济层面，建立成本波动缓冲机制（如长期再生材料供应合同等）、收益保障机制（如最低收购价政策），增强行业主体抵抗市场波动和经济风险能力。在环境层面，采用污染扩散防控技术，落实环境损害追责制，防控直接和潜在的生态环境风险。应用基于物联网、大数据分析的智能监控与预警技术，增强建筑固废资源化系统的多重风险识别与防控能力。

#### 四、建筑固废“正-逆向”协同资源化理论的实施路径

##### （一）技术路径

从“正向”角度出发，优化预处理技术，改进建筑固废的分类、分选、破碎、筛分工艺，提高处理效率和成品质量。引入基于人工智能视觉识别技

术的分类和分选系统，与传统分选工艺相结合，实现高效、高精度的物料识别并降低成本。应用多级协同破碎技术（如颚式破碎与反击破碎联合），精确控制再生骨料的级配和粒形等，显著提高最终再生产品的质量与市场价值。开发与实际需求匹配的可拆解、可重构、模块化生产线装备，增强资源化流程的灵活性与响应速度，提供动态优化功能。

从“逆向”角度出发，重点推进目标导向的再生产品研发，精准响应市场对低碳建材、高市场竞争力工程材料的需求。利用再生微粉的二次水化特性<sup>[41]</sup>和低碳优势<sup>[42]</sup>，生产低水泥用量的绿色混凝土，或者作为辅助胶凝材料应用于砂浆与砌块制备，满足市场对低碳胶凝材料的需求。将有机废弃物经除杂与加工处理后制成固态再生燃料，响应工业能源用户对清洁、稳定替代燃料的需求。对工程渣土进行水洗制砂工艺处理，产生的水洗废渣用于烧结/免烧结砌块生产，得到的流态固化土回填于肥槽、基坑或用于壁后注浆，适应隧道工程壁后注浆、路基回填等场景对低成本、性能适配材料的需求，也可拓展应用于再生土建筑、增材制造土建筑<sup>[20]</sup>。

建筑固废枢纽化处置技术也是建筑固废“正-逆向”协同资源化理论实施的重要路径之一。在“正向”上，将不同来源的建筑固废集中运输到枢纽，开展规模化、集约化处置，为后续资源化的原料提供质量保证。在“逆向”上，建筑固废资源化枢纽作为再生产品的产出端，精准对接市场需求，及时进行工艺调整，制定差异化的建筑固废收集策略。进一步，建筑固废资源化枢纽作为物料、信息的交汇点，基于供需两端的实时数据动态优化并调度生产计划，如某类产品库存积压时，及时调整生产线以生产其他类型的产品。通过空间整合、工艺升级、功能协同，构建集分类回收、再生加工、产品消纳于一体的集约化、低碳化建筑固废循环利用体系，技术性规避处置过程中的分散化管理问题。运用数据追溯、强化监管等手段，明确产品质量责任主体，提升建筑固废资源化体系的整体运行效率与产品质量可控性。

### （二）政策路径

从政策角度看，建筑固废“正-逆向”协同资

源化理论的落地实施，依赖健全的标准体系与配套的政策支持。我国建筑固废资源化标准体系建设取得一定的进展，2005年以来制定并实施国家标准、行业标准、地方标准超过50项，涉及管理规范、处理工艺、再生材料应用、再生产品制造、工程建设等环节；现行标准体系仍存在覆盖领域不全面、地方标准地域性强、国家标准数量少、内容碎片化且协同性不足、配套的施工验收技术标准缺乏等问题。为此，应优先制定覆盖全链条的标准体系，涵盖智能分拣、碳足迹核算、再生建材环节评价、高附加值再生产品、相关再生处置申报、资源化企业管理行为等方面。科学合理的奖惩制度对推动建筑固废资源化产业的健康发展至关重要，结合物联网、卫星定位、电子联单等数字化监管技术落实惩罚措施，提高企业违规处置建筑固废的风险成本，驱动企业主动将建筑固废纳入“正向”资源化流程，实现源头减量与行为约束；税收减免、财政补贴政策可以有效降低处置成本，增强再生产品的市场竞争力，扩大“逆向”资源化过程中各环节的市场需求。尽管部分地区已探索此类政策措施，但普遍存在惩罚力度不足、监管技术落后、政策约束碎片化、跨区域协调机制缺失等问题。

在推进建筑固废资源化的过程中，着力构建全国统一、衔接配套的标准体系与政策框架，适时建立跨区域奖惩联动机制，尽量消除建筑固废违法违规处置行为；探索跨区域利益分配与协调机制，激活建筑固废区域协同市场。同步扩大建筑固废资源化的市场规模与环境效益，激发建筑固废资源化产业全链条管理的系统效能。

### （三）市场路径

充分运用市场机制，激发建筑固废资源化的内生发展动力。① 建立覆盖建筑生命周期的绿色认证体系，构建全国统一的再生建材质量分级认证制度。实施以性能为导向的再生建材标识分级管理，建立可追溯的质量信用平台，增强市场对再生产品的信任度。在“无废城市”试点区域，率先推行“碳标签”等环境标识制度，强化再生产品的绿色属性，吸引环境保护意识较强的消费群体。② 构建政府引导、市场主导相结合的发展模式。在公共投资项目中推行再生建材采购配额制度，明确要求市

政工程、保障性住房等项目优先或强制采用达到一定星级标准的再生建材。支持高值化、功能化的再生材料创新与产品开发，如再生骨料用于高强度混凝土，再生微粉制备低碳混凝土，废弃建材转化为具有隔声、保温等功能新型建材；在丰富应用场景的基础上，显著提升建筑固废资源化过程的经济效益与市场潜力。值得注意的是，部分措施尽管需要借助政策手段推行，但根本目标在于打通销售渠道、规范市场秩序，因而仍属于市场路径的重要组成部分。③ 将建材生产企业纳入碳交易体系，明确将建筑固废资源化替代天然原料减少的碳排放量核算为企业的碳资产，利用碳配额收益对冲资源化处理成本，以增强再生产品的价格竞争力并进一步扩大市场份额。

## 五、建筑固废“正-逆向”协同资源化理论的应用前瞻

### （一）建筑固废“正-逆向”协同资源化理论的项目级应用分析

将建筑固废“正-逆向”协同资源化理论应用于具体项目层面，有必要审视当前主流的“正向”资源化模式面临的现实困境，探索新兴发展模式的实践价值。

上海市某装修垃圾处置工厂是2018年住房和城乡建设部设立的35个城市建筑垃圾治理试点项目之一，占地约72亩（1亩≈666.67 m<sup>2</sup>），设计处理规模为5×10<sup>5</sup> t/年；发展定位为托底保障型固废处置项目，依赖财政补贴开展建筑垃圾资源化处置，是典型的“正向”资源化项目。该项目的主体工艺为“装修垃圾进场-分选后破碎-分级-再生骨料”，另外配置了再生砖生产线，但在运行实践中暴露出以下问题：低品质再生骨料面临其他优质再生产品（如拆除垃圾再生骨料）的市场竞争，为完成处置任务而不得不扩大运输半径，进一步加剧了财政补贴压力；区域内再生砖的市场容量有限，为满足产品性能要求又需调整配合比，导致生产成本上升、市场接受度降低；初始投资大、工艺复杂，摊销与财务成本高，在未形成再生产品有效价值循环的情况下，运营长期依赖财政补贴（补贴额度约为240元/t）。该项目的运行实践清晰反映出“正向”资源化路径的局限性：可在技术层面实现建筑固废

的减量与转化，却因缺乏与源头减量、市场需求的系统协同而难以形成可持续的运行机制。这就凸显了引入“正-逆向”协同资源化理论、建立建筑固废系统化治理框架的迫切性。

在当前的建筑固废资源化实践中，也有部分项目着眼突破现有瓶颈，开始运用“正-逆向”协同理念，展现了应用潜力与综合效益。广州市某循环经济产业园建设了“建筑固废处置-混凝土搅拌站-预制构件厂”一体化的大型资源化枢纽，实现从末端处置到前端市场的全链条整合。在技术路径上，采用智能视觉识别分选与多级协同破碎工艺，精准控制再生骨料级配与质量；设置“建筑固废-再生骨料-建材市场”“建筑固废-再生骨料-再生混凝土-建材市场”“建筑固废-再生骨料-再生混凝土-（装配式）构件-建材市场”等生产模式并可灵活切换，以多元产品结构突破单一再生产品的市场容量限制，体现出建筑固废大规模资源化的可行性。在市场路径层面，依据下游市场对构件、混凝土、骨料的品质需求，反向调控处置工艺与源头分类策略，以定制化生产方式提供结构混凝土、功能混凝土、超低碳混凝土等高附加值产品。该园区在不依赖财政补贴的情况下实现年产值6亿元、净利润2000万元，充分展现了“正-逆向”协同资源化的经济可持续性。

此外，“逆向”需求发挥对“正向”技术提升的拉动作用已在局部实践中显现出来。上海市某12层建筑为满足结构安全与抗震要求，需使用高品质再生骨料浇筑梁、柱、楼板等构件，消耗再生骨料合计为3396.6 t，这一特定的工程需求驱动了再生骨料生产企业采用颗粒整形等工艺提升产品品质。这就体现出市场需求对技术升级的牵引作用，是在微观层面对“正-逆向”协同资源化理论的有力例证。

### （二）建筑固废“正-逆向”协同资源化理论的宏观评价方法及应用探讨

#### 1. “正值资源化率”评价方法

在宏观层面，建筑固废资源化率常被用作评价资源化水平的关键指标。传统的建筑固废资源化率多指建筑固废经处理后转化为再生资源的比例，然而该指标本质上是对“正向”资源化水平的度量，

仅侧重量的转化，却难以甄别转化产物的市场价值实现程度。这一局限易导致下游再生产品与实际应用需求脱节，进而引发再生产品滞销、再生产业内生动力不足等问题。在此情况下，相关企业往往会依赖财政补贴来支撑运营，故而选择成本较低但难以盈利的处置方式，造成再生资源的价值浪费，也不利于建筑固废资源化产业的健康发展。

为克服现有评估体系重数量、轻价值的局限，本研究在“正-逆向”协同资源化理论框架下，提出了“正值资源化率”作为资源化系统的补充评价指标。

$$\eta = \frac{Q^+}{G} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中， $G$ 为建筑固废总排放量， $Q^+$ 为基于市场客观需求进行资源化处置的建筑固废总量（简称“正值资源化量”）。只有被“逆向”需求有效牵引，可成功完成从资源到产品再到商品价值转化过程的资源化，才能纳入“正值资源化率”计算中。将非市场导向的简单消纳行为排除在统计范围之外，使“正值资源化率”可以刻画“逆向”资源化的实际效能，进而强化资源化产出与终端应用之间的有效衔接，为评估建筑固废资源化系统的整体协同效率提供量化依据。

## 2. “正值资源化率”评价方法的应用示范

以上海市为例，结合“正值资源化率”指标开展实证应用与分析。各年度的“上海市固体废物污染环境防治信息公告”<sup>[9]</sup>提供了基础数据，分类清晰、统计完整，有利于客观呈现所提指标的实际应用效果（见表1）。

拆房和装修垃圾采用政府托底与市场化结合模式。分拣出的砖瓦、石块用于再生产品制造、便道铺设等，具备一定的资源价值，纳入“正值资源化率”统计。分选残渣需进行焚烧或填埋处置，无法产生市场收益，不计入“正值资源化率”统计。

建筑废弃混凝土近5年的产生量为 $5.626 \times 10^6$  t/年，在少量作为道渣开展就地利用以外，基本实现全量化资源利用，相应的“正值资源化率”估算为100%。

工程泥浆依据政策要求实施“源头干化”预处理后以渣土形式申报处置，因排放量有限且缺乏稳定的市场消纳路径，相应的“正值资源化量”在本研究中设定为0。

工程渣土的处理主要包括原位回填、异地建设项目回填、异地非建设项目回填、消纳场堆填、码头外运5种方式。“上海市固体废物污染环境防治信息公告”未披露各类方式的详细数据，本研究基于以下两方面假设进行估算。①参照2021年全国35个试点城市的平均水平<sup>[9]</sup>，将上海市建筑固废资源化率基准设定为50%；再结合“上海市固体废物污染环境防治信息公告”中其他建筑固废的资源化率，推算工程渣土近5年的平均资源化率为46.6%。②各类工程渣土处置方式的比例保持一致。根据2025年1—5月“上海市建筑垃圾数字化智能监管平台”数据<sup>[43]</sup>（异地建设项目回填、异地非建设项目回填、消纳场堆填、码头外运（出上海市）的渣土量分别为 $8.46 \times 10^6$  t、 $4.93 \times 10^6$  t、 $1.719 \times 10^7$  t、 $4.099 \times 10^6$  t），推算原位回填、异地建设项目回填、异地非建设项目回填、消纳场堆填、码头外运（出上海市）的占比分别为13%、21.2%、12.4%、43.1%、10.3%。在工程渣土的各种处理方式中，原位回填具有明确的客观市场需求；异地建设项目回填受到现场空间限制，渣土不得不先运出处置、再运回利用，从而产生额外的消纳与运输成本，但该处置方法仍能缓解城市用地压力、支持区域协调发展；故原位回填及异地建设项目回填均纳入“正值资源化率”计算中。异地非建设项目回填（如土地抬高）并不具有直接的市场需求，故视为非正值资源化途径。消纳场堆填、码头外运明显属于简单消纳行

表1 上海市建筑固废产生量均值及正值资源化参数（2020—2024年）

| 建筑固废    |      | 年平均量/ $\times 10^4$ t | 正值资源化量/ $\times 10^4$ t | 平均“正值资源化率”/% |
|---------|------|-----------------------|-------------------------|--------------|
| 拆房和装修垃圾 | 拆房垃圾 | 324.8±180.8           | 557.2                   | 64.1         |
|         | 装修垃圾 | 545.1±72.6            |                         |              |
| 建筑废弃混凝土 |      | 562.6±122.7           | 562.6                   | 100          |
| 工程泥浆    |      | 59.8±41.0             | 0                       | 0            |
| 工程渣土    |      | 10612.1±2219.7        | 3633.1                  | 34.2         |
| 总量      |      | 12104.4±2413.3        | 4752.9                  | 39.3         |

为, 均不纳入“正值资源化率”计算中。

如表1所示, 计算得到的上海市建筑固废“正值资源化率”为39.3%, 主要包括废弃混凝土、拆房和装修垃圾的再生利用。工程渣土占上海市建筑固废总量的87.7%, 但缺乏有效的市场化利用途径, 相应处置仍以消纳为导向, 主要采用填埋和堆放方式, 显著拉低了全市整体的“正值资源化率”。

需要说明的是, 以上海市为分析案例仅是展示“正值资源化率”指标的具体计算方法。实际上, 该指标作为“正-逆向”协同资源化理论框架下的核心评价工具, 计算过程高度依赖特定区域的逆向需求、市场条件、政策环境。在实际应用时, 研究者、决策者还应根据当地情况对“正值资源化率”的界定标准、统计范围等进行相应调整, 以确保评估过程及结果的科学性、适用性。

### 3. “正值资源化率”评价方法的应用效能

工程渣土产生量巨大、资源化路径狭窄, 成为制约整体资源化水平提升的难点。选取上海市工程渣土这一典型类别进行进一步分析, 直观展示“正-逆向”协同资源化理论在量化分析、路径优化、潜力测算方面的应用效能, 直接验证相关理论对资源化关键瓶颈问题的破解能力。

基于“正-逆向”协同资源化理论框架, 构建了工程渣土的量化分析模型, 涉及“正-逆向”协同机制下建造过程中工程渣土的减少量 $B_S$ 、回收利用过程中工程渣土的利用增量 $R_S$ 。

$$B_S = \tau_B S + \pi_B S \quad (2)$$

$$R_S = \tau_R S + \mu S \quad (3)$$

式(2)中,  $S$ 为待优化的工程渣土量, 即工程渣土总量减去正值资源化量;  $\tau_B$ 表示由源头设计带来的工程渣土减少率;  $\pi_B$ 表示通过行政惩罚、约束措施(如限制渣土申报量)带来的工程渣土减少率。式(3)中,  $\tau_R$ 表示因新型再生产品的应用而增加的工程渣土资源化率(此处主要针对地下隧道工程, 见表2);  $\mu$ 表示传统再生产品的市场容量扩大而增加的工程渣土资源化率。

在仅考虑工程渣土优化的情况下, 应用“正-逆向”协同资源化理论得到的总体“正值资源化率”优化值( $\eta'$ )可按式计算:

$$\eta' = \frac{Q_{\text{tot}}^+ + R_S}{G_{\text{tot}} - B_S} \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中,  $Q_{\text{tot}}^+$ 表示优化前的正值资源化总量,  $G_{\text{tot}}$ 表示优化前的建筑固废总量。

表2给出了保守、基准、乐观3种情景下上海市建筑固废“正值资源化率”的预测范围。保守情景对应现有政策框架下的局部优化, 技术推广、市场接纳等进程缓慢, 相关措施仅在小范围示范项目应用中应用。基准情景基于现有技术潜力、中等力度的政策干预进行设定。乐观情景假定形成强有力的跨部门政策协同、持续的技术突破、明确的绿色消费导向, 理论潜力得到充分释放; 要求全面实施绿色建筑标准, 加快创新商业模式, 积极开拓大规模的新型应用, 以显著提升“正值资源化率”。

可分别将保守、基准、乐观情景作为近期、中期、远期的发展目标, 以“正-逆向”协同资源化理论为方案设计依据, 逐步完善现有政策体系, 适时推进强制性绿色设计标准落地, 最终建立跨区域的资源化协同机制, 拓展高附加值再生产品的应用市场。

### (三) 建筑固废“正-逆向”协同资源化理论的适用性分析

本研究完成建筑固废“正-逆向”协同资源化理论框架的项目级应用分析并探讨了相应宏观评价方法、应用提升方向; 在此基础上认识到, 虽然全国范围内建筑固废成分受地域条件影响而存在差异, 但建筑固废“正-逆向”协同资源化理论框架具有良好的适用性, 可以为不同经济水平、产业结构、政策环境的地区提供分析工具和解决方案。一方面, 理论框架强调源头减量设计原则、资源化过程优化、市场需求牵引机制, 覆盖到了资源化内生动力普遍适用的关键环节; 另一方面, “正值资源化率”指标具有通用性, 能够作为各地区系统评估资源化效果的方法论工具。

在考虑不同地区的发展阶段、资源禀赋后, 应用建筑固废“正-逆向”协同资源化理论框架可形成差异化的实施方案。①上海、北京等一线城市, 经济活跃、固废产生强度高(人均建筑固废年排放量 $>5$  t)、土地资源紧张, 导致传统填埋空间基本饱和。这些地区应着力发挥“逆向”高端市场的拉动作用, 促进再生骨料在高等级混凝土、预制构件等场景中的规范化应用; 严格实施绿色建筑设计与拆除规范, 以高值资源化技术替代高能耗处置方式,

表2 不同情景下建筑固废“正值资源化率”范围估算

| 参数       | 参数内涵                                                                                                                                                                                                                                                              | 情景          |             |             |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|          |                                                                                                                                                                                                                                                                   | 保守          | 基准          | 乐观          |
| $\tau_B$ | 在已利用的渣土及隧道工程渣土以外的工程渣土排放量，为建造过程的可优化渣土量；可通过减少地库深度、优化建筑退线、压缩地下结构、合并基坑等方式减少工程渣土产量                                                                                                                                                                                     | 0%~10%      | 10%~20%     | 20%~30%     |
| $\pi_B$  | 目前上海市对超出申报量或乱倒的渣土均进行罚款，为进一步促使相关企业减少工程渣土排放，可以限制渣土申报量                                                                                                                                                                                                               | 0%          | 5%          | 10%         |
| $\tau_R$ | 通过技术革新生产新型的再生产品，支持开发新型建材市场。当前的工程渣土资源化技术包括洗砂、制备陶粒、制砖、流态填充料等，但考虑到上海市的基本情况（因土质含砂率较低而难以应用洗砂技术，制备陶粒或砖块能耗大且市场较为饱和），故此处仅考虑渣土基流态填充料用于隧道工程壁后注浆（肥槽、基坑等回填属于场内回填且已计入表1中的正值资源化统计，故不重复计算），这部分最大约占隧道工程整体开挖量的10%。根据“上海市建筑垃圾数字化智能监管平台”数据计算的隧道工程产生渣土量为总量的22.5%，故 $\tau_R$ 最大值为2.25% | 0%          | 1.125%      | 2.25%       |
| $\mu$    | 传统再生产品的市场容量主要通过绿色需求驱动、建设需求增加来扩大：前者指倡导绿色建筑/建造，如在公共建筑和政府楼宇中优先使用部分工程渣土再生建材，同时考虑进行社区的绿化升级改造，推行可种植屋顶/外墙等；后者包括新增功能性的绿化造景与地形构建，如多地使用“堆山造景”消纳工程弃土，兼顾娱乐、休闲、观光旅游等市场需求 <sup>[20]</sup>                                                                                       | 0%~10%      | 10%~20%     | 20%~30%     |
| $\eta'$  |                                                                                                                                                                                                                                                                   | 39.3%~47.8% | 49.5%~59.6% | 62.0%~74.1% |

加快减碳、节地的双重治理进程。②多数省会城市以及东部城镇化快速推进地区，固废量产生量适中（人均建筑固废年排放量为1~3 t）但增长较快，导致处置能力建设滞后于产生速度。这类地区应避免重复“末端扩容”的传统路径，而是在规划新建处置设施时同步嵌入源头分类引导政策、再生产品市场培育机制，优先发展模块化、易复制的资源化技术，推动资源化体系的跨越式发展。③资源化基础薄弱的地区，固废产生强度较低（人均建筑固废年排放量<1 t），技术水平与管理能力均有限。这类地区应优先推行经济适用的源头减量措施，重点发展适配本地需求的低成本资源化技术（如简易制砖、路基材料生产），逐步建立“微循环”能力，避免盲目引进高成本处置线路而造成投资浪费。

## 六、结语

针对我国建筑固废资源化率仍然不高、处置不当易引发环境与安全风险的现状，本文提出了建筑

固废“正-逆向”协同资源化理论，以动态反馈机制、利益协调机制、风险控制机制作为核心支撑，能够精准破解资源化过程中的系统性瓶颈，强调有效发挥市场需求的牵引作用；从技术、政策、市场3个维度形成具体实施路径，为建筑固废资源化产业从低效处置走向高效增值提供了新范式。在理论构建的基础上，较为全面地探讨了所提理论在建筑固废资源化中的应用情况：以上海市的相关项目为例，剖析了当前主流的“正向”资源化模式具有的局限性，分析了“正-逆向”协同资源化的实践成效；提出了“正值资源化率”评价指标，以上海市工程渣土处理为案例验证了应用效能，辨识出工程渣土占比过高且资源化途径缺乏市场竞争力这一主要制约因素。进一步确认了建筑固废“正-逆向”协同资源化理论框架的适用性，可以为不同经济水平、产业结构、政策环境的其他地区提供分析工具和解决方案。整体上，建筑固废“正-逆向”协同资源化理论是推动“无废城市”建设、实现2030年我国建筑固废资源化率55%阶段性目标的基础支

撑,有助于促进建筑固废资源化管理的系统性变革。

客观来看,建筑固废“正-逆向”协同资源化理论研究与应用仍属初步,还需持续探索和稳健拓展。①深化和细化理论模型,发展针对不同地域特征、多种固废类型的差异化子模型,进一步增强所提理论在具体情境中的适用性。②引入博弈论、行为经济学等工具,深入分析“正-逆向”协同资源化理论框架下管理部门、企业、社会公众等主体的行为逻辑与互动机制,量化各方收益与成本分配,运用计算实验方法模拟不同政策组合的干预效果,为深层次协同治理提供精准的决策依据。③积极探索大数据、人工智能等前沿信息技术在供需平台构建、资源配置优化中的应用,重点构建数据驱动的参数动态评估与优化系统,引入多源数据、机器学习方法,实时标定并动态反馈资源化过程中的关键参数,全面提升建筑固废资源化管理体系的自适应能力与智能化水平,保障“正-逆向”协同资源化理论的精准可靠与广泛应用。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** September 29, 2025; **Revised date:** November 3, 2025

**Corresponding author:** Xiao Jianzhuang is a professor from the Institute of Science and Technology for Carbon Peak and Neutrality of Guangxi University and the College of Civil Engineering of Tongji University. His major research fields include materials, structures and construction of recycled aggregate concrete. E-mail: jzxiao@gxu.edu.cn

**Funding project:** National Key R&D Program of China (2022YFC3803400); Guangxi Science and Technology Program (LT2504240009)

#### 参考文献

- [1] 国家统计局. 城镇化率 [EB/OL]. [2025-10-15]. [https://data.stats.gov.cn/files/html/vchart/vchart\\_001/vchart\\_001.html](https://data.stats.gov.cn/files/html/vchart/vchart_001/vchart_001.html). National Bureau of Statistics. Urbanization rate [EB/OL]. [2025-10-15]. [https://data.stats.gov.cn/files/html/vchart/vchart\\_001/vchart\\_001.html](https://data.stats.gov.cn/files/html/vchart/vchart_001/vchart_001.html).
- [2] 上海市一些地方建筑垃圾违规处置污染环境 [EB/OL]. (2024-06-06)[2025-10-15]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/zysthjbhdc/dcjl/202406/t20240606\\_1075149.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/zysthjbhdc/dcjl/202406/t20240606_1075149.shtml). Improper disposal of construction waste in some areas of Shanghai contaminates the environment [EB/OL]. (2024-06-06)[2025-10-15]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/zysthjbhdc/dcjl/202406/t20240606\\_1075149.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/zysthjbhdc/dcjl/202406/t20240606_1075149.shtml).
- [3] 我国建筑垃圾治理工作取得积极成效 变废为宝 让环境更好 [EB/OL]. (2021-12-09)[2025-10-15]. [https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2021/art\\_304\\_763363.html](https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2021/art_304_763363.html). China makes positive headway in construction waste management: Turning waste into treasure for a greener environment [EB/OL]. (2021-12-09)[2025-10-15]. [https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2021/art\\_304\\_763363.html](https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2021/art_304_763363.html).
- [4] 抓好建筑垃圾源头减量 推进城乡建设绿色发展——部工程质量安全监管司、城市建设司负责人解读《意见》和《手册》 [EB/OL]. (2020-05-15)[2025-10-15]. [https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2020/art\\_304\\_245447.html](https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2020/art_304_245447.html). Strengthening source reduction of construction waste and promoting green development in urban and rural construction—Representatives from the Department of Engineering Quality and Safety Supervision and the Department of Urban Development interpret the “guiding opinions” and the “manual” [EB/OL]. (2020-05-15)[2025-10-15]. [https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2020/art\\_304\\_245447.html](https://www.mohurd.gov.cn/xinwen/gzdt/art/2020/art_304_245447.html).
- [5] 上海市2024年度固体废物污染防治信息公告 [EB/OL]. (2025-06-11)[2025-10-15]. <https://sthj.sh.gov.cn/hbzhwypt1103/hbzhwypt1112/20250611/ddb3131eeca24bac808900a3ff9f6661.html>. Shanghai 2024 solid waste pollution prevention and control information bulletin [EB/OL]. (2025-06-11)[2025-10-15]. <https://sthj.sh.gov.cn/hbzhwypt1103/hbzhwypt1112/20250611/ddb3131eeca24bac808900a3ff9f6661.html>.
- [6] 我国推进建筑垃圾治理和资源化利用 [EB/OL]. (2021-12-10)[2025-10-15]. [http://m.ce.cn/lv/gd/202112/10/t20211210\\_37158769.shtml](http://m.ce.cn/lv/gd/202112/10/t20211210_37158769.shtml). China promotes construction waste management and recycling [EB/OL]. (2021-12-10)[2025-10-15]. [http://m.ce.cn/lv/gd/202112/10/t20211210\\_37158769.shtml](http://m.ce.cn/lv/gd/202112/10/t20211210_37158769.shtml).
- [7] Akhtar A, Sarmah A K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 262–281.
- [8] Zhang C B, Hu M M, Di Maio F, et al. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 149892.
- [9] 赵志超. 利益相关者视角下的建筑固废资源化产业链驱动机制研究 [D]. 南京: 东南大学(硕士学位论文), 2023. Zhao Z C. Research on the driving mechanism of the construction and demolition waste recycling industry chain from the perspective of stakeholders [D]. Nanjing: Southeast University (Master's thesis), 2023.
- [10] 范向前, 史晨雨. 再生骨料透水混凝土研究现状 [J]. *混凝土*, 2023 (9): 141–144, 154. Fan X Q, Shi C Y. Research status of recycled aggregate pervious concrete [J]. *Concrete*, 2023 (9): 141–144, 154.
- [11] 王春龙, 穆锐, 刘宁波, 等. 再生混凝土的制备与力学性能研究进展 [J/OL]. *硅酸盐通报*, 1–20. [2025-10-15]. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2025.0548>. Wang C L, Mu R, Liu N B, et al. Research progress on preparation and mechanical properties of recycled aggregate concrete [J/OL]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 1–20. [2025-10-15]. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2025.0548>.
- [12] 马昆林, 刘建, 申景涛, 等. 砖混再生粗骨料及其在混凝土中的研究与应用进展 [J]. *材料导报*, 2023, 37(18): 119–130. Ma K L, Liu J, Shen J T, et al. Research and application progress

- of mixed recycled coarse aggregate and its application in concrete [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(18): 119–130.
- [13] 肖建庄, 马旭伟, 刘琼, 等. 全再生混凝土概念的衍化与研究进展 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2021, 38(2): 1–15.  
Xiao J Z, Ma X W, Liu Q, et al. Evolvement and research progress of concept for full recycled concrete [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2021, 38(2): 1–15.
- [14] 李阳, 逯光辉. 利用装修垃圾再生骨料和炉底渣研制轻质隔墙条板 [J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(11): 5–8.  
Li Y, Lu G H. Development of lightweight panel for partition wall used with recycled aggregate from the decoration waste and furnace bottom slag [J]. *New Building Materials*, 2020, 47(11): 5–8.
- [15] 谢尚锦, 张金星, 袁静, 等. 装修垃圾再生骨料混凝土砖基本性能试验研究 [J]. *混凝土*, 2020 (11): 137–140.  
Xie S J, Zhang J X, Yuan J, et al. Experimental study on basic performance of decoration waste recycled aggregate concrete brick [J]. *Concrete*, 2020 (11): 137–140.
- [16] Xiao J Z. *Recycled aggregate concrete structures* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2018.
- [17] 谢晓军, 刘洪辉, 赵亚婉, 等. 建筑垃圾浸水路基强度特性试验及工程应用研究 [J]. *公路*, 2023, 68(9): 123–128.  
Xie X J, Liu H H, Zhao Y W, et al. Study on strength characteristics test and engineering application of subgrade immersed in construction waste [J]. *Highway*, 2023, 68(9): 123–128.
- [18] 肖源杰, 王小明, 李文奇, 等. 基于高效颗粒破碎算法的再生骨料路基填料颗粒破碎微观机理 [J/OL]. *土木工程学报*, 1–18. [2025-10-15]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcx.24040292>.  
Xiao Y J, Wang X M, Li W Q, et al. Assessing the particle crushing mechanism for recycled aggregates in road bases using an efficient DEM particle crushing method [J/OL]. *China Civil Engineering Journal*, 1–18. [2025-10-15]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgcx.24040292>.
- [19] 刘喜. 建筑垃圾在公路路基中的再生应用研究 [J]. *公路工程*, 2019, 44(4): 208–212.  
Liu X. Research on the application of construction waste regeneration in highway subgrade [J]. *Highway Engineering*, 2019, 44(4): 208–212.
- [20] 沈剑羽, 肖建庄, 高琦, 等. 工程弃土复配及再生砖性能试验 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(4): 990–1005.  
Shen J Y, Xiao J Z, Gao Q, et al. Compound mixing and properties of recycled brick with construction spoil [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(4): 990–1005.
- [21] 肖建庄, 沈剑羽, 高琦, 等. 工程弃土现状与资源化创新技术 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(4): 1–13.  
Xiao J Z, Shen J Y, Gao Q, et al. Current situation and innovative technology for recycling of engineering waste soil [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(4): 1–13.
- [22] 肖建庄, 沈剑羽, 段珍华, 等. 工程渣土资源化基础问题与低碳技术路径 [J]. *科学通报*, 2023, 68(21): 2722–2736.  
Xiao J Z, Shen J Y, Duan Z H, et al. Basic problems and low-carbon technical path of construction spoil recycling [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(21): 2722–2736.
- [23] 肖建庄, 沈剑羽, 马少坤, 等. 平陆运河土石方多路径利用的基础问题与解决途径 [J]. *中国工程科学*, 2024, 26(1): 251–262.  
Xiao J Z, Shen J Y, Ma S K, et al. Fundamental issues and solutions for multi-path utilization of earthwork in the Pinglu Canal Project [J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(01): 251–262.
- [24] 张瑞东. 建筑垃圾再生料吸音陶粒的制备与性能研究 [D]. 柳州: 广西科技大学(硕士学位论文), 2018.  
Zhang R D. Preparation and performance of sound-absorbing ceramics made from recycled construction waste [D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology (Master's thesis), 2018.
- [25] 周永祥, 霍孟浩, 侯莉, 等. 低强度流态填筑材料的研究现状及展望 [J]. *材料导报*, 2024, 38(15): 126–134.  
Zhou Y X, Huo M H, Hou L, et al. Current research and prospect of low strength flowable filling materials [J]. *Materials Reports*, 2024, 38(15): 126–134.
- [26] 苏悦, 闫楠, 白晓宇, 等. 预拌流态固化土的工程特性研究进展及应用 [J]. *材料导报*, 2024, 38(9): 66–72.  
Su Y, Yan N, Bai X Y, et al. Research progress and application on engineering characteristics of ready-mixed fluid solidified soil [J]. *Materials Reports*, 2024, 38(9): 66–72.
- [27] 水亮亮, 郑晓光, 戴腾, 等. 流态固化土流动性和强度的影响因素及机理研究 [J/OL]. *建筑材料学报*, 1–11. [2025-10-15]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1764.TU.20250624.1820.002>.  
Shui L L, Zheng X G, Dai T, et al. Study on influencing factors and mechanism of fluidity and strength of fluidized solidified soil [J/OL]. *Journal of Building Materials*, 1–11. [2025-10-15]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1764.TU.20250624.1820.002>.
- [28] 肖建庄, 王劫耘, 程耀飞, 等. 数字化时代下现代运河工程渣土资源化利用技术现状与展望 [J]. *前瞻科技*, 2025, 4(3): 118–128.  
Xiao J Z, Wang J Y, Cheng Y F, et al. Resource utilization technologies and prospects for construction spoil in modern canal engineering in the digital era [J]. *Science and Technology Foresight*, 2025, 4(3): 118–128.
- [29] 肖建庄, 陈家珑. 建筑固废资源化与产业化 [M]. 北京: 科学出版社, 2024.  
Xiao J Z, Chen J L. Reclamation and industrialization for construction and demolition waste [M]. Beijing: Science Press, 2024.
- [30] 叶晓魁, 石世英. 基于利益相关者理论的建筑垃圾资源化研究 [J]. *建筑经济*, 2014, 35(1): 101–106.  
Ye X S, Shi S Y. Research of construction and demolition waste recycling based on stakeholder theory [J]. *Construction Economy*, 2014, 35(1): 101–106.
- [31] 陈禹仲. 重庆市建筑垃圾资源化利用政策的问题及对策研究 [D]. 重庆: 重庆大学(硕士学位论文), 2022.  
Chen Y Z. Research on problems and countermeasures of construction waste recycling policies in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University (Master's thesis), 2022.
- [32] 胡鸣明, 杨美文. 基于政策工具的我国建筑垃圾资源化政策分析 [J]. *建筑经济*, 2019, 40(2): 22–26.  
Hu M M, Yang M W. Analysis of the policies of construction waste recycling in China based on policy tools [J]. *Construction Economy*, 2019, 40(2): 22–26.
- [33] 傅为忠, 潘玉, 王丹. “双碳”背景下建筑垃圾资源化政策量化研究 [J]. *建筑经济*, 2022, 43(S1): 562–565.

- Fu W Z, Pan Y, Wang D. Quantitative research on construction waste resource utilization policy under background of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Construction Economy*, 2022, 43(S1): 562–565.
- [34] Wang B, Yan L B, Fu Q N, et al. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 171: 105565.
- [35] Dolara E, Di Niro G, Carins R. RAC prestressed beams; proceedings of the sustainable construction: Use of recycled concrete aggregate [R]. London: The International Symposium Organised by the Concrete Technology Unit, University of Dundee, 1998.
- [36] Study on concrete recycling (in German) [EB/OL]. [2025-10-15]. <https://www.dbu.de/projektdatenbank/02952-01/>.
- [37] Use of recycled concrete in Germany [EB/OL]. [2025-10-15]. [https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Inspiration/betonprisma/betonprisma\\_114\\_Kreisla%CC%88ufe\\_online.pdf](https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Inspiration/betonprisma/betonprisma_114_Kreisla%CC%88ufe_online.pdf).
- [38] 严南南, 李明. 基于低碳的报废汽车逆向物流网络选址问题研究 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(5): 180–184.
- Yan N N, Li M. Location selection for logistics network for recycled scraped motorcar based on low-carbon principle [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2016, 35(5): 180–184.
- [39] 甘俊伟, 孔瑞晓. 报废汽车逆向物流网络设计研究进展及趋势 [J]. *现代制造工程*, 2022 (12): 131–143.
- Gan J W, Kong R X. Progress and prospects of end-of-life vehicles reverse logistics network design [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2022 (12): 131–143.
- [40] 贾小龙, 付锐, 王雷. 闭环供应链下汽车逆向物流网络设施选址 [J]. *科技导报*, 2009, 27(12): 79–84.
- Jia X L, Fu R, Wang L. The location selection of automobile reverse logistics network within closed-loop supply chains [J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(12): 79–84.
- [41] Tang Q, Ma Z M, Wu H X, et al. The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114: 103807.
- [42] Xiao J Z, Ma Z M, Sui T B, et al. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 720–731.
- [43] 上海市建筑垃圾数字化智能监管平台 [EB/OL]. [2025-10-15]. <https://ztfwjg.lhsr.sh.gov.cn/shcws/index.html#/publicIndex>.
- Shanghai construction waste digital intelligent supervision platform [EB/OL]. [2025-10-15]. <https://ztfwjg.lhsr.sh.gov.cn/shcws/index.html#/publicIndex>.