

# 建筑垃圾资源化的现状及 LCA 在其领域的应用

许佳为

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 在国家快速城镇化的时期, 如何资源化利用持续增长的建筑垃圾成为行业高度关注的课题, 但与其配套的环境影响衡量方法仍亟待完善。Life cycle assessment (LCA) 作为环境影响评估框架, 能准确量化建筑垃圾资源化对生态环境的影响。然而, 绝大多数和建筑相关的生命周期理论研究将重点放在建筑生命周期特定阶段的碳排放与能耗评价, 缺少多样化环境指标的评估, 与 Life Cycle Cost (LCC) 结合进行成本与环境效益的综合评估仍处于萌芽阶段。因此, 建议针对我国建筑垃圾现存问题, 以 LCA-LCC 集成方法建立多指标的建筑垃圾评估系统, 以促进建筑垃圾高质量与可持续利用。

**关键词:** 建筑垃圾; 资源化利用; LCA; LCC

中图分类号: X799.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1675(2023)04-193-03

DOI:10.16673/j.cnki.jcfzdx.2023.0055

目前, 全世界每年产生的固体废物总量约为 170 亿 t, 预计到 2050 年将达到 270 亿 t。目前为止, 大部分建筑垃圾都是未经进一步处理而堆填的, 其过程占用宝贵的土地、排放各种污染物、消耗原材料和能源, 对环境构成重大威胁。而资源化处理可成为减少环境损伤的有效手段, 其回收和再利用具有双重的有益效果, 避免了填埋处理及过度开采天然砂石骨料。为此, 从废物管理和资源效率的角度来看, 建筑垃圾的减量化与资源有效管理已引起世界各国及社会各界的广泛关注。

LCA 是一种衡量区域废弃物管理体系环境效应的重要方法, 有必要量化多指标来评估建筑垃圾资源化带来的环境负载。越来越多的学者开始结合 LCA, 围绕建筑垃圾资源化展开探究, 重点评价不同途径对应的环境影响。一些学者们聚焦于比较不同建筑垃圾管理系统与处理方法对环境的影响, Hossain 等 (2017) 以 LCA 的方法评估香港三个建筑垃圾管理方案 (非现场分拣、现场分拣、直接填埋) 的环境影响。Wang 等 (2018) 通过 BIM 和 LCA 来比较深圳市现场回收、工厂回收、直接填埋建筑垃圾的相关影响。与此同时, 虽然也有不少学者围绕着单个建筑物产生的建筑垃圾的影响展开探究, 但主要聚焦于拆除建筑产生的碳排放量、能耗等单一指标, 而较少涉及多种指标。

本文将建筑垃圾资源化途径为研究对象, 分析国内外的相关政策与目前建筑垃圾回收利用的现状, 归纳 LCA 在评估建筑垃圾处理产生的环境影响的应用, 并提出 LCA-LCC 集成方法在建筑垃圾资源化的探索, 为切实推进建筑垃圾资源化利用提供必要的参考依据和政策启示。

## 1 国内外建筑垃圾回收利用进展

### 1.1 政策法规

在城市化进程中, 世界各国早已认识建筑废弃

物是危害性和再资源化的统一体。发达国家, 如日本、美国、德国, 对建筑垃圾资源化利用已步入全面发展完善阶段, 并开展一系列建筑垃圾源头减量化措施。

由于我国对建筑垃圾认识不足、起步晚、分类程度低, 且基础建设相对不足, 并不适合许多国家采取的源头削减策略。因此, 在既有条件下提高我国建筑垃圾资源化的监督机制、扩展资源化的途径是我国处理建筑垃圾的可行途径。

在法律体系方面, 随着我国建筑垃圾的问题日益严重, 2013 年, 我国将《绿色建筑行动方案》作为指导文件, 正式开始实施建筑垃圾处理制度, 地级以上城市设立建筑垃圾集中处置中心。“十三五”时期, 先后颁布启动城市固废资源化利用的相关政策法规《关于开展建筑垃圾治理试点工作的通知》(2018) 等、《上海市生活垃圾管理条例》, 提出城市生活垃圾在内的环境综合治理思路, 部分条例规定个人或单位未按规定分类投放生活垃圾都将面临处罚, 我国建筑垃圾处理开始步入立法强制时代。

然而, 国内法律法规对建筑垃圾的法律规制仍停留在传统的控制生产与运输环节, 且建筑垃圾再生产品相关的基础标准、生产标准、应用标准尚不健全。

### 1.2 建筑垃圾资源化途径

#### 1.2.1 国外进展

循环利用建筑垃圾是一种理想的经济环保的处理方法。其中, 道路作为体量最大的人造工程, 路基路面、地基处理及其附属设施均需消耗大量建筑垃圾资源。因此, 若能将建筑垃圾在道路建造中推广应用, 将可成为实现其最大程度资源化利用的有效途径, 故国外学者将其作为研究建筑垃圾资源化利用的起点方向。

由于建筑垃圾成分复杂, 在荷载、温度和湿度作用下易发生破碎, 且其强度较低而吸水率较高,

故在建筑垃圾再生料在道路基层及底基层的应用中，针对其性能影响与改善措施的研究较多。在再生骨料对天然骨料的替代方面，Vegas I 等（2008）、J. R. Jiménez 等（2012）经研究表明，再生骨料可作为基层、底基层和路堤材料。在再生沥青路面（RAP）废料方面，Joseph Ejelikwu Edeh 等（2018）改变 RAP、采石场废料（QW）和水泥（C）混合物的各种比例进行测试，并得出适用于路面的比例。

然而，由于建筑垃圾再生骨料的低强度，其只能代替 20%~30% 的路面骨料，相比之下，路基材料对其性能要求较低，建筑垃圾可无需经过水洗加工后用于路基填筑；且路基填料对土石的需求量巨大，将建筑资源再生料运用于路基填筑，不仅可以节约大量土壤资源，还可得到充分利用。Isaac Del Rey 等（2016）通过对比三条试验路段（分别由天然骨料、再生骨料、底基层再生骨料和基层天然骨料组成），发现再生料路基段在回弹模量、表面平整度等多方面均满足要求。

### 1.2.2 国内进展

随着我国基础设施的发展，建筑用砂石量不断增加，经过几十年的大量开采，许多地区的天然砂资源已接近枯竭，无序、大量的采砂破坏了自然景观和生态环境，也影响了堤防安全。因此，环境效益是建筑垃圾资源化利用的关注重点。鄢朝勇等（2013）对比生态绿色砂浆与天然砂浆的性能，发现

建筑垃圾再生料对砂浆的强度无明显不利影响，证实其可行性。尹博文等（2015）在喷筑墙体浆料中掺加再生细骨料，测试表明其性能（表观密度、吸水率、需水量比等）达到国家规范标准。于媛等（2020）分析 C20 再生混凝土的抗压性能和抗剪性能，发现其性能优于或相当于与天然混凝土。

除却环境效益，经济可行性是我国推进建筑垃圾资源化的重要指标。在路面基层应用方面，张大宁等（2010）得到建筑垃圾混合基层材料配比，对比同等水泥剂量的砂砾路面基层相应造价，发现使用建筑垃圾破碎土基层或底基层可降低 30% 道路材料成本。在加固软土地基方面，7 层以下的多层及低高层建筑物，可直接在夯击坑中填充一定粒径的建筑垃圾，并使夯锤自由落下夯击原地基，以加固软土地基，此法不但可减少分选难度，同时造价低、工期短、施工设备及工艺简单，具有较高的经济效益。

## 2 建筑垃圾回收利用的生命周期评价

### 2.1 国外 LCA 应用实例

LCA 是一种评估产品或系统的潜在环境影响和经济成本的方法，它考虑了整个生命周期内的环境交换和经济投入与产出。在过去几年中，它在国外被广泛用于建筑垃圾回收利用中，涉及多种环境影响因子，如表 1 所示。

表 1 近年 LCA 在国外建筑垃圾资源化的应用

作者	主要内容	涉及的影响因子*							
		GWP	TA	FD	POCP	HT	EC	E	NLT
Bruno Peuportier	开发 LCA 工具，评估建筑项目从施工到拆除的环境影响（2008） [1]	✓	✓				✓	✓	
Francesca Intini	评估了住宅建筑使用废 PET 的能源和环境效益（2011） [2]	✓	✓					✓	
Sylvain Guignot	对两种碎石类废物的回收利用方案进行环境比较（2015） [3]	✓	✓	✓					
J Pešta	利用生命周期评估评估回收建筑和拆卸废物的环境影响（2019） [4]			✓	✓	✓		✓	✓
Ilenia Farina	研究了以木粉、木纤维等形式的废木材材料在水泥砂浆中的利用（2020） [5]		✓					✓	
Andrea Di Maria	使用 LCA 和 LCC 分析比较不同的报废方案（2020） [6]	✓				✓			

\* Global warming potential 全球变暖潜力 (GWP); Terrestrial acidification 土地酸化 (TA); Fossil fuel depletion 化石燃料的消耗 (FD); Photochemical ozone creation potential 光化学臭氧形成潜力 (POCP); Human toxicity 人体毒性 (HT); Energy consumption 能源消耗 (EC); Eutrophication 富营养化 (E); Natural land transformation 自然土地转换 (NLT)

## 2.2 国内 LCA 应用实例

目前国内 LCA 在建筑生命周期特定阶段（施工、运营、拆迁等）的碳排放与能耗评估已相当完善。王婧等（2007）利用生命周期方法，通过清单建模及计算，分析了 12 种建材产品生产的生命周期能耗与大气污染物排放。

顾丽静等（2008）考虑能源消耗、资源消耗和污染物排放三大类环境影响，建立了中国建筑全生命周期环境负荷评价体系。

张小玲等（2013）以具体案例，重点量化建筑施工阶段的八种气体排放，有助于在选择建筑材料、施工方法和使用建筑物的方式时确定最佳解决方案，以最大限度地减少空气排放量。

李頔（2019）针对国内关于城市道路碳排放研究的不足，以 LCA 构建城市道路养护工程碳排放测算方法，探究各交织因素对碳排放的影响情况，并扩展了城市道路养护阶段碳排放研究的系统边界。

然而，随着酸雨、富营养化、灰尘和固体废物等环境问题变得越来越严重，除了碳排放与能耗之外，还应考虑资源和各种污染物对环境的影响。过去几年，国内相关学者开始结合多种指标，基于 LCA 方法量化和改善建筑垃圾的环境影响。

张军辉等（2020）对比了回收利用与直接填埋建筑垃圾在生命周期中五项环境影响因子（全球变暖、富营养化、酸化、生态毒性、灰尘和煤烟），发现建筑垃圾的循环利用可明显降低富营养化和生态毒性对环境的影响，有利于环境保护。

仅对建筑垃圾进行环境效应评价是片面的，而 LCA 只能评价建筑垃圾资源化利用的环境影响程度，不能评价其环境成本，也不能对其投资成本进行评估，从而得不到其环境经济的综合评价结果，限制建筑垃圾再生料的推广应用。

针对 LCA 评价的局限性，国内学者开始探索 LCA-LCC 集成方法，张翔杰（2015）对环境成本下的建筑生命周期成本进行分析，李奇莞等（2017）基于 BIM，通过 LCA 和 LCC 方法对建筑在不同节能目标情景下 GWP、能耗和成本进行分析与比较。但 LCA-LCC 模型主要应用于建筑生命周期特定阶段，在建筑垃圾资源化利用方面仍有较大探索空间。

## 3 结语

针对国内外建筑垃圾资源化利用现状和有关的 LCA 研究工作现状，为加强我国建筑垃圾资源化的利用和管理，提出以下建议。

第一，建筑垃圾资源化发展应从源头控制做起，完善我国相关的分类、回收、处理的法律法规和技术规范，并以法规形式确定建筑垃圾处理责任人。

第二，建筑垃圾资源化应走产业化发展之路，促进建筑垃圾产业链的发展，相关政策应鼓励相关产业使用再生资源产品，同时鼓励建立建筑垃圾回收企业。

第三，应在设计阶段结合 LCA，考虑多种环境指标全面量化建筑垃圾资源化在生命周期产生的环境影响。此外，若能逐步统一全球公认的建筑垃圾生命周期的评估指标，将便于对比相关建筑垃圾资源化的案例研究。

第四，可探索 LCA-LCC 集成方法在建筑垃圾资源化的利用，综合环境与经济指标评估其影响与效益。

### 参考文献:

- [1]李树逊,罗攀,庞晓明,等.建筑垃圾资源化利用状况及其生命周期评价[J].复旦学报(自然科学版).2013,52(06):817-821+828.
- [2]李頔.基于LCA的城市道路养护工程施工活动及交通影响碳排放研究[D].陕西,长安大学,2020.
- [3]张齐,孙怀涛.国内外建筑垃圾处理政策法规对比分析[J].环境保护与循环经济,2020,40(01):85-87.
- [4]J Pešta and T Pavlu and V Koci. Life Cycle Assessment of Recycling Processes for Demolition Waste [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 290(1): 012026 (8pp).
- [5]Ince Ceren and Tayancil Seval and Derogar Shahram. Recycling waste wood in cement mortars towards the regeneration of sustainable environment [J]. Construction and Building Materials, 2021, 299.
- [6]Di Maria Andrea and Eyckmans Johan and Van Acker Karel. 26 - Use of LCA and LCC to help decision-making between downcycling versus recycling of construction and demolition waste [M]. 2020: 537-558.

收稿日期:2022-12-13

作者简介:许佳为(2001-)女,福建厦门人,本科,研究方向:土木工程。

(责任编辑:高峰)