

文章编号: 0427-7104(2013)06-0817-05

建筑垃圾资源化利用状况及其生命周期评价

李树逊¹, 罗攀¹, 庞晓明¹, 张韦倩², 刘燕², 王寿兵²

(1. 上海浦东工程建设管理有限公司, 上海 201210; 2. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

摘 要: 分析了国内外建筑垃圾资源化利用进展, 系统地回顾了近年来生命周期评价在建筑垃圾回收利用中的应用, 重点归纳了生命周期方法在道路改扩建中的资源化利用实例. 结果表明, 生命周期评价可以有效地衡量建筑垃圾资源化过程中造成的环境影响, 且在道路工程建设中, 废弃物的回收利用可以有效降低建设成本 and 环境污染. 针对我国建筑垃圾现存的问题, 提出建筑垃圾资源化发展应从源头控制做起, 走产业化发展之路, 注重生命周期评价和生命周期管理在建筑垃圾资源化中的应用.

关键词: 建筑垃圾; 生命周期评价; 资源化利用

中图分类号: P 343.1

文献标志码: A

随着我国城镇化、工业化进程的不断加快, 城市文明在快速发展的同时, 也带来了大量的建筑垃圾. 据统计, 2010 年, 全国城市建筑垃圾排放量已高达每年 $2.10 \times 10^{12} \sim 2.80 \times 10^{12} \text{ kg}$ ^[1], 占城市固体废弃物重量的 30%~40%^[2]. 建筑垃圾的大量排放不但占用了宝贵的土地资源, 造成了空气污染、水体污染, 更破坏了城乡居民的生活环境. 生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是一种衡量区域废弃物管理体系环境效应的重要方法, 通过确定和量化研究能量、物质消耗及废弃物的环境排放来评估环境负载^[3]. 本文分析了国内外建筑垃圾回收利用现状, 回顾了生命周期评价在建筑垃圾回收利用中的应用, 重点分析了道路改扩建中建筑垃圾资源化的环境效应, 为我国更好地开展建筑垃圾资源化利用提供参考意见.

1 国内外建筑垃圾回收利用进展

1.1 国外建筑垃圾回收利用状况

建筑垃圾的回收和再循环再利用, 不仅保护环境, 节约资源, 还关系到建筑业的可持续发展. 发达国家, 如日本、美国和德国, 采用科学管理和有效的控制手段, 开展了一系列建筑垃圾源头减量化措施.

早在 1977 年, 日本政府就制定了《再生骨料和再生混凝土使用规范》, 并在各地建立了以处理混凝土废弃物为主的再生加工厂. 1991 年又制定了《资源重新利用促进法》, 规定建筑施工过程中产生的渣土、木材、金属、混凝土块及沥青混凝土块等建筑垃圾, 均须送往“再资源化设施”进行处理^[4].

美国的建筑垃圾综合利用分为三个等级, 分别为“低级利用”、“中级利用”和“高级利用”. 其中, “低级利用”占建筑垃圾总量的 50%~60%, “中级利用”约为 40%^[4]. 美国的《超级基金法》规定: “任何生产有工业废弃物的企业, 必须自行妥善处理, 不得擅自随意倾倒”. 从而使企业自觉寻求解决建筑垃圾的方法^[5].

作为世界上最早推行环境标志的国家, 德国在每个地区都建造了大型的建筑垃圾再加工综合工厂. 其中, 首都柏林就建有 20 多个. 1998 年 8 月, 德国钢筋委员会提出了“在混凝土中采用再生骨料的应用指南”(Beton mit rezykliertem Zuschlag), 规定采用再生骨料的混凝土必须达到天然骨料混凝土的国家标准, 规范了再生混凝土在建筑中的应用^[5].

生命周期评价在国外的市政工程建设中, 特别是道路改扩建工程, 也得到了广泛的应用. Mroueh 等 (2001)^[6]运用 LCA 比较了将粉煤灰、粉碎的混凝土以及粒化高炉矿渣回收利用到道路不同层面中的环境

收稿日期: 2012-09-22

基金项目: 上海市科委科技攻关资助项目 (11231202100)

作者简介: 李树逊 (1971-), 男, 博士, 高级工程师; 王寿兵 (1970-), 男, 副教授, 通讯联系人, E-mail: sbwang@fudan.edu.cn.

影响,并将其与原道路建设中的环境影响进行了对比.结果表明,使用粉碎的混凝土、粒化高炉矿渣降低了对环境的影响,其中,运输距离对 LCA 结果也有着重要的影响.

Birgisdottir 等(2007)^[7]运用 ROAD-RES model,分析了炉底灰在道路建设中运用的可行性.分析涉及了 12 种环境影响因子,结果表明,对于道路改扩建中回收运用炉底灰需要特别注意生态毒性以及重金属浸出等因素. Chowdhury 等(2010)^[8]将工业副产品,如燃煤飞灰、煤炭底灰以及再生混凝土路面(Recycled Concrete Pavement, RCP)作为新建道路全部或部分的替代材料,从而评价各种替代方案的环境污染影响、花费以及能源消耗.通过 LCA 技术,比较了 GWP、AP 以及毒性因子.结果发现,单独的替代方案并不能得到最优的环境效益. Li 等(2010)^[9]将 LCA 模型运用到工程建筑的系统中去,并使用伤残调整寿命年(Disability Adjusted Life Year, DALY)这一因子来评价了建筑尘土对人体健康的影响.

综上,固体废弃物,如建筑垃圾,回用到道路工程建设中可以有效地降低成本,减少原材料带来的环境影响.

1.2 国内建筑垃圾回收利用状况

1.2.1 法律法规

从 1992 年起,我国相继出台了一系列固体废弃物相关的法律法规,如表 1 所示^[10-12].

表 1 我国与建筑垃圾相关的法律法规
Tab. 1 Laws and regulations relevant with construction waste in China

日期	法 规 条 例	具 体 内 容
1992 年	《城市市容和环境卫生管理条例》	第 16 条对城市工程的施工现场、临时工地、停工现场以及竣工现场的材料、机具堆放及垃圾的清运、填埋作出了规定
2002 年	《清洁生产促进法》	企业清洁生产的义务与法律责任规定不对等,将污染物减量和综合利用等清洁生产内容作为环境影响评价事项予以规定,但由于该法在法律责任部分未作出相应规定
2002 年	《排污费征收使用管理条例》	第 7 条及第 12 条第 3 款规定了对固体废弃物按照种类与数量征收排污费制度;但是两者并未涉及到建筑垃圾资源化的问题,只是针对建筑垃圾的管理以及排污费的征收和使用
2004 年	《固体废弃物污染环境防治法》	第 15 条规定了对建筑垃圾管理的现场检查制度明确相关监管部门的责任;第 31 条规定要求从源头控制固体废弃物的产生,即采用先进生产工艺减少工业固体废弃物的产生;第 32 条与第 57 条规定了对固体废弃物处理的申报登记与许可证制度
2005 年	经修订的《城市建筑垃圾管理规定》	规定建筑垃圾处置实行收费制度,并明确建筑垃圾生产者运输者及处理者的责任,对其不按规定处理建筑垃圾的罚则也作了详细的规定
2007 年	《节能减排综合性工作方案》	第 25 条推进资源综合利用.大力发展利废新型建筑材料,废弃物实现就地消化,减少转移.到 2015 年,工业废弃物综合利用率达到 72% 以上
2008 年	《循环经济促进法》	第 23 条第 1 款要求建筑设计建设施工等要节约资源与能源,有条件还要使用可再生能源.第 23 条第 2 款及第 33 条国家鼓励对无害的建筑废弃物生产建筑材料以及要求建设单位对施工过程中的建筑废弃物进行综合利用与无害化处置
2009 年	《建筑垃圾处理技术规范》(CJJ 134-2009)	规范适用于建筑垃圾的收集、运输、转运、利用、回填、填埋的规划、设计和管理

但仍然存在以下几个问题.首先,我国建筑垃圾法律法规的指导思想依然着眼于末端处理,并未从废弃物产生到最终处置全过程加以规制.其次,在法律责任的落实上也没有专门针对建筑垃圾管理利用的责任制度予以配套,对建筑垃圾的综合利用缺乏积极的推动作用.一方面,政府、公众及非政府组织倾向于减少建筑垃圾填埋的总量;另一方面,工程方、承包商及转包商注重经济利益而忽略了环境效益.社会、公众及企业的责任不明导致了政府独立承担建筑垃圾处置责任.再次,对建筑垃圾的法律规制还停留在传统的控制生产与运输环节,涉及建筑垃圾及其循环利用方面的规范仍然很少.

法律制度的不健全,给城市化进程的可持续发展埋下了重大的隐患,我国应从“资源”的视角来构建有关建筑垃圾处置的法律制度,提升建筑垃圾的再生利用率,以变废为宝,源头控制的方式来解决我国城市化面临的垃圾围城的难题.

1.2.2 资源化利用方法

我国学者也对建筑垃圾的处理和回收利用做了很多有益的尝试,取得了一些可喜进展:

- (1) 建筑垃圾可应用于生产粗、细骨料 建筑垃圾中的废旧混凝土通过分拣、剔除后,被粉碎成相应的大小,作为建筑行业的原料用于新的建筑工程上去.例如,建筑垃圾粉碎成的细骨料可与标准砂按 1 : 1 的比例拌合成混合的细骨料,作为抹灰砂浆和砌筑砂浆材料^[13].
- (2) 建筑垃圾作为道路基层材料的应用 建筑垃圾经过适当的处理,粉碎废旧砖石和混凝土,调整配比,加入适当量的水泥.祖加辉^[14]测试了水泥稳定建筑垃圾材料的路面性能,结果表明,随水泥含量的增加,水泥稳定后的建筑垃圾的抗压强度增大.肖田等^[15]研究了用石灰粉煤灰稳定建筑垃圾后材料的路用性能,结果表明试验中石灰粉煤灰稳定建筑垃圾的强度均能满足轻交通底基层材料的要求.建筑垃圾在城市中的就地处理、就地利用不仅可以大大减少建设过程中对天然砂石及土的消耗,减低道路建设的成本,而且保护城市周边的生态环境,是科学而有效的建筑垃圾再生利用途径之一.
- (3) 建筑垃圾生产标准砖、多空砖、空心板、空心砌块等再生产品 建筑垃圾中的砖瓦和混凝土破碎成相应的大小颗粒后,可作为再生砖的骨料,再铺以相应的材料便可以制成高性能再生砖.例如,用再生砖制成的铺路砖具有超强的透水性.透水性好的铺路砖,不仅保障了行人的行路安全,还有效地提高了地表水和地下水的循环能力,减少了水土流失.此外,这些再生的铺路砖还具有耐磨、耐腐蚀性能及抗冻融性能,使砖的断裂现象大大减少^[13].
- (4) 建筑垃圾再生利用的其他用途 建筑垃圾中的废弃钢材钢筋以及其他的废金属材料,分拣出来后可直接用于那些对钢材钢筋要求不高的小型或临时性的建筑设施,或把这些材料回炉后加工生产新的产品^[13];废砖瓦经清理可以重新使用;废瓷砖、陶瓷洁具经破碎分选、配料压制成型生产透水地砖或烧结地砖;废玻璃筛分后送玻璃厂做原料,用于生产玻璃或生产微晶玻璃;木门窗、木屋架可重复利用或经加工再利用,也可用于制造中密度纤维板等.

2 建筑垃圾回收利用的生命周期评价

2.1 建筑垃圾回收利用中的 LCA 实例

作为一种系统评价环境影响的有效工具,国外已经成功将 LCA 应用到了建筑垃圾回收利用中,涉及的环境影响因子已达 10 多种,如表 2 所示.

表 2 2000 年以来 LCA 在建筑垃圾资源化利用的实例^[16-28]
Tab. 2 Literature review of LCA application in construction waste unitization since 2000

作 者	主 要 内 容	涉及的影响因子*												
		GWP	A	E	POCP	HT	EL	WC	DA	W	EC	RS	AR	O
Adalberth et al.	评价了瑞典四个居民区建筑的生命周期(2001)	×	×	×	×	×	×							
Arena and Rosa	利用 LCA 分析 Mendoza 学校建筑中回收技术实行情况(2003)	×		×			×					×		×
Asif et al.	分析了苏格兰 8 个不同居民区建筑材料的生命周期(2005)	×												
Gustavsson and Sathre	分析了瑞典木材和水泥在再生建筑中的生命周期评价(2006)													×
Jian et al.	日本 Hyogo 土地调整过程中生命周期评价(2003)	×					×	×		×				
Junnila	利用 LCA 评价芬兰办公室建筑制造过程(2004)	×	×	×			×							×
Koroneos and Dompros	希腊建筑垃圾制砖的生命周期评价(2006)	×	×	×						×				×
Mroueh et al.	芬兰道路建筑资源化利用的 LCA 评价(2001)											×	×	×
Nebel et al.	德国路面材料的 LCA 分析(2006)	×	×	×	×									×
Nicoletti et al.	比较了意大利不同路面砖的生命周期(2002)	×	×		×	×			×					×

(续表)

作 者	主 要 内 容	涉及的影响因子*												
		GWP	A	E	POCP	HT	EL	WC	DA	W	EC	RS	AR	O
Petersen and Solberg	利用 LCA 比较了瑞典和挪威的木材产品和再生替代材料的应用(2005)		×	×	×	×								
Saiz et al	马德里绿色屋顶的 LCA 研究(2006)	×	×	×	×	×		×		×				×
Scheuer et al	美国新建校园再生材料利用 LCA 研究(2003)	×	×		×		×			×				×
Van der Lugt et al	利用 LCA 分析欧洲不同建筑材料的环境影响(2006)													×
Wu	不同建筑再生材料“绿色税”应用(2005)	×	×	×	×		×	×						×

* GWP, global warming potential 全球变暖潜力; POCP, photochemical ozone creation potential 光化学臭氧形成潜力; WC, water consumption 水量消耗; DA, depletion abiotic resource 非生物资源耗竭潜力; A, acidifi cation 酸化; HT, human toxicity 人体毒性; W, waste creation 废弃物产量; EC, ecotoxicity 生态毒性; E, eutrophication 富营养化; EC, energy consumption 能源消耗; RS, resources consumption 资源消耗; O, others 其他; AR, air emissions 大气排放.

2.2 LCA 在上海的应用实例

高斌等(2011)^[29]通过生命周期评价的方法对上海市的生活垃圾处理现状及 4 个不同可选处理方案的温室气体(GHG)排放进行了分析;苏醒等(2011)^[30]以建筑中常用的钢板、钢筋、铝、玻璃及混凝土为例,对可再生材料进行了生命周期清单分析,考虑材料回收率的影响;王婧等(2007)^[31]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;而将 LCA 运用到对建筑垃圾,道路改扩建中的分析研究屈指可数,因此需要大力开展该类研究.

3 建 议

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利用和管理,提出以下建议:

- (1) 建筑垃圾资源化发展应从源头控制做起. 应深入了解和系统研究建筑垃圾的产生原因和隐患,从源头上做到垃圾减量化,同时完善相关法律法规和技术规范.
- (2) 建筑垃圾资源化应走产业化发展之路. 市政工程中的公用工程基础设施建设等所使用的相关建筑材料应优先使用建筑垃圾资源化再生产品,应出台有关政策鼓励相关产业使用再生资源产品,同时需要注重对再生骨料的性能和检测方法研究.
- (3) 应加强建筑垃圾全生命周期评价和管理. LCA 在我国废旧道路建设中的应用还不多,可以借鉴国外经验,对建筑垃圾回收利用开展生命周期评价研究,从而科学评价建筑垃圾资源化利用的环境效应.

参考文献:

[1] 张东旭.我国建筑垃圾年产超 3 亿吨“点石成金”需过几道坎[EB/OL]. http://news.xinhuanet.com/2011-10/18/c_111103536.htm. (2012-08-30)

[2] 罗清海,陈晓明,王衍金,等. 工程建筑垃圾处置的调查和分析[J]. 中国资源综合利用,2009,27(6): 29-31.

[3] 周晓萃,徐琳瑜,杨志峰. 城市生活垃圾生命周期分析及处理规划研究[J]. 中国环境管理,2011(2): 33-37.

[4] 王香治. 城市建筑垃圾资源化利用探讨[J]. 环境卫生工程,2011,20(2): 49-52.

[5] 肖 燕. 西安市建筑垃圾的现状分析及综合利用[D]. 西安: 长安大学硕士学位论文,2008.

[6] Mroueh U M, Eskola P, Laine-Ylijoki J. Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction[J]. *Waste Manage*,2001,21(3): 271-277.

[7] Birgisdottir H, Pihl K A, Bhandar G, et al. Environmental assessment of roads constructed with and without bottom ash from municipal solid waste incineration [J]. *Transport Res Part D-Transport Environ*,2006,11(5): 358-368.

- [8] Chowdhury R, Apul D, Fry T. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010(54): 250-255.
- [9] LI X, ZHU Y, ZHANG Z. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes[J]. *Building and Environment*, 2010(45): 766-775.
- [10] 陈聪慧. 中日产业废弃物处理法律制度比较[D]. 北京: 中国政法大学硕士学位论文, 2010.
- [11] 陈力. 论建筑垃圾循环利用的法律规制[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2008.
- [12] 秦月波. 推进建筑垃圾资源化管理方法与相关法制保障研究[D]. 南京: 南京林业大学硕士学位论文, 2009.
- [13] 李文丽. 建筑垃圾再生利用的有效途径探析[J]. *价值工程*, 2012(15): 63-64.
- [14] 祖加辉. 水泥稳定建筑垃圾的路用性能研究[J]. *山西建筑*, 2010, 12(36): 156-157.
- [15] 肖田, 孙吉书, 靳灿章. 石灰粉煤灰稳定建筑垃圾的路用性能研究[J]. *山西建筑*, 2010, 8(36): 275-276.
- [16] Adalberth K, Almgren A, Petersen E H. Life cycle assessment of four multi family buildings[J]. *Int J Low Energy Sustainable Build*, 2001(2): 1-21.
- [17] Arena A P, Rosa C. Life cycle assessment of energy and environmental implications of the implementation of conservation technologies in school buildings in Mendoza-Argentina[J]. *Build Environ*, 2003, 38(2): 359-368.
- [18] Asif M, Muneer T, Kelley R. Life cycle assessment: a case study of a dwelling home in Scotland[J]. *Build Environ*, 2007, 42(3): 1391-1394.
- [19] Gustavsson L, Sathre R. Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials[J]. *Build Environ*, 2006, 41(7): 940-951.
- [20] Jian G, Jiang L, Kazuroni H. Life cycle assessment in the environmental impact evaluation of urban development—a case study of land readjustment project, Hyogo District, Japan[J]. *Zhejiang Univ Sci*, 2003, 4(6): 702-708.
- [21] Junnila S. Life cycle assessment of environmentally significant aspects of an office building[J]. *Nordic J Surveying Real Estate Res-Special Series*, 2004(2): 81-97.
- [22] Koroneos C, Dompros A. Environmental assessment of brick production in Greece[J]. *Build Environ*, 2006, 42(5): 2114-2123.
- [23] Nebel B, Zimmer B, Wegener G. Life cycle assessment of wood floor coverings—a representative study for the German flooring industry[J]. *Int J Life Cycle Assess*, 2006, 11(3): 172-182.
- [24] Nicoletti G M, Notarnicola B, Tassielli G. Comparative life cycle assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles[J]. *J Cleaner Production*, 2002, 10(3): 283-296.
- [25] Petersen A K, Solberg B. Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden[J]. *Forest Policy Econom*, 2005, 7(3): 249-259.
- [26] Saiz S, Kennedy C, Bass B, et al. Comparative life cycle assessment of standard and green roofs[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(13): 4312-4316.
- [27] van der Lugt P, van den Dobbelsteen A A J F, Janssen J J A. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures[J]. *Construct Build Mater*, 2006, 20(9): 648-656.
- [28] WU X, ZHANG Z H, CHEN Y M. Study of the environmental impacts based on the “green tax”—applied to several types of building materials[J]. *Build Environ*, 2005, 40(2): 227-237.
- [29] 高斌, 江霜英. 利用生命周期评价方法分析上海市某区生活垃圾处理的温室气体排放[J]. *四川环境*, 2011, 30(4): 92-97.
- [30] 苏醒, 张旭, 孙永强. 考虑回收能力的材料生命周期清单分析模型[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(10): 1528-1547.
- [31] 王婧, 张旭, 黄志甲. 基于 LCA 的建材生产能耗及污染物排放清单分析[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(6): 149-153.

(下转第 828 页)

1627-1632.

- [19] 郭 儒,李宇斌,富 国. 河流中污染物衰减系数影响因素分析[J]. 气象与环境学报, 2008, **24**(1): 56-59.
- [20] 徐 进. 黄山市水资源可持续开发利用构想[J]. 水利经济, 2000(1): 20-22.
- [21] 张兴榆,曹明明,雷 敏. 陕北地区水资源安全及需求预测分析[J]. 干旱区资源与环境, 2007, **21**(11): 17-21.
- [22] 李 东. 浅析水资源开发利用与水电开发率[J]. 中国水能及电气化, 2010(5): 31-35.
- [23] 雷 静,张 琳,黄站峰. 长江流域水资源开发利用初步研究[J]. 人民长江, 2010, **41**(3): 11-14.

Analysis of Water Resources Carrying Capacity of Taiping Lake Basin, Huangshan City, Anhui Province

LU Jun¹, SHU Rong-jun², LI Xiang¹, WANG Xiang-rong¹, FAN Zheng-qiu¹, WANG Shou-bing¹

(1. Department of Environmental Science & Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Weather Bureau of Huangshan District, Huangshan 242700, China)

Abstract: Taiping Lake Basin (TLB), located in Huangshan city, Anhui Province, has an important strategic significance for its special geographical location and rich water resources in Pan-Yangtze River Delta. By using the formula and indexes including Total-water-resource (W), Ecological-requirement-of-water-resource (W_E), Supply-of-water-resource (W_S), Demand-of-water-resource (W_D), Capacity-of-population (C_P), Capacity-of-economy (C_E) and Index of water supply and demand ($IWSD$), the calculation methods were constructed and applied to evaluate the Water Resources Carrying Capacity (WRCC) of TLB. Results showed that it is not until 2020 that the population and economy of TBL are both in the acceptable range with the current WRCC, despite the fact that the WRCC has a descending trend with the increase of urbanization, population and economy. However, the WRCC, as well as C_P and C_E , can be improved without destroying the regional ecological environment by increasing the utilization rate of water resources to 12%.

Keywords: Taiping Lake basin; water resources carrying capacity; index of water supply and demand; sustainable development

(上接第 821 页)

Current Status of Reclamation and Life Cycle Assessment in Construction Waste

LI Shu-xun¹, LUO Pan¹, PANG Xiao-ming¹, ZHANG Wei-qian², LIU Yan², WANG Shou-bing²

(1. Shanghai Pudong Engineering Construction Management Co., Ltd., Shanghai 201210, China;

2. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Current reclamation of construction waste both home and abroad is introduced. Moreover, a literature review brings together research on life cycle assessment (LCA) applied within construction waste, especially the road construction sector. By applying LCA it is possible to optimize environmental impacts from the source to the final disposal of waste building materials, and the LCA methodology in road construction would effectively lower the economic and environmental burdens. Concerning the current situations in construction waste reclamation, source minimization, industrial development and life cycle management should be urgently employed.

Keywords: construction waste; life cycle assessment; reclamation