

建筑生命周期评价研究热点探析

Exploring Life-cycle analysis of buildings

肖雅心¹ 杨建新^{1*} 刘晶茹¹ (1.中国科学院生态环境研究中心/城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要 应用文献分析, 综述了生命周期评价方法在建筑领域的应用。重点评述了建筑生命周期评价的近期研究热点, 以期为研究者选择评价方法和制定研究目标提供方向, 推进建筑业可持续发展。研究认为应该结合案例的具体情况、研究目的和生命周期数据获取的难度选择合适的评价方法; 建筑生命周期评价的未来应重点关注的领域: 1) 建筑拆除处理阶段, 2) 建筑设计阶段, 3) 建筑的物化能及材料的循环和替代性, 4) 建筑的动态性。

关键词 建筑; 生命周期评价; 可持续发展

免责声明 本文仅代表作者个人观点, 与中国 21 世纪议程管理中心、中国可持续发展研究会及联合国均无关。

Disclaimer: This brief was submitted through the Administrative Centre for China's Agenda 21 (ACCA21), Ministry of Science and Technology, China, and the Chinese Society for Sustainable Development (CSSD). The views and opinions expressed are those of the author(s) and do not necessarily represent the views of, and should not be attributed to, the Secretariat of the United Nations, the ACCA21 or the CSSD. Online publication or dissemination does not imply endorsement by the United Nations. For further information, please contact Mr. Sun Xinzhang (sunxzh@acca21.org.cn)

1 引言

近年来, 随着全球变暖, 资源、能源耗竭, 环境污染等环境问题的日益严峻, 严重地阻碍了社会、经济、资源和环境的可持续性发展。客观上, 迫切需要减缓现代生活方式引发的各种环境问题。建筑业是社会、经济发展的主要贡献者之一, 同时又消耗了大量的资源、能源并产生了大量的污染物及废弃物。全球约有 30-40% 初级能源消耗于建筑业, 全球 40-50% 温室气体排放来自建筑业^[1]。有研究表明, 建筑的节能潜力为 20-30%, 在个别地区最高可达 50%^[2]。可持续性发展以低环境影响和高社会、经济发展为目的, 作为人居环境的承载主体, 建筑业的可持续性对城市的可持续发展具有不可忽视的意义。

为了降低能源消耗并控制污染排放和减少固体废弃物堆积, 生命周期评价工具被用于建筑领域, 以期从建筑全生命周期的视角识别建筑的环境影响及其在生命周期各阶段内的分布, 评估不同阶段建筑的节能潜力, 推进建筑业的可持续性发展。此外, 生命周期评价使得相关主体对建设项目或建筑产品的可持续能力有量化的掌握, 为管理者的决策行为提供更为科学的参考依据^[3]。本研究拟基于文献分析, 总结国内外建筑生命周期评价的模型、方法, 评估建筑生命周期评价的成果, 辨析近期和未来的研究热点, 以期提出建筑生命周期评价的未来发展方向。

2 建筑生命周期评价方法进展综述

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是对产品、工艺或活动“从摇篮到坟墓”即从资源开采到最终处理的整个生命周期中对环境影响的一种评价方法 (Azapagic, 1999)^[4]。基于对相关文献的回顾, 依据生命周期模型, LCA 被划分为: 基于过程的生命周期评价 (Process Based LCA, PLCA)、基于经济投入-产出模型生命周期评价 (Economic Input-Output LCA, EIO-LCA) 和混合生命周期评价 (Hybrid LCA, 混合 LCA)^[5]。LCA 于 1990 年起逐渐被应用于建筑产业, 成为评价建筑环境影响的重要工具之一。

2.1 PLCA

PLCA 将待研究产品 (过程或服务) 分解为不同阶段, 对每个阶段与外部环境的物质、能量交换和环境影响进行研究, 最后将数据归纳汇总, 得到其对经济、社会、环境的总体影响表现。它是 LCA 模型的最初、最基本形式^[6]。

1996 年, Adalberth^[7]等人对瑞典的四类多住户型建筑进行了生命周期评价。其目的在于研究四类建筑不同阶段生命周期的环境影响分布。研究表明使用阶段占到了总体环境影响的 70-90%。

1998 年, Jonsson Asa^[8]等人应用 PLCA 对瑞典 7 座钢筋混凝土框架结构建筑进行了环境影响评价。结论表明, 建材生产阶段的环境影响不可忽略, 但使用阶段

的环境影响最大。本研究是建筑生命周期评价早期比较完整的案例。清单分析中考虑的因子有上百种，数据丰富，因此数据收集工作量巨大；同时针对拆除处理阶段的研究做了简化，一定程度上影响了研究结果的准确度。

2003年，Scheuer^[9]等人于对一个寿命为75年的7300m²六层建筑进行了LCA。结果表明，空调和电力占据生命周期初级能源消耗的94.4%。运行阶段环境影响在总环境负荷中比例达83%。研究相较于Adalberth等人的研究，进一步细化了使用阶段的能源消耗分布。

2008年，Su Xing^[10]等人对两种不同结构的办公建筑开展了LCA的清单分析，结果发现，单位面积上，钢筋结构在生命周期能源使用和建材生产排放两个指标上优于混凝土结构建筑，但是使用阶段的能源消耗和排放，钢筋结构较高。该研究的一个重要特点是考虑了处置阶段建筑材料（钢材）的循环回收。

2012年，Wu Huijun^[11]等人针对中国办公建筑能源消耗和CO₂排放进行评价。结果表明，使用阶段是生命周期过程中最大的能量消耗阶段，其次是材料生产阶段，其中主要贡献来自混凝土和钢。使用阶段的CO₂排放最多；而拆除阶段的CO₂排放也不容忽视，占了总量的13.67%。本研究还对不同地区的研究结果进行了对比，发现结果的不同可能源于地域性、技术设备差异及能源结构不同等方面的限制。

建筑PLCA考虑的过程常包括：建材生产、现场施工、建筑使用和维护以及最终拆除和处理几个阶段。研究结果均表明：使用阶段是环境影响最大的阶段，亦是建筑可持续发展优化的重中之重。随着时间的推移，研究逐步深入和细化，考虑的因素也逐渐增多。但是在PLCA中，由于目的的不同以及数据的可获取性等原因，可能会忽略或简化一些阶段，如最终拆除和处理阶段。由于研究的边界不同，研究的地域性差异，使得数据结果间的可比性受到影响。另一方面，由于建筑涉及的材料、资源能源、过程、设备等良多，数据的获取是一个耗时耗力的过程，且容易引起数据错误或缺少，因此一般研究都只聚焦于主要的建材生产过程，也一定程度上影响了建筑生命周期评价的准确性和可比性。

2.2 EIO-LCA

EIO-LCA是根据某一国家或地区的经济投入-产出表来测算产品或服务的能源消耗和环境影响表现^[12]。它量化了经济系统中产业部门间的关联互动效果，因此成为分析产品或服务外部性的有效方法^[13]。

2006年，Norman^[14]等人对比了居住密度不同的建筑的能源使用和温室气体排放，使用EIO-LCA评价材料制

造阶段的环境影响。研究结果表明：对物化能和温室气体排放的贡献最大的材料是砖，窗户，墙体和结构混凝土四类。这是一个基于地区尺度的EIO-LCA研究。另外本研究还表明了功能单位的选择会影响对比的结果：在人均基础上，低密度案例是高密度案例的1.5倍；但以居住面积为标准，则高密度发展场景是低密度的1.25倍。因此在LCA中确定功能单位是至关重要的。

2010年，Yuan Chang^[15]等人在宏观层面上定量的评价民间建筑能量使用 and 环境影响，研究开发了一个整合24个部门数据的环境输入输出生命周期评价模型。其评价结果显示：在2007年建设项目的物化能占据了近六分之一的国家总能量消耗，并预测到2015年其将占大约五分之一，主要由煤和油的消耗支配。研究基于国家尺度，其结果仅代表着国家的平均水平，可以归类每个生命周期阶段总能量消耗和环境影响，但是无细节数据。

基于EIO建模的LCA通过由上自下的建模方法，对所有的供应链进行统计，对这种方法而言，数据采集异常重要，在统计数据缺乏时其结果的准确度会受很大的影响，甚至导致评价结果不可用。所以这种方法的不确定性较强，受数据库限制大。虽然中国已经建立了IO表，但是相关统计还不完善，影响着数据收集难度和准确度，在未来还需要研究者的钻研和政府的支持。相较于PLCA，EIO-LCA由于采用国家或地区的大数据进行分析，所以在宏观分析方面有很大优势。

2.3 混合LCA

混合生命周期评价模型是自下而上的基于过程模型和自上而下的基于投入-产出模型的结合，以期弥补前两者模型的不足之处，通过结合过程水平的数据和部门级别的输入输出分析描述工业部门和国家经济的复杂相互依赖性^[16]。

Kofoworola和Gheewala^[17]于2008年对泰国的一座办公建筑进行LCA。研究使用PLCA和EIO-LCA结合的混合LCA，证实由于用量大，钢和混凝土是建材制造阶段造成环境影响的主要材料；商用建筑的生命周期环境影响也由使用阶段主导，其中电力生产消耗的化石燃料是造成环境影响的主要原因。研究认为使用PLCA可以分析各个阶段的详细输入输出，可是由于系统边界设计的可变性，需要用EIO-LCA弥补PLCA的缺陷，提高案例间的可比性，因此使用混合LCA可以结合前两者的优点，获得更严谨的评价结果。

2014年，Nuri Cihat Onat^[18]等人基于输入-输出的混合LCA对美国住宅和商业建筑碳足迹进行研究。研究中所有的直接排放和间接排放均被考虑。研究基于EIO-LCA和PLCA对供应链排放进行计算以及细节补充，度量现场排放基于EIO-LCA，结合使用两种方式，互补不足，

完善了整个评价。

混合 LCA 属于近年来兴起的 LCA 热点方法之一，建筑领域的数据繁杂、获取难度大，通过两种方式的结合，有助于形成更贴近于现实情况的生命周期评价结果。但是在使用混合 LCA 时很重要的一点在于如何将 EIO-LCA 和 PLCA 的数据进行整合，将数据集合到同一功能单位上，建成清单数据库，相互补充的同时避免数据的重复计算是很重要的问题。

总的来说 LCA 对于建筑业的可持续发展有着重要的意义，当针对于微观的单体建筑时，结合施工数据等，PLCA 可以良好地对其生命周期内环境排放和资源能源利用进行评价；当针对于数据库资料充分的国家或区域评价时，EIO-LCA 可以较为省时省力；而使用混合 LCA，可以弥补前两种方法的不足，获得更准确的评价结果，但是评价的复杂性在三种方法里是最大的。

3 建筑生命周期评价的研究热点

3.1 建筑的拆除和处理阶段

关注建筑的拆除和处理阶段，对数量不断增加的建筑垃圾的再生利用是建筑 LCA 面临的挑战之一^[19]。

2009 年，Blengini^[19]对一座于 2004 年拆除的意大利建筑进行了生命周期评价。该研究基于拆除和重新设计的城市区域现场实测数据、拆迁和建筑废物回收的实际数据。结果表明：尽管使用阶段的环境影响最大，但拆除和处置阶段不可以被忽略，且是未来环境效益最有潜力的阶段。建筑废物的循环利用从环境和能源方面看是可持续的，在经济方面也是可行且盈利的。另外，不同材料在处置阶段的回收潜力应该进一步研究，确定自然材料和回收材料的适当比例，达到最好的环境解决方案。以往的众多研究中由于数据的缺乏，对于建筑的拆除和处理阶段无法深入的分析，而这一研究着重于拆除和处置阶段，以实测数据作为支撑，有着重要的意义，并为未来的建筑废弃物管理研究打下了坚实的基础。

2011 年，Intini Francesca^[20]等人也针对建筑中的材料回收循环利用问题进行了研究。研究以聚对酞酸乙二酯 (PET) 为对象，评估回收原材料制作绝缘保温建筑产品的能量潜力和环境效益。结果表明，PET 废物循环利用可以减少资源消耗，尤其是不可再生资源；实现能量节约。

目前为止，LCA 方法尚未广泛地应用于建筑废物管理。文献[7, 8]中对建筑的拆除处置阶段都进行了简化甚至忽略，不考虑建筑材料的回收而仅视为填埋处理。尤其在国內，对于建筑的拆除和处理的研究更为少见，缺少数据是其重要原因之一。因此，未来应加强对建筑

废弃过程和建筑废弃物开展深入研究。

3.2 建筑的设计阶段

良好的设计对降低建筑的环境影响有着十分重要的作用，但建筑设计通常并不作为建筑生命周期的一个阶段。可以应用生命周期评价，评估不同设计方案引起的环境负荷，从而选择较小环境负荷的设计。因此，在概要设计阶段考虑全生命周期的环境负荷，在设计阶段考虑使用绿色建筑技术将有助于可持续建筑业发展。

2012 年，Cho, Y. S.^[21]提出在高层建筑中通过结构优化设计减少结构钢数量以减少 CO₂ 排放。尽管该研究仅仅考虑了结构，在未来的研究中可以继续改善，但是它证实了呈在设计阶段考虑全生命周期环境影响对建筑节能减排是有效的。

Basbagill, J.^[22]也于 2013 年提出建筑早期设计阶段的决策极度影响着其环境影响。研究提出 LCA 结合建筑信息模型 (BIM) 设计预测环境影响的反馈机制，辅助选择更好的早期决策实现碳足迹减量的最大化。

建筑设计者在设计阶段面临许多的选择和决定，但是却无法判断哪一个决策是对改善建筑的环境影响更有意义的，因而做出了不适宜的决策，很大程度的增加了建筑的全生命周期环境影响，阻碍建筑业的可持续发展，因此在建筑设计阶段加入 LCA 的思想对于其可持续发展意义深远。

3.3 建筑物化能及材料的循环替代问题

3.3.1 建筑材料的循环和替代

在建材领域，目前涉及的材料包括钢材、水泥、混凝土、木头、砖、沙石、玻璃等。建筑业中回收材料和原生材料之间并非是竞争关系而是共生协作，在战略上，应考虑联合使用。

①**钢材**：2008 年，Su Xing^[10]等人的研究首先考虑了废弃钢材的循环使用，研究证实钢材在建材生产阶段是最主要的污染排放源，而钢材的回收、循环、再利用潜力极高（可达 95%），因此提倡废钢循环利用可以降低钢材生产造成的环境负担，对建筑的可持续发展有益。2009 年，Blengini^[19]的研究也着重强调了钢材的回收、循环、再利用对环境影响有很大的益处。2012 年，Cho, Y. S.^[21]则强调了在设计阶段减少钢用量对 CO₂ 的减排有意义。2012 年，Wang Weihai^[23]等人研究证实合理使用钢材、改善钢材的生产方式对于环境的改善意义重大。

②**水泥**：在水泥和混凝土领域研究主要支持以其他材料进行替代以降低环境影响。2004 年，Gartner^[24]认为使用其他材料代替水泥可以减少 CO₂ 排放（但需要考虑可

能增加的其他排放物，如使用硫酸钙替代会产生 SO₂），水泥产业利用其他副产品也达到了减碳增产，他还建议以水凝水泥代替硅酸盐水泥减量碳排放。

③**混凝土**：2009年，Habert和Roussel^[25]研究证实：进行材料代替和减少混凝土使用都可以减少 CO₂ 的排放量。2013年，Jayapalan AR^[26]等人研究最先进的纳米和微粒子技术进行替代，但由于费用昂贵可能会降低其可持续性。另外，Talukdar^[27]等人还研究了轻质低碳混凝土材料以及废弃混凝土的使用潜力，提倡循环和再利用。

④**木材**：对于木制结构的建筑研究对木材进行了讨论，得出使用木材，由于其生产阶段的排放和使用能源极少，对于环境影响有优势。Buchanan和Levine^[28]和Nassen^[29]等人先后在1999年和2012年证实木制建筑减少了过程能源使用达成了碳减排目的。但是Nassen^[29]的研究中综合考虑其生命周期内的 CO₂ 排放量和拆除阶段 CO₂ 的吸收量时，木制结构和混凝土结构的总体碳排放量相近，这是由于混凝土结构的处置阶段应用了 CCS（carbon capture and storage，碳捕获和存储）技术，而木制结构的拆除阶段采用焚烧处理方式，抵消了其在过程能源减排的正面效应。这也说明考虑整个生命周期各个阶段的重要性，拆除处置阶段是不可以忽略的。

⑤**砖**：砖材料的研究也主要集中于其被替代的效果。Reddy^[30]以 SMB（stabilized mud blocks，稳定泥浆块）替代烧制粘土砖以达成节能环保的目的。类似的，Kinuthia和Oti^[31]利用的一种物化能极低、产生 CO₂ 排放也很低的副产物 GGSB（ground granulated blast furnace slag，粒化高炉矿渣粉或矿渣微粉）进行替代，达成了节能减排的目的。Jiao^[32]等人则结合废弃物管理理念，利用固体废弃物进行了低碳建筑材料的实验：利用海洋工程的废弃疏浚泥改良砖的性能，达成了显著的低碳效果。

⑥**沙石**：沙石作为原材料，不像混凝土等需要进行复杂加工而得，其加工耗能和排放影响相对较小，节能减排可以通过减少运输实现。Crishna^[33]等人进行块石生产的 PLCA，结果即为减少进口石块的使用会为 CO₂ 减排做出贡献。

⑦**玻璃**：Dewulf J^[34]等人针对一个住宅建筑的拆除废弃物进行研究，其中包括玻璃，他们认为玻璃的循环率可以达到 60%，从而在一定程度上优化建筑的环境影响。

3.3.2 建筑物化能

Luisa F. Cabeza^[35]等人研究定义了物化能与隐含

碳或碳足迹之间的关系，并提出新方法测度物化能，证实了材料替代和循环可以降低建筑物化。Emmanuel^[36]则通过对环境指数的研究，证实：随着科技的发展，非传统技术的选择可能对环境更加有利，降低建筑的物化能。但是需要强调的是由于新技术通常伴随高成本，如何使用新技术实现经济和环境协调的可持续性需要进一步考虑。

总的来说，考虑建筑物化能以及建材的循环、替代的潜在在建筑的设计阶段和拆除处置阶段不可忽视。建材的选择对于建筑业可持续发展的意义重大，不仅体现在其对建筑物化能方面和建筑拆除处理阶段的回收循环潜力有着决定性的影响，还因为建材的选择也可以降低使用维护阶段的环境影响，如使用绝缘隔热性能更好的材料可能降低建筑使用阶段的供暖能耗。

3.4 建筑的动态性

建筑受社会、经济、政策、人的意愿等方面的影响，使用寿命具有不确定性，使用寿命设定为 50 年的建筑在中国有可能在使用 30-40 年就被拆除；另一方面，建筑的全生命周期“从摇篮到坟墓”历经时间长，期间受政策、技术等方面的影响有很强的可变性，应被视为动态系统进行考虑更佳。

3.4.1 建筑寿命不确定性

在所有文献中大都对建筑寿命进行了假设，或为 50 年^[7, 8 等]，或为 75 年^[9, 38 等]。但是在实际使用中由于建筑老化、政策等方面的影响，导致建筑提前被拆除，寿命变短的例子不在少数；而在技术、政策的导向下，建筑在规划时假设的使用寿命预计有一个增长的趋势。2012年，Can B. Aktas^[37]针对住宅建筑寿命对 LCA 结果的影响进行了分析，结果表明，LCA 中添加准确的寿命数据可以达到一个更好的产品环境影响的了解，提高 LCA 结果的准确性；反之，为建筑和室内装饰选择任意一个寿命，或不考虑室内装修的影响会在住宅建筑 LCA 中引入不可忽略的错误。

3.4.2 建筑动态系统 LCA (DLCA)

建筑生命周期使用阶段影响最大，且历时长、不定因素多、变化性大。为了更加准确的对建筑动态系统进行生命周期评价，2013年，William O. Collinge^[38]等人建立了建筑动态生命周期评价（Dynamic LCA, DLCA）的框架，以期更加真实的反映建筑生命周期环境影响。框架以数学公式表达为：

$$h_t = \sum_{t_0}^{t_t} C_t \times B_t \times A_t^{-1} \times f_t$$

其中 A 是一个技术领域矩阵, B 是生物圈矩阵, C 是一个 CFs 矩阵 (表示排放量的影响或其他影响分类干预

程度), t 代表某一时间点的值, 而 t_0 和 t_e 表示研究的开始与结束点。图 3-3-1 为 DLCA 框架的解释:

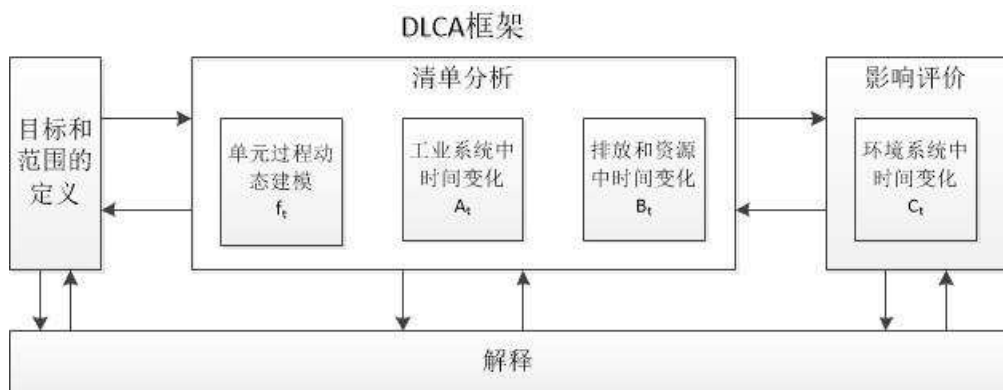


图 3-3-1: 动态生命周期评价框架 (引自 William O. Collinge^[15]等人的研究)

研究开发的 DLCA 评价了一座公共建筑的环境影响并预测其未来趋势, 设置了两种动态分析时间框架 (从建设开始 (1971 年) 的全生命周期和研究年 (2009 年) 之后的寿命), 并以一个静态 LCA 作为参考, 考虑了多种场景模型。研究表明 DLCA 的整个生命周期影响结果与静态 LCA 结果相比变化很大, 例如从建筑初始结构视角看, 即使不可再生资源使用增加了 15%, DLCA 与静态 LCA 就大气污染物类别相关的影响结果相比依然减少了 50% 以上。建筑寿命内的变化对结果的影响是不可忽略的, 在 LCA 中使用动态建模以增加结果相关性, 可以影响建筑设计和使用的决策, 所以在未来调整 LCA 到一个更动态的方法势在必行。

但是目前对建筑动态系统研究还处于初期阶段, 未来需要着重于探索研发考虑技术、政策因素和消费者行为的反馈模型, 研究结合动态系统模型特征化不确定性与动态、进化的交互作用, LCI 和 LCIA 背景变量以及增加的动态影响因子和 LCI 数据库的动态参数等方面, 这不仅仅针对建筑领域的有着重要的影响, 更是对 LCA 方法论上的挑战。

4 结论

基于以上文献分析, 得出以下研究结论:

1) 基于生命周期模型分类, 生命周期评价方法可分为 PLCA, EIO-LCA 及混合 LCA。在具体研究中, 选择适当的生命周期评价方法对研究过程的难易程度以及结果的准确度有着决定性的作用。PLCA 在微观分析方面见长, 可以提供更多数据细节, 但是数据收集耗时费力, 而且 PLCA 只能在设定的系统边界内进行评价, 边界界定会影响评价的结果。EIO-LCA 基于国家或地区的经济输入-输出数据进行宏观分析, 以国家或地区的经济系统作为研

究边界, 以系统内各产业部门间的关联互动关系为基础, 有效地解决了 PLCA 中生产的过程无限拓展的问题。但是由于经济输入-输出数据库的限制, 可能造成基于 EIO-LCA 的结果与具体的研究的案例实际偏差较大, 影响研究结果的应用。混合 LCA 则可以较好地克服前两种评价的缺点, 得到更为准确的结果。但是混合 LCA 相对于前两种方法, 工作量更大、耗时更长, 且在数据整合上有一定的难度。

2) 建筑的使用阶段是建筑生命周期内环境影响最大的阶段, 因此需要在建筑的节能减排领域得到更多的关注。建筑的拆除和处理阶段, 建材的回收、循环利用对降低环境影响的贡献也不容忽视。在建筑最初设计阶段, 通过开展建筑 LCA 可以帮助设计决策, 如使用适当的低能量建筑技术和合适的建材可减少建筑系统物化能消耗。

3) 目前, 建筑动态系统研究尚处于初期阶段, 未来需要着重于探索研发考虑技术、政策因素和消费者行为的反馈模型, 研究结合动态系统模型特征化不确定性与动态、进化的交互作用, 以及 LCI 和 LCIA 背景变量、增加的动态影响因子和 LCI 数据库的动态参数等方面, 这不仅对建筑的可持续发展有重要的促进作用, 对 LCA 方法论的创新也是一个挑战。

参考文献

[1] M. Asif, T. Muneer, R. Kelley. Life cycle assessment: a case study of a dwelling home in Scotland[J]. Building and Environment, 2007, 42:1391-1394.
 [2] Deborah Salon, Daniel Sperling, Alan Meier et al. City carbon budgets: A proposal to align

- incentives for climate-friendly communities[J]. Energy Policy, 2010, 38(4):2032-2041.
- [3] 常远, 谷玉荣, 王玉善. 基于 LCCA 与 LCA 的建设项目集成决策方法[J]. 建筑经济, 2009, 9: 77-80.
- [4] 袁增伟, 毕军. 产业生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 105.
- [5] Chang Y, Ries J.R., Wang Y.W. The quantification of the embodied impacts of construction projects on energy, environment and society based on I-0 LCA[J]. Energy Policy, 2011, 39(10):6321-6330.
- [6] 洪竞科, 王要武, 常远. 生命周期评价理论及在建筑领域中的应用综述[J]. 工程管理学报, 2012, 26(1): 17-22.
- [7] Adalberth K, Almgren A, Peterson EH. Life-cycle assessment of four multi-family buildings[J]. International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings, 2001, 2:1 - 21.
- [8] Jonsson A., T. Bjorklund, A-M. Tillman, LCA of concrete and steel building frames[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1998, 3(4):216-224.
- [9] Scheuer C, Keoleian GA, Reppe P. Life cycle energy and environmental performance of new university building: modelling challenges and design implications. Energy and Buildings, 2003. 35:1049 - 64.
- [10] Su Xing, Zhang Xu, Gao Jun. Inventory analysis of LCA on steel-and concrete-construction office buildings[J]. Energy and Buildings, 2008, 40:1188 - 1193.
- [11] Wu H. et al. Life cycle energy consumption and CO₂ emission of an office building in China[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17(2):105-118.
- [12] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究[D]. 清华大学土木水利学院, 2004.
- [13] Leontief W. Environmental repercussions and the economic structure: an input - output approach[J]. The Review of Economics and Statistics, 1970, 52(3):262-271.
- [14] Norman J, MacLean HL, Kennedy CA. Comparing high and low residential density: life-cycle analysis of energy use and green house gas emissions[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2006, 132(1):10 - 21.
- [15] Chang Y A, Ries R J, Wang Y W. The embodied energy and environmental emissions of construction projects in China: An economic input-output LCA model[J]. Energy Policy, 2010, 38(11):6597-6603.
- [16] Zhang L X, Wang C B, Song B. Carbon emission reduction potential of a typical household biogas system in rural China[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 47(?):415-421.
- [17] Kofoworola O.F., S.H. Gheewala. Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2008, 13(6):498-511.
- [18] [Nuri Cihat Onat](#), [Murat Kucukvar](#), [Omer Tatari](#). Scope-based carbon footprint analysis of U.S. residential and commercial buildings: An input - output hybrid life cycle assessment approach[J]. [Building and Environment](#), 2014, 72:53-62.
- [19] Blengini G.A. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy[J]. Building and Environment, 2009, 44(2):319-330.
- [20] Intini F., S. Kühtz. Recycling in buildings: an LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer PET bottles[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2011, 16(4):306-315.
- [21] Cho Y.S. et al. LCA application in the optimum design of high rise steel structures[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5):3146-3153.
- [22] Basbagill J. et al. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts[J]. Building and Environment, 2013, 60:81-92.
- [23] Wang Weihang, Liu Tao, Liu Yinghao, Guo Shuihua. Evaluation on contribution of steel products to environmental improvement from life cycle assessment perspectives[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Science), 2012, 17(3):370-372.

- [24]Gartner E. Industrially interesting approaches to low-CO₂ cements[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34:1489 - 98.
- [25]Habert G, Roussel N. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31:397 - 402.
- [26] Jayapalan AR, Lee BY, Kurtis KE. Can nanotechnology be “ green ” ? Comparing efficacy of nano and microparticles in cementitious materials Cement Concrete Composites, 2013.
- [27]Talukdar S. Islam ST. Banthia N. Development of a lightweight low-carbon footprint concrete containing recycled waste materials[J]. Advances in Civil Engineering, 2011, 594270: 8p.
- [28]Buchanan AH, Levine SB. Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions[J]. Environmental Science and Policy, 1999,2:427 - 37.
- [29]Nassen J, Hedenus F, Karlsson S, Holmberg J. Concrete vs. wood in buildings- an energy system approach[J]. Building and Environment, 2012, 51:361-9.
- [30]Reddy BVV. Sustainable materials for low carbon buildings[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2009, 4:175 - 81.
- [31]Kinuthia JM, Oti JE. Designed non-fired clay mixes for sustainable and low carbon use[J]. Applied Clay Science, 2012,9(60):131-140.
- [32]Jiao S, Cao M, Li Y. Impact research of solid waste on the strength of low carbon building materials[J]. Proceedings of the 2nd annual conference on electrical and control engineering2011.
- [33]Crishna N, Banfill PFG, Goodsir S. Embodied energy and CO₂ in UK dimension stone[J]. Resources Conservation and Recycling, 2011, 55:1265 - 73.
- [34]Dewulf J, Van der Vorst G, Versele N, Janssens A, Van Langenhove H. Quantification of the impact of the end-of-life scenario on the overall resource consumption for a dwelling house[J]. Resources Conservation and Recycling, 2009, 53(4) :231-236.
- [35]Cabeza L.F.et al. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 23(0) :536-542.
- [36]Emmanuel R. Estimating the environmental suitability of wall materials: preliminary results from Sri Lanka[J]. Building and Environment, 2004, 39:1253 - 61.
- [37]Aktas, C. and M. Bilec, Impact of lifetime on US residential building LCA results[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17(3) :337-349.
- [38]Collinge, W.et al. Dynamic life cycle assessment: framework and application to an institutional building[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 18(3): 538-552.

作者简介: 肖雅心, 硕士研究生, 研究方向为产业生态学; 地址: 北京市海淀区双清路 18 号生态楼 205, 邮编 100085, 邮箱 18608009608@163.com。

通讯作者: 杨建新, 研究员, 研究方向为产业生态学, 环境经济和环境管理学; 地址: 北京市海淀区双清路 18 号生态楼 206, 邮编 100085, 邮箱 yangjx@rcees.ac.cn。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (No. XDA05140105, XDA05140200)。