

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202012012



# 能值分析与碳足迹的建筑 可持续性评价方法比较

周红, 沈希文, 沈强, 舒婷

(厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 对一个太阳能建筑案例“Sunny Inside”进行能值分析与碳足迹计算, 分析二者结论的一致性与差异性. 研究表明: 在建筑全生命周期中, 不可再生资源的能值投入和碳足迹分析结论一致, 不可再生能值投入越多, 产生的碳足迹也越多; 能值分析将自然环境、社会和经济的可再生和不可再生资源都纳入考虑, 侧重于从资源消耗的角度对建筑能耗进行计算, 且可以直接评价建筑的可持续性; 碳足迹方法则着眼于建筑的碳排放, 用各个阶段、各种材料的 CO<sub>2</sub> 排放量表示建筑对温室效应的影响.

**关键词:** 建筑可持续性; 能值分析; 碳足迹; 生态经济学; 评估方法

**中图分类号:** TU 201.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2021)04-0494-07

## Comparison of Building Sustainability Evaluation Methods Based on Emergy Analysis and Carbon Footprint

ZHOU Hong, SHEN Xiwen, SHEN Qiang, SHU Ting

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Energy analysis and carbon footprint were calculated for a solar building case "Sunny Inside", to analyze the consistency and difference between their conclusions. The research results show that the energy input of non-renewable resources is consistent with the conclusion of carbon footprint in the whole building life cycle. The more the non-renewable energy input of building is, the more the carbon footprint is generated. Emergy analysis takes into account renewable and non-renewable resources of natural environment, society and economy, focuses on calculating building energy consumption from the perspective of resource consumption, and can directly evaluate the sustainability of buildings. The carbon footprint method focuses on the carbon emissions of buildings, and uses the CO<sub>2</sub> emissions of various stages and materials to show the impact of buildings on the greenhouse effect.

**Keywords:** building sustainability; emergy analysis; carbon footprint; ecological economics; evaluation method

随着我国城市化进程不断加快, 建筑能源消耗大幅增长, 由此引发的环境问题日益突出. 与德国、日本等发达国家相比, 我国的建筑节能水平相去甚远, 能源浪费极其严重<sup>[1]</sup>, 因此, 需要对建筑进行可持续性评估. 目前, 已有研究将生态经济学方法引入建筑可持续性评估<sup>[2]</sup>中, 主要有能值分析和碳足迹方法. 两种方法对建筑可持续性研究的出发角度完全不同. 碳足迹方法从全生命周期的角度揭示不同对象的

**收稿日期:** 2020-12-04

**通信作者:** 周红(1973-), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事可持续建筑与建筑信息的研究. E-mail: mcwangzh@xmu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金面上资助项目(G71271180); 福建省创新战略研究项目(2020R0002)

碳排放过程，是评价碳排放影响的测度方法，也是国内外普遍认可的评估方法。碳足迹考虑建筑原材料的生产加工、产品的运输使用及废弃物处理再利用全过程各个阶段的温室气体排放，能够统计建筑全生命周期温室气体排放总量并采取措施进行控制，达到节能减排的目的。能值分析方法涵盖了自然、经济和社会系统，通过梳理能源结构，将异质性的能源和物质同质化，从而对建筑的能耗和可持续性进行评价，有助于更准确地理解环境、经济和社会系统，进而做到能源的精细化管理。

因此，本文对能值分析与碳足迹两种评价方法进行梳理，并对同一建筑进行可持续性评价，分析两者在该建筑可持续性评价中的异同之处，借此认识两者在建筑可持续性评价中的适用性，以分清两种方法对建筑可持续性评价的作用与价值。

## 1 研究方法

### 1.1 能值分析

能值分析方法(emergy analysis)起源于生态能量学，由美国生态学家 Odum 等<sup>[3]</sup>提出。能值分析方法假设任何形式的能量均直接或间接源于太阳能，因此，通过能值转换率(UEV)把生态系统中不同种类、不同形式的能量转换为同一标准的能量，常转化为太阳能，单位为太阳能焦耳(solar emjoules，即 sej)<sup>[4]</sup>，从而衡量各种资源、产品或劳务直接和间接应用的能量，实现物质流、货币流、能量流的统一度量；另外，可以利用能值指标定量评价系统的生态经济效益及可持续性。能值分析方法的基本步骤包括获取收集资料、能量系统图、能量分析表、能值综合指标计算、系统发展综合评价。

能值分析逐步延伸到了土木建筑领域。Meillaud 等<sup>[5]</sup>使用能值模型测算建筑的生态能源消耗，进而对知识、信息等进行了量化评估；Hossaini 等<sup>[6]</sup>应用能值分析模型对加拿大建筑业传统建筑材料进行可持续发展评估，进而为保护生态环境提供保证；张学军等<sup>[7]</sup>采用能值方法评估高层建筑生态可持续性，对建筑材料和建筑构件两方面的选择进行评估对比，发现不可再生资源比例过大会对建筑可持续性产生较大的负面影响。

### 1.2 碳足迹分析

碳足迹的概念起源于“生态足迹”<sup>[8]</sup>，是指在人类生产和消费活动中所排放的与气候变化相关的气体总量，可以用二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>e)表示。相较于其他碳排放研究，碳足迹从生命周期的角度出发，分析产品生命周期中与活动直接和间接相关的碳排放过程。建筑产品的碳足迹分析是评价其整个生命周期温室气体排放的重要又有效的途径之一，其基本步骤包括确定系统边界、收集数据、计算碳足迹、结果检验。碳足迹的计算公式为

$$E = \sum_{i=1}^n (Q_i \times C_i).$$

上式中： $E$  为产品的碳足迹； $Q_i$  为  $i$  物质或活动的数量或强度数据； $C_i$  为碳足迹因子。

在计算建筑碳足迹方面，李飞等<sup>[9]</sup>针对住宅建筑生命周期，计算两种不同建筑结构的生命周期阶段碳排放，为发展低碳建筑提供依据；曾杰等<sup>[10]</sup>梳理了国内建筑材料的碳足迹研究进展，总结不同建筑材料碳足迹的特点，提出建材企业的碳减排工作、能源利用效率研究的重要性；李水生等<sup>[11]</sup>为研究施工各环节的碳足迹构成情况，建立了建筑材料运输和现场机械施工两个环节的碳足迹计算模型，为施工企业开展建筑节能减排提供数据支持。

## 2 案例分析

### 2.1 案例概况

案例采用国际太阳能十项全能竞赛(SD)厦门大学参赛作品零能耗住宅“Sunny Inside”，如图 1 所示。“Sunny Inside”的设计初衷是建造具有可持续性的太阳能住宅，使用多晶硅光伏板发电，从而满足室内的所有用电需求，同时，通过被动式热环境调节策略降低建筑的使用能耗。原始



图 1 厦门大学太阳能建筑“Sunny Inside”  
Fig. 1 “Sunny Inside” solar energy building of Xiamen University

工程数据来源于设计文件,环境数据以比赛地山西省大同市为准,该建筑的建设期按照比赛实际建设期(14 d)计算,由于测算数据的运营期仅为 17 d,不利于核算环境影响,因此,设定该建筑物的使用年限为 20 a. 本项目采用太阳能作为能源,在评价方法的示例上比普通住宅有优势,尤其对于能值分析方法,可再生资源、不可再生资源的使用上更加直观. 普通住宅建筑或其他建筑工程均可按照节 2.2,2.3 的步骤,列表计算. 由于比赛建筑建造在公园湖边,没有发生土地资源的占用,故不计算土地这部分不可再生资源的消耗,若对于一个开发项目,则需要考虑.

2.2 能值分析

根据能值理论,对该系统全生命周期进行能值分析,主要有以下 3 个步骤.

**步骤 1** 依据 SD 太阳能建筑全生命期的能量流入和流出、生态环境和社会经济各组分的相互关系,确定能量系统边界,梳理系统主要能量来源及内部主要能量流动,包括物质流、货币流和其他生态流. 接着,依据 Odum 能量系统语言规则,绘制能值系统图,如图 2 所示.

“Sunny Inside”在建造期间需要投入劳动力、建筑材料等,而在运营期间所有运行能量完全由太阳能设备供给,包括照明、采暖通风等. 由于 SD 太阳能建筑要求废弃物也能够进行回收利用,并以一定比例继续用于建筑工程中,因此,建筑垃圾和生活垃圾经过处理后能够部分回收利用,其余排放到自然环境中,不会造成污染. 测算得出太阳能发电量满足建筑的使用,因此不需要外界投入电量,运营期耗电量的能值计为 0.

**步骤 2** 从本地可再生资源( $R$ )、本地不可再生资源( $N$ )和不可再生资源输入( $F$ )3 方面展开能值项目梳理. 根据项目资料获得计算的原始数据,单位一般为 J, g, 元, 人等. 太阳能值由原始数据和能值转换率相乘得出,能值转换率单位为  $\text{sej} \cdot \text{J}^{-1}$ ,  $\text{sej} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $\text{sej} \cdot \text{元}^{-1}$  或  $\text{sej} \cdot \text{人}^{-1}$  等. 按照能值系统图,分析环境投入、人类反馈等各项投入量,得出项目的能值消耗量,基于此辨识系统结构,得到 SD 太阳能建筑的能值分析表,如表 1 所示. 表 1 中:能值转换率统一以每单位  $15.83 \times 10^{24} \text{ sej}^{[12]}$  为能值基线;“\*”“\*\*”分别表示该能值转换率的单位能值基线为  $9.26 \times 10^{24}^{[13]}$ ,  $9.44 \times 10^{24} \text{ sej}^{[14]}$ ,文中分别乘以 1.71 ( $15.83/9.26$ )与 1.68( $15.83/9.44$ ),从而得到  $15.83 \times 10^{24} \text{ sej} \cdot \text{单位}^{-1}$  基线下的能值转换率.

表 1 能值分析表  
Tab. 1 Energy analysis

类别	项目	原始数据	能值转换率	数据来源	太阳能值/sej
本地可再生资源( $R$ )	太阳光能	$2.59 \times 10^{18} \text{ J}$	$1.00 \text{ sej} \cdot \text{J}^{-1}$	文献[15]	$2.59 \times 10^{18}$
	风能	$2.35 \times 10^{10} \text{ J}$	$2.45 \times 10^3 \text{ sej} \cdot \text{J}^{-1}$	文献[16]	$5.76 \times 10^{13}$
	雨水化学能	$5.17 \times 10^9 \text{ J}$	$3.05 \times 10^4 \text{ sej} \cdot \text{J}^{-1}$	文献[16]	$1.58 \times 10^{14}$
	水势能	$5.23 \times 10^8 \text{ J}$	$1.76 \times 10^4 \text{ sej} \cdot \text{J}^{-1}$	文献[16]	$9.20 \times 10^{12}$
	合计				$2.59 \times 10^{18}$
本地不可再生资源( $N$ )	建设期表土侵蚀	$9.59 \times 10^3 \text{ J}$	$1.05 \times 10^5 \text{ sej} \cdot \text{J}^{-1}$	文献[17]	$1.01 \times 10^9$
	生命周期主要植被损失	$1.26 \times 10^{10} \text{ J}$	$5.86 \times 10^5 \text{ sej} \cdot \text{J}^{-1}$	文献[18]	$7.40 \times 10^{15}$
	合计				$7.40 \times 10^{15}$
建设期不可再生资源输入( $F_1$ )	钢材	$2.16 \times 10^6 \text{ g}$	$4.13 \times 10^9 \text{ sej} \cdot \text{g}^{-1}$	文献[16]	$8.94 \times 10^{15}$
	木材	$4.48 \times 10^7 \text{ g}$	$5.86 \times 10^4 \text{ sej} \cdot \text{g}^{-1}$	文献[16]	$2.63 \times 10^{12}$
	铝材	$2.46 \times 10^5 \text{ g}$	$7.90 \times 10^9 \text{ sej} \cdot \text{g}^{-1}$	文献[19]	$1.94 \times 10^{15}$
	玻璃	$3.51 \times 10^5 \text{ g}$	$7.90 \times 10^9 \text{ sej} \cdot \text{g}^{-1}$	文献[19]	$2.77 \times 10^{15}$
	其他材料	$3.93 \times 10^2 \text{ g}$	$5.20 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \text{g}^{-1}$	文献[20]	$2.04 \times 10^{15}$
	施工用电	$3.67 \times 10^9 \text{ J}$	$2.69 \times 10^5 \text{ sej} \cdot \text{J}^{-1}$	文献[16]	$9.87 \times 10^{14}$
	施工用水	$1.45 \times 10^7 \text{ g}$	$1.92 \times 10^6 \text{ sej} \cdot \text{g}^{-1} *$	文献[21]	$2.78 \times 10^{13}$
	施工机械能量	$5.22 \times 10^3 \text{ 元}$	$5.20 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \text{元}^{-1}$	文献[20]	$2.72 \times 10^{16}$
	设备与安装	$1.75 \times 10^5 \text{ J}$	$5.20 \times 10^{12} \text{ sej} \cdot \text{J}^{-1}$	文献[20]	$9.08 \times 10^{17}$

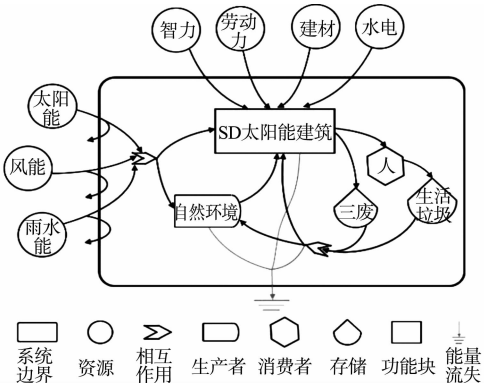


图 2 能值系统图  
Fig. 2 Energy system diagram

续表  
Continue table

类别	项目	原始数据	能值转换率	数据来源	太阳能值/sej
建设期不可再生资源输入( $F_1$ )	教师脑力服务	4 人	$1.81 \times 10^{16}$ sej · 人 <sup>-1</sup> **	文献[15]	$7.24 \times 10^{16}$
	研究生脑力服务	1 人	$6.03 \times 10^{15}$ sej · 人 <sup>-1</sup> **	文献[15]	$6.03 \times 10^{15}$
	施工体力劳动	$1.31 \times 10^8$ J	$5.11 \times 10^7$ sej · J <sup>-1</sup>	文献[20]	$6.71 \times 10^{15}$
	施工管理脑力服务	18 人	$2.17 \times 10^{15}$ sej · 人 <sup>-1</sup> **	文献[15]	$3.90 \times 10^{16}$
	施工固体废弃物	$3.88 \times 10^9$ J	$3.02 \times 10^6$ sej · J <sup>-1</sup> **	文献[15]	$1.17 \times 10^{16}$
	施工废水	$3.30 \times 10^6$ J	$1.44 \times 10^6$ sej · J <sup>-1</sup> **	文献[15]	$4.77 \times 10^{12}$
	施工生活污水	$5.04 \times 10^7$ J	$1.44 \times 10^6$ sej · J <sup>-1</sup> **	文献[15]	$7.28 \times 10^{13}$
	施工生活垃圾	$6.91 \times 10^8$ J	$3.02 \times 10^6$ sej · J <sup>-1</sup> **	文献[15]	$2.09 \times 10^{15}$
合计					$1.09 \times 10^{18}$
运营期不可再生资源输入( $F_2$ )	运营用水	$2.63 \times 10^9$ g	$6.60 \times 10^5$ sej · g <sup>-1</sup>	文献[20]	$1.73 \times 10^{15}$
	运营维修	$8.09 \times 10^4$ J	$5.20 \times 10^{12}$ sej · J <sup>-1</sup>	文献[20]	$4.21 \times 10^{17}$
	运营生活垃圾	$6.00 \times 10^{10}$ J	$3.02 \times 10^6$ sej · J <sup>-1</sup> **	文献[15]	$1.81 \times 10^{17}$
	运营生活污水	$5.97 \times 10^8$ J	$1.12 \times 10^6$ sej · J <sup>-1</sup>	文献[16]	$6.69 \times 10^{14}$
合计					$6.04 \times 10^{17}$
运营后期不可再生资源输入( $F_3$ )	拆除机械能量	$1.36 \times 10^{12}$ J	$5.20 \times 10^{12}$ sej · J <sup>-1</sup>	文献[20]	$7.07 \times 10^{14}$
	拆除体力劳动	$1.17 \times 10^8$ J	$5.11 \times 10^7$ sej · J <sup>-1</sup> **	文献[15]	$1.00 \times 10^{16}$
	拆除期固体废弃物	$2.89 \times 10^9$ J	$1.80 \times 10^6$ sej · J <sup>-1</sup> **	文献[15]	$8.74 \times 10^{15}$
合计					$1.95 \times 10^{16}$
不可再生资源输入( $F=F_1+F_2+F_3$ )					$1.71 \times 10^{18}$

**步骤 3** 根据能量流特点,引入能值分析指标,构建 SD 太阳能建筑的能值分析指标体系(表 2),据此评价太阳能建筑的可持续性发展情况。

表 2 能值评价指标

Tab. 2 Emergy evaluation indices

指标	量符号	计算公式	数值
本地可再生资源	$R$	—	$2.59 \times 10^{18}$ sej
本地不可再生资源	$N$	—	$7.40 \times 10^{15}$ sej
输入资源	$F$	—	$1.71 \times 10^{18}$ sej
能值产出率	EYR	$(R+N+F)/F$	2.52
环境负载率	ELR	$(N+F)/R$	0.66
可持续发展性能	ESI	$EYR/ELR$	3.80

这是因为这一阶段需要使用大量的建筑材料、水电、劳动力进行建造,而运营期能够依赖太阳能进行能源供给,降低了对输入资源的依赖,仅占总能值投入的 14.02%;运营后期,建筑的拆卸工作产生了一定的能值消耗,但由于对大部分材料进行了回收再利用,因此,固体废弃物少,建筑能耗小,仅占总能值投入的 0.45%。

根据能值指标<sup>[18]</sup>对“Sunny Inside”进行可持续性评价可得出:能值产出率(EYR)为 2.52,大于 1,表明 SD 建筑项目生产效率和能源利用率较高,依赖自然环境产生效益;环境负荷率(ELR)为 0.66,小于 1,表明 SD 建筑对环境压力小,经济系统的作用相对自然系统而言较小,使用大量的可再生资源,从而降低建筑对环境的影响程度,降低排放;可持续发展性能 ESI 为 3.80, $1<ESI<10$ ,说明该建筑可持续性好,这是由于其充分利用太阳能这一本地可再生资源,增强自然环境的作用,降低经济社会投入,使系统可持续发展性得以提升。

2.3 碳足迹分析

依据全生命周期理论,碳足迹方法计算过程主要分为 3 个阶段<sup>[22]</sup>:建设期、运营期、运营后期。建设期碳足迹主要考虑 SD 建筑建设过程中建筑材料和安装设备生产、运输、施工安装过程及施工安装废弃物处理的温室气体排放;运营期碳足迹主要来自 SD 建筑运营期内各种能源和物质消耗所产生的温室气体排放;运营后期碳足迹主要考虑建筑拆除过程和废弃物处理过程产生的温室气体。碳足迹分析对象包含 CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>,NO<sub>x</sub> 等温室气体,均以 CO<sub>2</sub> 等价物表示。“Sunny Inside”的碳足迹来源主要有 2 个方面:全生命周期中使用的物质和能源消耗,以及废弃物排放,均乘以相应的碳排因子<sup>[23]</sup>计。

1) 物质和能源消耗. 建设期物质和能源消耗包括建筑材料(如钢材、木材等)、安装设备及使用能源(水、电等),根据消耗量清单确定;运营期的能源消耗包括照明负荷、制冷与空调负荷,主要为水和电,而该太阳能建筑使用太阳能发电,因此,运营用电不产生碳足迹;运营后期碳足迹主要由建筑拆除过程中的消耗能源产生,如拆卸时使用的机械能量.

2) 废弃物排放. 建设期和运营后期产生建筑垃圾、施工污水、废气等,运营期产生的主要是生活垃圾和生活污水. 其中,建筑废弃物和生活垃圾的碳足迹由处理过程产生的碳排放量确定,机械能量根据设备使用的柴油计量<sup>[23]</sup>.

碳足迹计算结果,如图 3 和表 3 所示. 图 3 中: $\eta_c$  为碳足迹占比. 由图 3 可知:“Sunny Inside”的建设中,建设期和运营期产生的碳足迹分别占总碳排放的 48.33% 和 48.63%;运营后期的碳足迹比例仅为 3.04%. 在建设期,SD 建筑投入大量建筑材料、燃料等非可再生能源,同时产生建筑废弃物,相应的碳排放也多,碳足迹占比高;在运营期,由于需要投入资源对建筑进行维护,因此,也有较大的碳足迹;而在运营后期,产生碳足迹的主要是固体废弃物及机械能量.

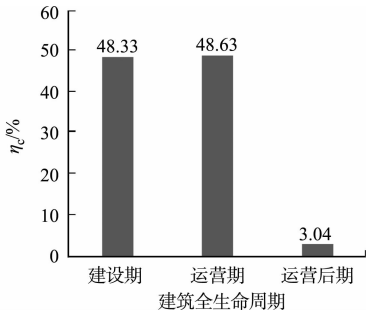


图 3 建筑全生命周期碳足迹占比  
Fig. 3 Proportion of carbon footprint in whole building life cycle

表 3 碳足迹分析表  
Tab. 3 Carbon footprint analysis

建筑生命周期	项目	消耗量	碳足迹因子	数据来源	碳足迹/ kgCO <sub>2</sub> e
建设期	钢材	2.16 t	1 550 kgCO <sub>2</sub> e • t <sup>-1</sup>	文献[24]	3 353.64
	木材	74.66 m <sup>3</sup>	146.3 kgCO <sub>2</sub> e • m <sup>-3</sup>	文献[24]	10 923.42
	铝材	0.22 t	29 900 kgCO <sub>2</sub> e • t <sup>-1</sup>	文献[24]	6 469.27
	玻璃	0.35 t	7 910 kgCO <sub>2</sub> e • t <sup>-1</sup>	文献[24]	2 768.50
	其他材料	0.39 kg	1.78 kgCO <sub>2</sub> e • kg <sup>-1</sup>	文献[25]	0.70
	施工用电	1 018.18 kW • h	1.04 kgCO <sub>2</sub> e • (kW • h) <sup>-1</sup>	文献[24]	1 058.91
	施工用水	14.52 m <sup>3</sup>	0.26 kgCO <sub>2</sub> e • m <sup>-3</sup>	文献[24]	3.76
	施工机械能量	255.37 kg	4.37 kgCO <sub>2</sub> e • kg <sup>-1</sup>	文献[24]	1 115.97
	设备与安装	249.42 kg	1 027.42 kgCO <sub>2</sub> e • kg <sup>-1</sup>	文献[26]	256 261.90
	施工固体废弃物	5 616.00 kg	4.37 kgCO <sub>2</sub> e • kg <sup>-1</sup>	文献[24]	24 541.92
	施工废水	14.52 m <sup>3</sup>	0.26 kgCO <sub>2</sub> e • m <sup>-3</sup>	文献[24]	3.76
	施工生活污水	10.08 m <sup>3</sup>	0.26 kgCO <sub>2</sub> e • m <sup>-3</sup>	文献[24]	2.61
	施工生活垃圾	0.16 t	1 942.47 kgCO <sub>2</sub> e • t <sup>-1</sup>	文献[27]	317.84
合计					306 822.21
运营期	运营用水	2 628.00 m <sup>3</sup>	0.26 kgCO <sub>2</sub> e • m <sup>-3</sup>	文献[24]	681.18
	运营维修	—	—	文献[25]	279 777.43
	运营生活垃圾	14.22 t	1 942.47 kgCO <sub>2</sub> e • t <sup>-1</sup>	文献[27]	27 621.92
	运营生活污水	2 628.00 m <sup>3</sup>	0.26 kgCO <sub>2</sub> e • m <sup>-3</sup>	文献[24]	681.18
合计					30 8761.71
运营后期	拆除机械能量	232.57 kg	4.37 kgCO <sub>2</sub> e • kg <sup>-1</sup>	文献[24]	1 016.31
	拆除期固体废弃物	4 190.80 kg	4.37 kgCO <sub>2</sub> e • kg <sup>-1</sup>	文献[24]	18 313.80
合计					19 330.11
建筑全生命期碳足迹总计					634 914.03

2.4 比较分析

2.4.1 一致性/相关性 能值分析和碳足迹方法都可以描述一个建筑的能耗,并且从不同方面描述建筑对环境的影响. 将能值分析的各项不可再生资源占总能值投入的比例与碳足迹占比进行对比,结果如表 4 所示. 表 4 中: $\eta_n$  为不可再生能值占比. 由表 4 可知:输入最多的不可再生能值为设备与安装及运营维修,分别占总能值的 21.08% 和 9.77%,碳足迹也呈现同样的结果,设备与安装及运营维修的碳足迹占比分别为 40.36% 和 44.07%,其余物质、商品和服务的排放量相对较小. 对比数据可知,全生命周期

的不可再生能值消耗与碳足迹的产生趋势相一致,不可再生能值投入越多,碳排放也越多.

表 4 建筑全生命周期不可再生能值和碳足迹占比

Tab. 4 Proportion of non-renewable emergy and carbon footprint in whole building life cycle

项目	$\eta_n/\%$	$\eta_c/\%$	项目	$\eta_n/\%$	$\eta_c/\%$
钢材	0.21	0.53	木材	0	1.72
铝材	0.05	1.02	玻璃	0.06	0.44
其他材料	0	0	施工用电	0.02	0.17
施工用水	0	0	施工机械能量	0.63	0.18
设备与安装	21.08	40.36	施工固体废弃物	0.27	3.87
施工废水	0	0	施工生活污水	0	0
施工生活垃圾	0.05	0.05	运营用水	0.04	0.11
运营维修	9.77	44.07	运营生活垃圾	4.20	4.35
运营生活污水	0.02	0.11	拆除机械能量	0.02	0.16
拆除期固体废弃物	0.20	2.88			

2.4.2 差异性 尽管能值分析方法的不可再生资源与碳足迹方法的结果相似,两种评价方法却存在一定的差异性:二者从不同角度对建筑可持续性进行评价.能值分析方法涵盖了自然资源、社会和经济,将建筑全生命周期各类能源和物质按来源不同,细分为不同类别(本地可再生资源  $R$ 、本地不可再生资源  $N$ 、不可再生资源输入  $F$ ),采用能值指标对建筑的可持续性进行评价.不同的能源输入结构表明建筑不同的资源利用情况,也会产生不同的废弃物,如增加本地可再生资源  $R$  的投入会减轻环境负担,从而提高建筑的可持续性.“Sunny Inside”的 3 类资源分别占总投入的 60.13%,0.17%和 39.70%,可再生资源(主要是太阳能)在总投入中占很大比例,因此相比经济投入,该建筑更依赖自然资源,从而使建筑的可持续性高,ESI=3.80.碳足迹通过研究建筑全生命周期的碳排放进行评价,排放的温室气体越多,建筑对环境的影响越大,造成的温室效应越严重.建筑全生命周期中,生产运输建筑材料与进行运营维修产生的温室气体共占 88.13%,说明应从降低建筑材料和运营维修的碳排放方面来降低建筑物产生的环境影响.

此外,能值分析方法在计算建筑废弃物的能值时,将废弃物的能量算作不可再生资源投入,无法明确计算建筑废弃物对环境产生的负面影响,碳足迹则旨在计算建筑排放的废气对环境的影响,计算各类建筑材料和能源在生产、运输、使用过程中产生的温室气体,从而得出建筑代谢产生的温室效应.因此,能值分析侧重分析所有输入能量的结构,计算建筑的能耗,但是对建筑废弃物造成的环境影响无法得出精确结论;碳足迹则侧重对建筑的废气排放进行具体计算,直接得出建筑对环境产生的温室效应.

3 结论

对比两种评价建筑可持续性的生态经济学方法:能值分析和碳足迹,并以“Sunny Inside”太阳能建筑为例,对比两种方法在建筑可持续性上定量评价结果的一致性和差异性.结果表明,建筑碳足迹的产生和不可再生能值的投入相一致;能值分析与碳足迹方法分别从不同角度对建筑的可持续性进行评价.能值方法使用能值转换率将不同能量采用统一能值单位进行度量,从资源消耗的角度对建筑的能耗进行分析,进而做到能源的精细化管理,同时能值指标能够对建筑的可持续性进行评价,有助于更准确地理解建筑的能源效率、能源结构及环境压力.碳足迹仅从排放的角度,即建筑物排放 CO<sub>2</sub> 等温室气体的角度评估建筑对环境产生的温室效应,并不包括材料及设备本身的“包被能”,且没有考虑自然环境及人力资本投入等.

两种方法评价建筑可持续性各有侧重.分析建筑消耗的资源结构时,采用能值方法从资源投入的输入端进行;分析建筑对环境产生的温室效应时,则使用碳足迹从建筑产物的代谢端进行.

参考文献:

[1] 黄玲.中国建筑节能的现状 & 思考[J].建设科技,2008(16):74-75. DOI:10.3969/j.issn.1671-3915.2008.16.021.  
[2] 张军学,王晨杨.基于能值法和碳排放法的建筑可持续性对比评估研究[J].城市建筑,2018(11):103-106. DOI:10.

3969/j. issn. 1673-0232. 2018. 11. 027.

[3] ODUM H T, ODUM E C, BROWN M T. Environment and society in Florida[M]. Colorado: Lewis Publishers, 1997. DOI:10. 1201/9780203757222.

[4] ODUM H T. System ecology: An introduction[M]. New York: Wiley, 1983. DOI:10. 2307/3899786.

[5] MEILLAUD F, GAY J B, BROWN M T. Evaluation of a building using the emergy method[J]. Solar Energy, 2005, 79(2): 204-212. DOI:10. 1016/j. solener. 2004. 11. 003.

[6] HOSSAINI N, HEWAGE K. Sustainable materials selection for canadian construction industry: An emergy-based life-cycle analysis (Em-LCA) of conventional and LEED suggested construction materials[J]. Journal of Sustainable Development, 2012, 5(1): 2-12. DOI:10. 5539/jsd. v5n1p2.

[7] 张学军, 彭昌海, 王晨杨. 基于能值方法评估高层办公建筑生态可持续性: 以东南大学逸夫建筑楼为例[J]. 华中建筑, 2019, 37(2): 44-48. DOI:10. 13942/j. cnki. hzjz. 2019. 02. 011.

[8] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130. DOI:10. 1177/095624789200400212.

[9] 李飞, 崔胜辉, 高莉洁, 等. 砖混和剪力墙结构住宅建筑碳足迹对比研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(6I): 18-22. DOI:10. 3969/j. issn. 1003-6504. 2012. 06I. 005.

[10] 曾杰, 颜伟国, 赫赫, 等. 建筑材料碳足迹研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(增刊 1): 321-325. DOI:10. 3969/j. issn. 1005-023X. 2013. z1. 090.

[11] 李水生, 肖初华, 杨建宇, 等. 建筑施工阶段碳足迹计算与分析研究[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(3): 41-45. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-1212. 2020. 03. 009.

[12] ODUM H T, BROWN M T, BRANDT-WILLIAMS S L. Handbook of emergy evaluation folio 1: Introduction and global budget[M]. Gainesville: University of Florida, 2000.

[13] CAMPBELL D E. Emergy analysis of human carrying capacity and regional sustainability: An example using the state of Maine[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1998, 51(1): 531-569.

[14] ODUM H T. Environmental accounting: EMERGY and environmental decision making[J]. Forest Science, 1997, 43(2): 305-306. DOI:10. 1093/forestscience/43. 2. 305.

[15] ODUM H T. Environmental accounting: Emergy and environmental decision making[M]. New York: Wiley, 1996. DOI:10. 5860/choice. 34-0412.

[16] 李鹏飞. 煤炭矿区复合生态系统能值分析[D]. 济南: 山东师范大学, 2014.

[17] 王红彦. 基于生命周期评价的秸秆沼气集中供气工程能值分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.

[18] BROWN M T, BARDI E. Handbook of emergy evaluation: A compendium of data for emergy computation issued in a series of folios[M]. Gainesville: Center for Environmental Policy, 2001.

[19] AMOEDA R. Design for deconstruction: Emergy approach to evaluate deconstruction effectiveness[D]. Portugal: Universidade do Minho, 2009.

[20] 钱锋, 王伟东. 建筑环境效率能值分析与评价: 以北京大学体育馆为例[J]. 建筑学报, 2007(7): 39-42. DOI:10. 3969/j. issn. 0529-1399. 2007. 07. 011.

[21] HAUKOOS D S. Sustainable architecture and its relationship to industrialized building[D]. Gainesville: University of Florida, 1995.

[22] 李鹏, 黄继华, 莫延芬, 等. 昆明市四星级酒店住宿产品碳足迹计算与分析[J]. 旅游学刊, 2010, 25(3): 27-34. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-5006. 2010. 03. 009.

[23] 刘亮. 基于 LCA 模型的工程项目碳足迹评估实证研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2011.

[24] 高源雪. 建筑产品物化阶段碳足迹评价方法与实证研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.

[25] 申娟娟. 基于 LCA 的建筑碳足迹测算及减排对策研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.

[26] 胡建星, 郁亚娟, 黄凯, 等. 3 种先进新能源电池的足迹家族分析[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(7): 83-87. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-425X. 2018. 07. 021.

[27] 朱文婷, 韦保仁. 苏州市生活垃圾处理碳足迹核查[J]. 环境科学研究, 2011, 24(7): 828-834.

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 方德平)