

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.020

基于生态足迹的建筑项目生态可持续性评价

滕佳颖^{1,2}, 吴贤国¹, 冉连月¹, 覃亚伟¹, 刘惠涛³

(1. 华中科技大学, 武汉 430074; 2. 吉林建筑大学 经济与管理学院, 吉林 130021;

3. 华中科技大学 附属同济医院, 武汉 430030)

摘要: 本文构建了项目全寿命周期生态足迹模型, 涵盖全寿命周期消耗的能源、资源、产出的 CO₂、固体垃圾 4 个方面的生态足迹, 提出了全寿命周期生态足迹空间效益指标, 用于评价建筑项目的生态可持续性。研究了严寒地区 4 种不同结构类型(砖混平房、多层砖混楼房、多层钢混楼房、高层钢混楼房)住宅建筑的生态足迹和生态可持续性。结果表明, 相比于平房, 体形系数和窗墙比较小的高层住宅楼的生态可持续性高; 在层数、体型系数和窗墙比都相同的情况下, 钢混结构比砖混结构住宅楼的生态可持续性高; 4 种结构类型住宅楼中, 高层钢混结构的生态可持续性较高, 是较适宜推广的建筑结构类型。

关键词: 生态足迹; 空间效益; 住宅建筑

中图分类号: TU201.5; F407.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)S2-0104-05

Study on eco-footprint-based eco-sustainability assessment of building projects

Teng Jiayiny^{1,2}, Wu Xianguo¹, Ran Lianyue¹, Qing Yawei¹, Liu Huitao³

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074; 2. Jilin Jianzhu University, Jilin 130021;

3. Tongji Hospital, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030)

Abstract: This study established the life-cycle eco-footprint calculating model of building projects, which contained the eco-footprint in 4 aspects of life-cycle energy consumed, resource consumed, carbon emitted and solid waste produced. Space efficiency of life-cycle eco-footprint index was proposed, and used to assess the ecological sustainability of building projects. Then we investigated the eco-footprint and eco-sustainability of four different structure types (brick-concrete bungalow, multi-story brick-concrete, multi-story steel-concrete, high-rise steel-concrete) for residential building in severely cold areas. Results indicated that, compared with bungalow, high-rise building with relatively small shape coefficient and window-wall ratio had higher eco-sustainability; when the buildings had the same story, shape coefficient and window-wall ratio, steel-concrete building had higher eco-sustainability than brick-concrete building; high-rise steel-concrete structure had the greatest eco-sustainability during the 4 different structure type buildings, which was more suitable to promote.

Key words: Eco-footprint; Space Efficiency; Residential Building

据调查, 建筑业消耗了全球约 40% 的能源, 并排放约 36% 的 CO₂^[1], 如何实现建筑项目与生态环境的可持续发展已成为国际关注的焦点。中国作为

建筑业大国, 建筑业能耗占总能耗的 37%, 已对生态环境造成了巨大的影响, 迫切需要实现建筑项目的生态可持续发展。

目前,中国每年的新建建筑面积平均高达 20 亿平方米左右,为了有效的促进建筑项目的生态可持续发展,需要提出合理有效的建筑项目生态可持续性评价方法,明确地区较适宜推广的建筑结构类型。

Mathis Wackernagel 提出的生态足迹指标^[2],目前已被公认为简单和有效的生态可持续评价指标,但生态足迹还未广泛应用于建筑项目的生态可持续性评价^[3-5]。

因此,本文首先在构建系统全面的建筑项目全寿命周期生态足迹模型的基础上,提出生态足迹空间效益指标,用于全面评价建筑项目全寿命周期的生态可持续性。研究严寒地区砖混平房、多层砖混楼房、多层钢混楼房、高层钢混楼房 4 种典型结构住宅项目的生态足迹和生态效益,确定严寒地区适宜推广的生态可持续性住宅建筑结构类型。

1 基于生态足迹的建筑项目生态可持续性评价方法

1.1 建筑项目全寿命周期生态足迹测算模型

建筑项目全寿命周期生态足迹由公式(1)计算,即从建筑全寿命周期出发,首先,将建筑项目全寿命周期投入的能量和资源量,以及产出的 CO₂ 数量和固体垃圾数量转换成化石能源用地、可耕地、草地、森林、建设用地或水域生态生产性用地面积;然后,利用均衡因子将各类生态生产性用地面积统一为以国家公顷(national hectare, nha)^[6]为计量单位的土地面积,并求和。

$$EF_{\text{tot}} = EF_{\text{ene,con}} + EF_{\text{res,con}} + EF_{\text{car,pro}} + EF_{\text{was,pro}} \quad (1)$$

式中: $EF_{\text{ene,con}}$, $EF_{\text{res,con}}$, $EF_{\text{car,pro}}$, $EF_{\text{was,pro}}$ 分别代表项目全寿命周期消耗的能源、消耗的资源、产生的 CO₂ 以及固体垃圾的生态足迹。单位为国家公顷 nha。

1.1.1 全寿命周期消耗的能源生态足迹 项目全寿命周期消耗的能源包括材料生产过程的内含能源、施工活动消耗的能源、运营阶段消耗的能源以及项目前期设计、规划、勘察、拆除、垃圾处理过程消耗的能源,消耗的能源种类主要包括电、汽油和柴油,其生态足迹可由公式(2)计算。

$$EF_{\text{ene,con}} = \sum_{i=1}^n A_{\text{ene},i} \times Q_{\text{ene},i} \times \lambda_{\text{ene},i} \quad (2)$$

式中: $A_{\text{ene},i}$ 为项目全寿命周期使用的第 i 种能源单位生态生产性土地面积(ha/kg; ha/kWh; ha/MJ); $Q_{\text{ene},i}$ 为项目全寿命周期第 i 种能源消耗的数量(kg;

kWh; MJ); $\lambda_{\text{ene},i}$ 为第 i 种能源占用的生态生产性土地类型的均衡因子 nha/ha, n 代表项目全寿命周期消耗的能源种类总数。

1.1.2 全寿命周期消耗的资源生态足迹 项目全寿命周期消耗的资源包括各种原材料、水资源以及建设用地,其生态足迹可由公式(3)计算。

$$EF_{\text{res,con}} = \sum_{i=1}^n A_{\text{res},i} \times Q_{\text{res},i} \times \lambda_{\text{res},i} \quad (3)$$

式中: $A_{\text{res},i}$ 为项目全寿命周期第 i 种资源的单位生态生产性土地面积,ha/kg; $Q_{\text{res},i}$ 为项目全寿命周期第 i 种资源的消耗总量,kg; $\lambda_{\text{res},i}$ 为项目全寿命周期第 i 种资源占用的生态生产性土地类型的均衡因子,nha/ha; n 为项目全寿命周期消耗的资源种类总数。

1.1.3 全寿命周期产出的 CO₂ 生态足迹 项目全寿命周期 CO₂ 主要来自材料生产过程内含能源、施工活动能源、运营阶段能源以及项目设计、规划、勘察、拆除和垃圾处理过程能源燃烧产生的碳排放量,其生态足迹可由公式(4)计算。

$$EF_{\text{car,pro}} = A_{\text{CO}_2} \times Q_{\text{car}} \times \lambda_{\text{CO}_2} \quad (4)$$

式中: A_{CO_2} 为吸收能源消耗过程排放的 CO₂ 所需的单位生态生产性土地面积,ha/kg; λ_{CO_2} 为占用的生态生产性土地类型的均衡因子,nha/ha; Q_{car} 为项目全寿命周期碳排放量,可由公式(5)计算。

$$Q_{\text{car}} = \left(\sum_{i=1}^n Q_{\text{m},i} \times e_i \times \mu_i \right) + \left(\sum_{j=1}^m Q_{\text{a},j} \times e_j \times \mu_j \right) + \left(\sum_{k=1}^z Q_{\text{o},i} \times \mu_{\text{o},i} \right) + Q_{\text{pw,car}} \quad (5)$$

式中: $Q_{\text{m},i}$ 为第 i 种材料的消耗量(考虑建筑原材料在施工过程中因工艺损耗或管理不善等原因的废弃比例); e_i 为第 i 种材料的内含能源,包括原材料开采、加工生产和运输能耗,MJ/kg; μ_i 为第 i 种建筑原材料开采、加工生产和运输过程能耗的碳转换因子; $Q_{\text{a},j}$ 为第 j 种施工活动施工量(t; m³; m²); e_j 为第 j 种施工活动的单位能耗(MJ/t; MJ/m³; MJ/m²); μ_j 为第 j 种施工活动使用的能源的碳转化因子,kg/MJ; $Q_{\text{o},i}$ 为运营期第 i 种能源消耗的数量(kg; kWh; MJ); $\mu_{\text{o},i}$ 为第 i 种能源的碳转换因子(kg(c)/kg; kg(c)/kWh; kg(c)/MJ); $Q_{\text{pw,car}}$ 为项目前期准备、拆除和垃圾处理阶段的碳排放量; n 为消耗的材料种类总数; m 为施工活动的总数; z 为运营期主要消耗的能源种类总数(电、天然气)。

1.1.4 全寿命周期产出的固体垃圾生态足迹 项目全寿命周期产出的固体垃圾生态足迹可由公式

(6)计算。

$$EF_{was,pro} = A_{was} \times Q_{was} \times \lambda_{was} \quad (6)$$

式中: A_{was} 为垃圾处理的单位生态生产性土地面积, ha/kg; Q_{was} 为建筑项目全寿命周期产生的垃圾数量, kg; λ_{was} 为占用的生态生产性土地类型的均衡因子, nha/ha。

1.2 建筑项目生态可持续性评价指标

建筑项目最终目的是提供人们的活动空间^[3, 7], 基于全寿命周期生态足迹, 构建项目生态足迹空间效益指标, 用于评价建设项目的全寿命周期生态可持续性。

项目生态足迹空间效益由公式(7)计算, 其是建筑项目全寿命周期占用的生态足迹所能提供的建筑物使用年限内的空间价值, 其结果越大建设项目全寿命周期生态可持续性越高。

$$EE_{spa} = \frac{\sum_{i=1}^m (S_i \times H_i \times N)}{EF_{tot}} \quad (7)$$

式中: m 为项目的子空间总数; S_i 为项目第 i 个空间的建筑面积, m^2 ; H_i 为项目第 i 个空间的建筑层高, m。

2 住宅项目的实例研究

2.1 研究对象

选取哈尔滨(严寒)地区 4 栋不同结构类型的传统居住建筑^[8] M1~M4, 作为生态可持续性评价的研究对象, 运营期为 50 年。

M1: 砖混平房建筑面积为 110.76 m^2 , 层高 3 m。约容纳人数 7 人。

M2: 多层砖混楼房共 5 层, 建筑面积为 1 335.15 m^2 , 1-4 层层高为 3 m, 5 层层高为 3.3 m。约容纳 175 人。

M3: 多层钢混楼房共 5 层, 建筑面积为 1 335.15 m^2 , 1-4 层层高为 3 m, 5 层层高为 3.3 m。约容纳 175 人。

M4: 高层钢混楼房共 12 层, 建筑面积为 2 103.88 m^2 , 1-11 层层高为 3 m, 12 层层高为 3.3 m。约容纳 420 人。

2.2 数据来源

单位生态生产性面积和均衡因子的具体数值来源于[6] [9-11]。材料的废弃比例 w_i , 内含能源 e_i , 材料生产过程的碳转换因子 μ_i , 施工活动使用的能源的碳转化因子 μ_j 和第 i 种能源的碳转换因子 $\mu_{o,i}$ 的数值来源于[7, 12]。

由于建筑物材料种类众多, 实例研究只选取消耗的六种主要原材料^[8], 见表 1, 运营阶段消耗的水资源量根据中国哈尔滨省最低用水标准 80 L/(人·天)计算, 运营阶段能耗数据源于文献^[8], 运营年限 50 年。拆除和垃圾处理阶段的垃圾数量是根据项目实际的建筑面积和建筑类型, 应用 May T. Watts Appreciation Society 在线软件计算而来。

表 1 全寿命周期消耗的材料数量 kg

材料名称	M1	M2	M3	M4
钢材	2 910	30 840	62 610	132 540
砂子	32 560	378 520	512 250	861 540
水泥	20 930	201 870	305 930	541 220
砖(块)	32 465	374 510	26 890	41 747
玻璃	1 130	13 670	14 910	31 560
碎石	27 330	326 970	850 190	1 424 850

建筑前期设计、规划、勘察的能耗和碳排放量分别按照材料生产和施工活动的能耗之和和碳排放量之和的 1.1% 推算^[12-13], 拆除和垃圾处理过程的能耗按照运营阶段能耗的 0.012 推算, 碳排放按照 0.021 推算^[8, 14]。

2.3 计算结果分析

2.3.1 全寿命周期能耗与碳排放量建筑项目的全寿命周期能耗、水资源消耗、碳排放和垃圾数量见表 2。

表 2 全寿命周期能耗、水资源消耗、碳排放和垃圾数量

结构类型	全寿命周期能耗/MJ	全寿命周期水资源/kg	全寿命周期碳排放量/kg	全寿命周期垃圾数量/kg
M1	2.11682E+11	204 400	57 050 809	68 960
M2	1.069E+12	5 110 000	288 188 897	944 060
M3	9.2601E+11	5 110 000	249 691 707	944 060
M4	1.35102E+12	12 264 000	364 441 278	1 487 610

根据表 2 的数据, 计算不同结构类型建筑项目的单位能耗和单位碳排放量, 见图 1。

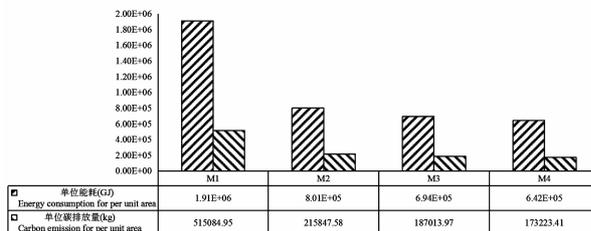


图 1 不同结构类型建筑项目的单位能耗和单位碳排放量

虽然表 2 显示 M4 的总能耗和碳排放量最高, M1 的总能耗和碳排放量最低,但是图 1 显示 M4 (高层钢混楼房)的单位能耗和碳排放最低,表明 M4 的单位环境影响较低,相对环保。与 M2-M4 相比, M1(砖混平房)体形系数和窗墙比较大,导致其单位能耗和碳排放最大,表明与低层住宅楼相比,体形系数和窗墙比较小的高层住宅楼较环保,较适宜推广。

2.3.2 全寿命周期生态足迹 应用式(1)~(6)计算建筑项目的全寿命周期生态足迹, M1、M2、M3 和 M4 的全寿命周期能源消耗、资源消耗、产出的 CO₂ 和固体垃圾以及总生态足迹见图 2。

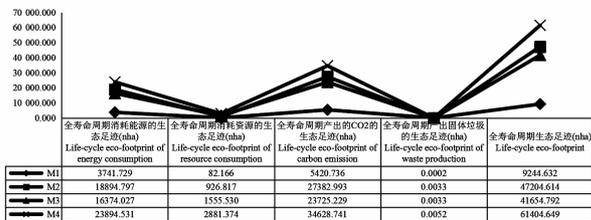


图 2 不同结构建筑项目的全寿命周期生态足迹

图 2 显示 M1(砖混平房)、M2(多层砖混楼房)、M3(多层钢混楼房)和 M4(高层钢混楼房)的全寿命周期生态足迹中 CO₂ 生态足迹最大,能源生态足迹位居第二,分别占全寿命周期生态足迹的 56 % 和 39 % 左右,资源和固体垃圾生态足迹占有的比例相对较小。表明项目的全寿命周期能源消耗和碳排放是造成环境影响的主要因素,如果要有效降低项目全寿命周期的生态足迹,应重视降低能源消耗和减少碳排放量,同时针对不同项目适当采取措施降低资源消耗以及固体垃圾的数量。

图 1 和图 2 显示,在层数、体型系数和窗墙比都相同的情况下(同等条件下),M3(多层钢混楼房)的单位能耗、单位碳排放量和全寿命周期生态足迹明显低于 M2(多层砖混楼房),表明钢混结构住宅楼比砖混结构住宅楼更环保,较适宜推广。

2.3.3 全寿命周期生态可持续性分析 应用公式(7)计算项目生态足迹空间效益,具体结果见图 3。

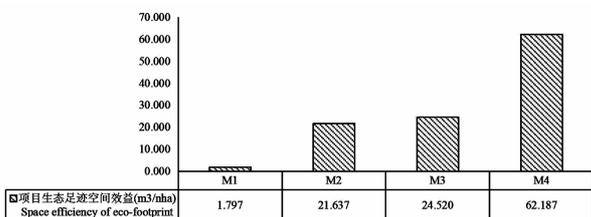


图 3 不同结构类型建筑项目的生态足迹空间效益

图 3 显示, M1(砖混平房)的生态足迹空间效益最小,即生态可持续性最低; M2(多层砖混楼房)的生态足迹空间效益低于 M3(多层钢混楼房), M4(高层钢混楼房)的生态足迹空间效益最大,即生态可持续性最高。

虽然 M1(砖混平方结构)的总能耗、碳排放量和生态足迹都最小,但是其单位能耗和碳排放量最大,生态可持续性较低,不适宜大量推广。同等条件下, M3(多层钢混结构)的生态足迹空间效益高于 M2(多层砖混结构),可知钢混结构比砖混结构更节能环保,生态可持续性高。M4(高层钢混结构)的单位能耗和碳排放最小,生态可持续性较高,较适宜推广。

3 结论

本文构建了建筑项目全寿命周期生态足迹模型,涵盖全寿命周期消耗的能源、资源、产出的 CO₂、固体垃圾 4 个方面生的态足迹,提出了建筑项目生态可持续评价指标——全寿命周期生态足迹空间效益。

通过分析严寒地区 4 种结构类型住宅项目的生态可持续性,发现项目全寿命周期生态足迹中能源和 CO₂ 生态足迹占有非常大的比例,分别占全寿命周期生态足迹的 39 % 和 56 % 左右,资源和固体垃圾生态足迹占有比例较小;与低层住宅楼相比,体形系数和窗墙比较小的高层住宅楼更节能环保,生态可持续性高;在层数、体型系数和窗墙比都相同的情况下,钢混结构比砖混结构更节能环保,生态可持续性高;在严寒地区 4 种结构类型的住宅项目中, M4(高层钢混结构)的单位能耗和碳排放最小,生态可持续性较高,是较适宜推广的住宅建筑类型。本文的研究成果对降低建筑项目的生态环境影响,推进建筑项目生态可持续发展具有一定的作用。

参考文献:

[1] CHANGE I P O C. Climate change 2001: mitigation [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

[2] CHAMBERS N S C W. Sharing Nature's Interest: Eco-logical Footprints as an Indicator of Sustainability [M]. Sterling Earthscan, London, Great Britain, 2004.

[3] LI D Z, HUI E, LEUNG B, et al. A methodology for eco-efficiency evaluation of residential development at

- city level[J]. *Building and Environmen*, 2010, 45(3): 566-573.
- [4] BIN G, PARKER P. Measuring buildings for sustainability: Comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home-The REEP House[J]. *Applied Energy*, 2012, 93(SI): 24-32.
- [5] SOLIS-GUZMAN J, MARRERO M, RAMIREZ-DE-ARELLANO A. Methodology for determining the ecological footprint of the construction of residential buildings in Andalusia (Spain) [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 25: 239-249.
- [6] 吴淑和. 绿色建筑生态足迹测算及其评价研究[D]. 西安建筑科技大学, 2011.
- [7] LI D Z, CHEN H X, HUI E, et al. A methodology for estimating the life-cycle carbon efficiency of a residential building [J]. *Building and Environment*, 2013, 59: 448-455.
- [8] 王松庆. 严寒地区居住建筑能耗的生命周期评价[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.
- [9] 钱坤. 基于能源消耗的建筑工程生态足迹评价[D]. 北京:清华大学, 2010.
- [10] 李德智,李启明,杜辉. 房地产生态足迹模型构建及实证分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2008(4): 732-735.
- [11] 伍文艳. 基于生态足迹理论的城市绿色住宅小区评价研究[D]. 南京:南京林业大学, 2012.
- [12] 李兵. 低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- [13] 江小星. 村镇住宅建设低碳化效益评价研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- [14] 仲平. 建筑生命周期能源消耗及其环境影响研究[D]. 成都:四川大学, 2005.

(编辑 吕建斌)