

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.03.008

# 装配式草砖结构农宅生命周期生态效益研究

魏广龙, 倪熙茁, 姚 胜, 王朝红

(河北工业大学 建筑与艺术设计学院, 天津 300130)

**摘要:** 基于生命周期分析理论和方法建立了农村住宅碳排放计算模型, 同时结合 Gabi 软件, 选取 CO<sub>2</sub> 排放量以及酸化潜力、富营养化潜力和人体毒性等环境影响指标, 针对北京地区某建成装配式草砖结构农宅与当地普通农宅进行生命周期生态效益评价。结果表明, 在 50 年生命周期内装配式草砖结构农宅碳排放量是普通农宅的 33.52%, 其中建筑使用阶段装配式草砖结构农宅碳排放量仅为普通农宅的 27.04%, 同时其造成的综合环境影响也明显降低, 为普通农宅的 30.99%。因此从生态效益的角度出发, 草砖墙体、光伏发电以及空气源热泵等技术在未来农宅的节能设计中具有广阔的应用前景。

**关键词:** 生命周期评价; 草砖墙体; 低能耗农宅; 碳排放; 生态效益

**中图分类号:** TU241.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2022)03-0375-11

## Study on life cycle ecological benefits of prefabricated straw bale rural residences

WEI Guanglong, NI Xizhuo, YAO Sheng, WANG Chaohong

(School of Architecture and Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** Based on the theory of and the method for the life cycle assessment (LCA), a calculating model for carbon emissions of rural residences is established. This study selected indicators such as CO<sub>2</sub> emission, eutrophication potential, human toxicity recommended and acidification potential to analyze the comprehensive ecological benefits through the comparison between a prefabricated straw bale residence already built in Beijing with a local normal rural residence. The LCA software Gabi is used to evaluate the environmental effect. Results show that the amount of CO<sub>2</sub> emission of the prefabricated straw bale residence is 33.52% of the normal rural residence in 50-year life cycle. The carbon emissions of the prefabricated straw bale residence generated in operation phase is just 27.04% of the normal rural residence. Meanwhile the environmental effect has been obviously reduced to 30.99% of the normal rural residence during this time. From the perspective of ecological benefits, the technology such as the straw bale wall, photovoltaic power generation and air source heat pump can enjoy a vast application in the future design of rural residences.

**Key words:** life cycle assessment; straw bale wall; low energy consumption rural residence; carbon emission; ecological benefits

根据气候变化预测, 全球变暖将持续成为威胁人类生存的重要因素<sup>[1]</sup>。据统计, 建筑业碳排放约占人类全部温室气体排放总量的 30%~50%<sup>[2]</sup>, 我国建筑业消耗的能源占全国总消耗的 38%<sup>[3]</sup>, 每建

成 1 m<sup>2</sup> 的房屋, 就会释放出约 0.8 t 的碳<sup>[4]</sup>。在此背景下, 建筑业面临的减排压力日益增加, 从生命周期的角度研究建筑碳排放, 对促进建筑业可循环可持续发展、实现“碳达峰、碳中和”发展目标具有

收稿日期: 2021-10-27; 网络出版日期: 2022-04-01

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220330.1853.012.html>

基金项目: 河北省省级科技计划资助项目(21556203D); 河北省社会科学发展研究课题资助项目(20210301148)

第一作者: 魏广龙, 男, 硕士, 副教授, 研究方向为智慧健康未来乡居。E-mail: 273358783@qq.com

通信作者: 姚胜, 男, 博士, 讲师, 研究方向为绿色宜居村镇建筑技术与设计。E-mail: yaosheng@tju.edu.cn

重大的意义。农村建筑是建筑节能减排的重要组成部分,截至2019年,我国农村住宅建筑面积基本稳定在 $2.31 \times 10^{10} \text{ m}^2$ ,约占全国总住宅建筑面积的40.1%<sup>[5]</sup>。随着农村经济水平发展,居民生活水平得到显著提升,传统农村住宅因建造水平低,热工性能差等不能满足舒适居住的要求,此外大部分新建农宅也缺乏科学设计,不符合现代建筑节能标准<sup>[6]</sup>。我国作为农业大国,秸秆资源量占世界总量的比例已经达到20%~30%<sup>[7]</sup>,但目前秸秆利用的主要方式依然是直接焚烧或者还田,对环境造成严重污染。在工信部、住建部联合印发《促进绿色建材生产和应用行动方案》<sup>[8]</sup>中,提出要支持利用农作物秸秆等性能优越的生物质建材,为进一步降低建筑材料碳排放寻求生态化的解决途径。

综上所述,国内外对于秸秆材料在建筑中的应用研究已经比较全面,为草砖结构在农村住宅更新中的推广提供了条件<sup>[9]</sup>。Buratti等<sup>[10]</sup>研究了木材和秸秆作为保温墙体的传热系数,总结出秸秆等天然材料具有良好的隔热性能。杨青松等<sup>[11]</sup>等通过草砖房的建设实践,从建筑性能、结构形式和经济性等方面与传统住宅进行比较分析,总结出草砖建筑在华北地区的适宜性建造技术。近年来也有学者开展了草砖建筑生命周期碳排放相关研究,Cornaro等<sup>[12]</sup>分析了由秸秆和天然石膏制成的新型复合墙体与传统墙体的生命周期能耗以及碳排放量,结果表明草砖墙体的能耗仅为传统墙体的一半,并且减少了超过40%的 $\text{CO}_2$ 排放。D'Alessandro等<sup>[13]</sup>对草砖墙体进行了热性能和声学性能的定量分析并借助SimaPro软件进行生命周期评价。刘崇等<sup>[14]</sup>对国外自承重式草砖建筑的建造方式与材料碳排放进行研究分析,为我国草砖建筑进一步推广提供了借鉴。徐旭东<sup>[15]</sup>运用混合生命周期方法计算了国内四种不同结构的草砖建筑生命周期碳排放,并评价其在建筑中封存 $\text{CO}_2$ 的能力。在建筑生命周期环境影响评价方面,Asdrubali等<sup>[16]</sup>将生命周期评价用作生态设计工具,分析了意大利三栋建筑采用不同优化措施带来的综合环境影响。张庭宁<sup>[17]</sup>对国内52个装饰装修工程项目从不同的维度开展了生命周期环境影响评价,并提出了相应的减排策略。根据现有研究,草砖结构农宅实际建成案例较少,碳排放足迹以及生命周期环境影响尚不明确,因此从生命周期的角度开展草砖结构农宅的生态效益和节能潜力分析是十分必要的。

基于上述文献研究现状,从以下内容开展研究

工作。

1) 针对北京地区已建成装配式草砖结构农宅和普通农宅进行生命周期碳排放计算并进行结果评价。

2) 借助生命周期分析软件Gabi量化案例农宅产生的环境影响并进行生态效益分析。

## 1 研究方法

### 1.1 生命周期碳排放计算模型

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是一种从产品的整个生命周期评估其对环境的影响、产生的经济效益等的研究方法。本文将基于LCA理论开展碳排放计算,分析比较装配式草砖结构农宅和普通农宅生命周期不同阶段的碳排放量、碳排放来源以及主要影响因素。图1为农宅碳排放计算阶段划分,其生命周期可以定义为物化阶段、使用阶段和拆除阶段三个子阶段。

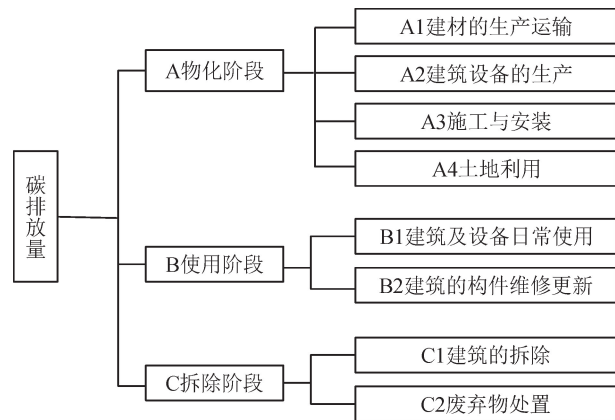


图1 农宅碳排放计算阶段划分

Fig. 1 Stage division of carbon emissions calculation for the rural residences

碳排放是指以 $\text{CO}_2$ 为主,包括少量甲烷( $\text{CH}_4$ )、氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )等温室气体的排放量。国际能源署将上述温室气体的排放量统一为二氧化碳当量进行碳排放分析<sup>[18]</sup>。建筑生命周期产生的碳排放量为各子阶段的累计值,见下式:

$$Q = Q_C + Q_S + Q_M \quad (1)$$

$$Q_C = Q_{yl} + Q_{js} + Q_s + Q_{td} \quad (2)$$

$$Q_S = Q_{rc} + Q_w \quad (3)$$

$$Q_M = Q_c + Q_{fc} \quad (4)$$

式中: $Q$ 表示装配式草砖结构农宅生命周期的总碳排放量, $\text{kgCO}_2\text{e}$ ;  $Q_C$ 、 $Q_S$ 、 $Q_M$ 分别表示A物化阶段、B使用阶段、C拆除阶段的碳排放, $\text{kgCO}_2\text{e}$ ,其中各分项涉及具体计算模型见表1。

表1 生命周期各子阶段碳排放分项计算模型

Tab.1 Calculation model for carbon emission in sub stages of life cycle

阶段	计算公式	变量	含义
A1	$Q_{yl} = \sum_{i=1}^n CR_i \times r_i$	$Q_{yl}$ $CR_i$ $r_i$	A1 阶段碳排放量/kgCO <sub>2</sub> e 第 $i$ 种建材开采加工与运输的碳排放因子/(kgCO <sub>2</sub> e · 单位 <sup>-1</sup> ) 第 $i$ 种建材的使用量/kg
A2	$Q_{js} = \sum_{i=1}^n CM_i \times m_i$ $CM_i = CM_{p_i} \times (1 - \beta_i) + CM_{r_i} \times \beta_i$	$Q_{js}$ $CM_i$ $m_i$ $CM_{p_i}$ $\beta_i$ $CM_{r_i}$	A2 阶段碳排放量/kgCO <sub>2</sub> e 考虑回收利用的第 $i$ 种设备生产碳排放因子/(kgCO <sub>2</sub> e · 单位 <sup>-1</sup> ) 第 $i$ 种建筑设备的使用量 第 $i$ 种建筑设备生产的碳排放因子/(kgCO <sub>2</sub> e · 单位 <sup>-1</sup> ) 第 $i$ 种建筑设备的回收率 第 $i$ 种建筑设备回收再加工的碳排放因子/(kgCO <sub>2</sub> e · 单位 <sup>-1</sup> )
A3	$Q_s = \sum_{i=1}^n CE_i \times e_i + D \times d \times G$	$Q_s$ $CE_i$ $e_i$ $D$ $d$ $G$	A3 阶段碳排放量/kgCO <sub>2</sub> e 消耗第 $i$ 种能源的碳排放因子/(kgCO <sub>2</sub> e · MJ <sup>-1</sup> ) 施工过程中第 $i$ 种能源的消耗量/MJ 施工过程中工人数量 施工总天数 工人单位工日碳排放量,根据参考文献[19]取值 7.03 kg
A4	$Q_{td} = P_m \times A - \sum_{i=1}^n P_i \times A_i$	$Q_{td}$ $P_m$ $A$ $P_i$ $A_i$	A4 阶段碳排放量/kgCO <sub>2</sub> e 基地原先的土地碳汇因子/(kgCO <sub>2</sub> e · m <sup>-2</sup> ) 基地总面积/m <sup>2</sup> 第 $i$ 种植栽类型的土地碳汇因子/(kgCO <sub>2</sub> e · m <sup>-2</sup> ) 第 $i$ 种植栽类型的面积/m <sup>2</sup>
B1	$Q_{rc} = \sum_{i=1}^n CE_i \times e_i + \sum_{j=1}^m CF_j \times f_j$	$Q_{rc}$ $CF_j$ $f_j$	B1 阶段碳排放量/kgCO <sub>2</sub> e 建筑使用过程中的水资源碳排放因子/(kgCO <sub>2</sub> e · t <sup>-1</sup> ) 使用过程水资源消耗量/t
B2	$Q_w = \sum_{i=1}^n n \times CW_{e_i} \times \alpha_i$	$Q_w$ $n$ $CW_{e_i}$ $\alpha_i$	B2 阶段碳排放量/kgCO <sub>2</sub> e 建筑使用寿命/a 第 $i$ 种建筑构件维修措施的碳排放因子/(kgCO <sub>2</sub> e · 次 <sup>-1</sup> ) 每年第 $i$ 种建筑构件维修措施的系数/(次 a <sup>-1</sup> )
C1	$Q_c = Q_s \times 90\%$	$Q_c$	C1 阶段碳排放量/kgCO <sub>2</sub> e
C2	$Q_{lc} = \sum_{j=1}^m L \times M_j \times CT_j$	$Q_{lc}$ $L$ $M_j$ $CT_j$	C2 阶段碳排放量/kgCO <sub>2</sub> e $L$ 为废弃物从基地到建筑垃圾处理场地运输距离/km 采用第 $j$ 种运输方式的废弃物质量/kg 第 $j$ 种运输方式的碳足迹因子/[kgCO <sub>2</sub> e · (km · t) <sup>-1</sup> ]

## 1.2 生命周期环境影响评价

环境影响评价是为了获得除碳排放以外农宅生命周期对环境造成的其他影响负荷。研究借助 LCA 评价软件 Gabi, 选取 ReCiPe 2016 Midpoint

(H)作为评价方法,具体环境影响评价指标见表 2,对农宅进行基于中点的环境影响量化分析并将不同指标特征进行标准化处理,实现同维度上的综合环境影响评价。

表2 环境影响评价指标  
Tab.2 Indices of environmental effect assessment

指标	定义	单位
AP	酸化潜力(acidification potential)	kg SO <sub>2</sub> eq
EP	富营养化潜力(eutrophication potential)	kg Phosphate-eq
ETOX	生态毒性(ecotoxicity recommended)	CTUe
FPER	细颗粒物形成(fine particulate matter formation)	kg PM2.5 eq
HTOX	人体毒性(human toxicity recommended)	kg 1,4-DB eq
IR	电离辐射(ionizing radiation)	kBq U235 eq
ODP	臭氧耗竭潜力(ozone depletion potential)	kg CFC 11 eq
POCP	光化学臭氧生成潜力(photochemical ozone creation potential)	kg NMVOC eq

## 2 案例研究

### 2.1 装配式草砖结构农宅概况

以北京大兴区某装配式草砖结构农宅为例,该

建筑占地面积约 163.9 m<sup>2</sup>,建筑面积 103.27 m<sup>2</sup>,其平面图见图 2,效果图和实景照片见图 3 和图 4。建筑层数为 1 层,主要采用的预制构件有草砖墙体模块,草砖屋顶模块,梁柱和门窗构件以及钢连接件。

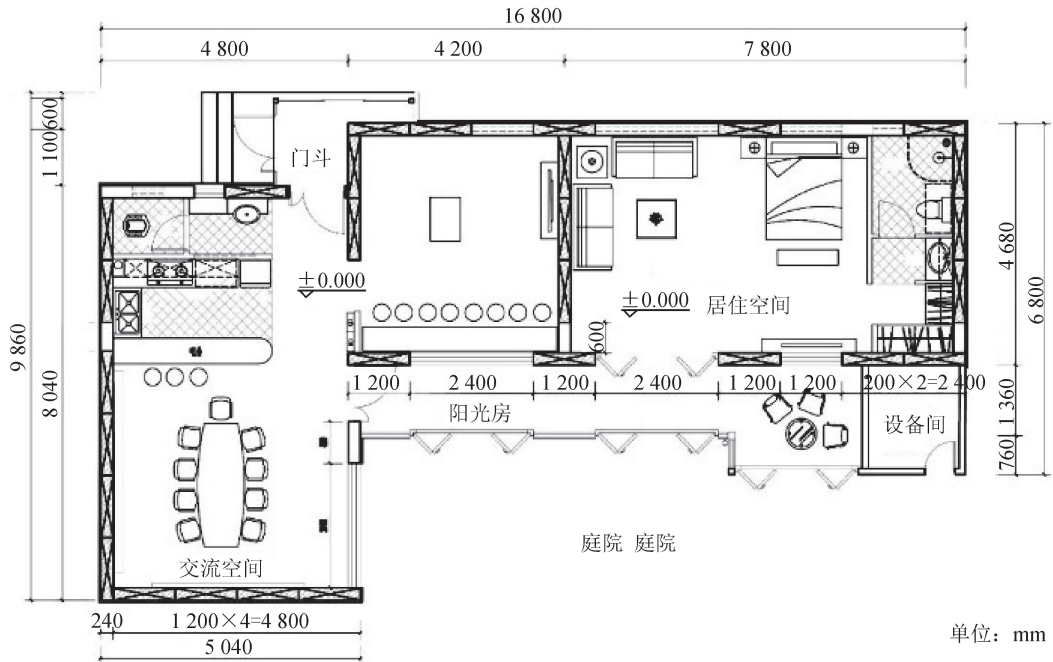


图2 装配式草砖结构农宅平面图

Fig.2 Plan of the prefabricated straw bale residence

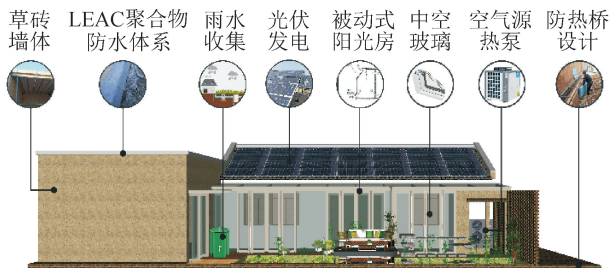


图3 装配式草砖结构农宅效果图

Fig.3 Effect drawing of the prefabricated straw bale residence



图4 装配式草砖结构农宅实景图

Fig.4 Photograph of the prefabricated straw bale residence

采用的主要绿色建筑技术如下。

1) 采用太阳能光伏发电系统,由微电网系统控制将多余的电量并入市政电网。

2) 建筑周围设置雨水收集系统装置,储存的水可供上方庭院水景使用,也可作为生活用水在建筑中使用。

3) 采用空气源热泵技术进行冬季供暖,并提供日常的生活热水。

## 2.2 普通农宅计算模型

根据对研究案例所在村落的调研结果,建立了普通农宅计算模型,其平面图和实景照片分别见图5和图6。普通农宅建筑面积 $88.92\text{ m}^2$ ,外围护结构材料为单层粘土砖,屋顶为普通双坡瓦屋面,木质横梁,地面为简单的水泥抹灰,层高为 $3.6\text{ m}$ ,建筑层数为1层。

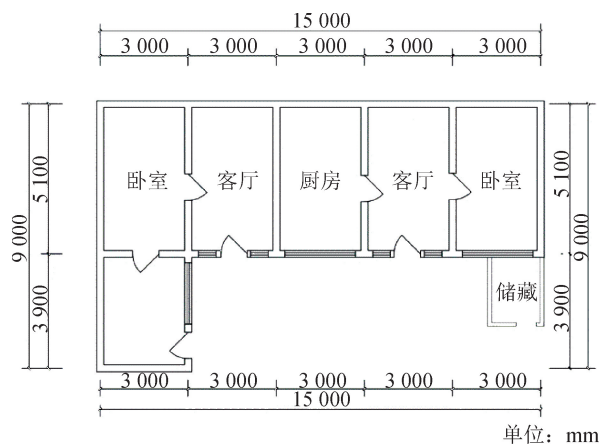


图5 普通农宅平面图

Fig. 5 Plan of the normal rural residence



图6 普通农宅实景图

Fig. 6 Photograph of the normal rural residence

## 2.3 初始参数

研究中两种农宅生命周期各阶段资源、能源消耗等数据来源以及主要处理方式见如下。

1) 装配式草砖结构农宅在物化阶段使用的建材类型及用量见表3,普通农宅在物化阶段使用的建材根据实地调研确定,建材类型及用量见表4。其中建材碳排放因子选取文献[15]、文献[20]中的研究结果,装配式草砖结构农宅所应用的节能设备在物化阶段产生的温室气体排放计算过程为如下。

表3 装配式草砖结构农宅建材类型及用量

Tab. 3 Type and consumption of construction materials for the prefabricated straw bale residence

装配式草砖结构农宅			
材料	碳排放因子/ ( $\text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{单位}^{-1}$ )	用量	单位
草砖	0.01	71.53	$\text{m}^3$
OSB板	1 090.00	0.37	$\text{m}^3$
木龙骨	139.00	3.92	$\text{m}^3$
钢连接件	907.00	0.08	t
钢带	907.00	0.05	t
XPS挤塑板	300.00	2.65	$\text{m}^3$
水泥砂浆	977.00	5.21	t
C15混凝土	297.00	6.92	$\text{m}^3$
防水卷材	2.38	151.87	$\text{m}^2$
铝合金中空玻璃窗	160.42	40.57	$\text{m}^2$
石膏板	193.00	21.59	$\text{m}^2$
防盗门	397.92	2.00	$\text{m}^2$
室内瓷砖	1 070.00	0.21	t
防火涂料	3 859.04	0.15	t
石灰	1 750.00	3.02	t

表4 普通农宅建材类型及用量

Tab. 4 Type and consumption of construction materials for the normal rural residence

普通农宅			
材料	碳排放因子/ ( $\text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{单位}^{-1}$ )	用量	单位
标准粘土砖	576.00	30.86	千块
混凝土	493.00	4.81	t
硅酸盐水泥	977.00	4.50	t
碎石	3.17	8.98	t
石灰	1 750.00	3.11	t
砂	2.41	23.98	t
塑钢单层玻璃窗	71.40	22.50	$\text{m}^2$
塑钢单层玻璃门	71.40	1.60	$\text{m}^2$
木材	139.00	0.45	$\text{m}^3$
饰面砖	19.50	11.00	$\text{m}^2$
陶土瓦	2.90	1 132.00	块
防水卷材	2.38	130.76	$\text{m}^2$
涂料	6 550.00	0.42	t
木塑板	1 330.00	1.05	$\text{m}^3$

a) 光伏发电系统。装配式草砖结构住宅光伏板设置面积为 $39.55\text{ m}^2$ ,从文献[21]可知,光伏组件生产阶段碳排放主要来自高纯多晶硅以及组件、硅片、电池片等的生产过程, $1\text{ m}^2$ 产生的碳排放共计 $160.86\text{ kgCO}_2\text{e}$ 。由此可计算出光伏发电设备系统产生的碳排放量。

b) 空气源热泵。空气源热泵由蒸发器、压缩机、冷凝器、膨胀阀、四通换向阀和风机等部件组成,主要组成材料是钢铁、铜材和铝材。装配式草砖结构农宅中安装功率 1.25 kW,总重量 51 kg 的空气源热泵,根据文献[22]的研究可知,热风机原材料组成及二次加工的生产 CO<sub>2</sub> 排放总共为 311.2 kgCO<sub>2</sub>e。

c) 循环水泵。水泵主要由电机、泵体和叶轮等部件组成,主要组成材料是钢材、铜材和铝材,根据文献[23]研究可得,功率为 0.37 kW 的水泵原材料生产、运输能耗和二次加工能耗产生的碳排放共计为 36.76 kgCO<sub>2</sub>e。

2) 装配式草砖结构农宅采用模块装配式建造方式,墙体、屋顶等主要建材均由工厂预制,因此施工阶段的碳排放量主要来自工人日常活动,每个工人每天产生的 CO<sub>2</sub> 按 7.03 kg 计<sup>[19]</sup>。普通农宅施工人数及施工能源消耗数据根据实地调研获得。

3) 装配式草砖结构农宅与普通农宅使用阶段设备用电及用水消耗分别根据实测数据以及实地调研数据确定。农宅冬季供暖负荷借助 DeST 能耗模拟软件获得,其中案例农宅围护结构热工参数见表 5,室内外设计温度、供暖季时长、房间换气次数以及影响建筑能耗的人行为相关参数均根据调研情况与规范要求设定。案例农宅全年累计供暖能耗见表 6,其中空气源热泵供暖平均 COP 取 2.5,普通农宅使用煤炭供暖的能耗按软件模拟获得的建筑全年累计热负荷计,燃煤每产热 1 MJ,排放 0.134 kgCO<sub>2</sub>e<sup>[20]</sup>。

表 5 案例农宅围护结构热工参数

Tab. 5 Thermal parameters for enclosure structure of the case residences

围护结构名称	装配式草砖结构农宅	普通农宅
外墙传热系数 $K/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	0.19	1.77
屋顶传热系数 $K/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	0.35	1.75
外窗传热系数 $K/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	2.40	5.20
外窗遮阳系数 $K/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	0.65	0.85

4) 假设 50 年生命周期内农宅需要维修更新的主要建筑构件为外窗,防水材料和保温材料,根据文献[24]的研究外窗、防水和保温材料使用寿命均为 25 年,生命周期内需要翻新的次数为 1 次,产生的碳排放量根据对应建筑构件物化阶段碳排放量的计算方法确定。

表 6 案例农宅全年累计供暖能耗

Tab. 6 Annual heating energy consumption of the case residences

指标	装配式草砖结构农宅	普通农宅
建筑供暖面积/m <sup>2</sup>	103.27	88.92
全年累计热负荷/kWh	3 026.56	8 952.35
全年累计供暖能耗/kWh	1 210.62 (电能)	8 952.35 (热能)

5) 由于物化阶段清单数据类型复杂,对应 Gabi 软件中数据库生态足迹缺失,且拆除阶段运输工具和材料回收对应的环境足迹不确定性较高<sup>[17]</sup>,因此对农宅进行环境指标量化过程只考虑使用阶段用电、用水及供暖等活动的影响。这一阶段涉及到的能源类型,Gabi 软件数据库现已有适用于中国地区的环境影响基础数据。

### 3 生命周期生态效益分析

#### 3.1 生命周期碳排放

根据碳排放计算模型,对案例农宅生命周期各阶段碳排放量进行计算,其中生命周期各子阶段及总计单位面积碳排放量对比见图 7。装配式草砖结构农宅生命周期及各子阶段碳排放量见表 7,普通农宅生命周期及各子阶段碳排放量见表 8。根据上述计算结果,两种类型的农宅各阶段碳排放量占比均为使用阶段最大、物化阶段次之、拆除阶段最小。这与其他学者研究结果保持一致,验证了案例研究碳排放计算结果的合理性和科学性。案例农宅与其他研究中建筑的生命周期单位面积碳排放量对比见图 8<sup>[2, 15, 17, 25-34]</sup>。

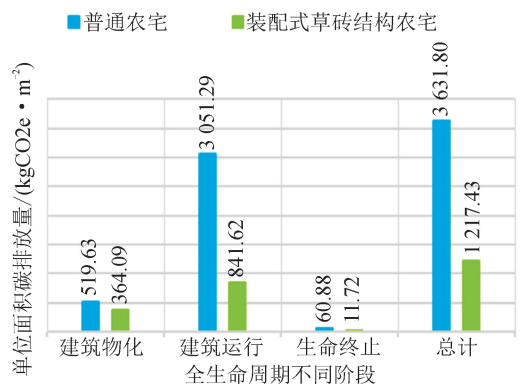


图 7 案例农宅生命周期及各子阶段单位面积碳排放量  
Fig. 7 Comparison of carbon emissions in life cycle and each sub stage of the case residences per unit area

表7 装配式草砖结构农宅生命周期及各子阶段碳排放量

Tab.7 Carbon emissions in life cycle and each sub stage of the prefabricated straw bale residence

阶段	物化阶段			使用阶段			拆除阶段	总计/kgCO <sub>2</sub> e
	建材生产运输	建筑设备生产	施工安装	土地利用	日常使用	维修更新		
碳排放量/kgCO <sub>2</sub> e	26 947.72	8 962.77	1 836.99	-147.60	84 985.1	1 929.10	1 210.40	125 724
单位面积碳排放量/(kgCO <sub>2</sub> e·m <sup>-2</sup> )	260.94	86.79	17.79	-1.43	822.94	18.68	11.72	1 217.43
总计/kgCO <sub>2</sub> e	37 599.89			86 914.16			1 210.40	125 724

表8 普通农宅生命周期及各子阶段碳排放量

Tab.8 Carbon emissions in life cycle and each sub stage of the normal rural residence

阶段	物化阶段		使用阶段		拆除阶段	总计/kgCO <sub>2</sub> e
	建材生产运输	施工安装	日常使用	维修更新		
碳排放量/kgCO <sub>2</sub> e	40 189.76	6 015.34	266 331	4 990.2	5 413.81	322 940
单位面积碳排放量/(kgCO <sub>2</sub> e·m <sup>-2</sup> )	451.98	67.65	2 995.17	56.12	60.88	3 631.8
总计/kgCO <sub>2</sub> e	46 205.10		271 320.87		5 413.81	322 940

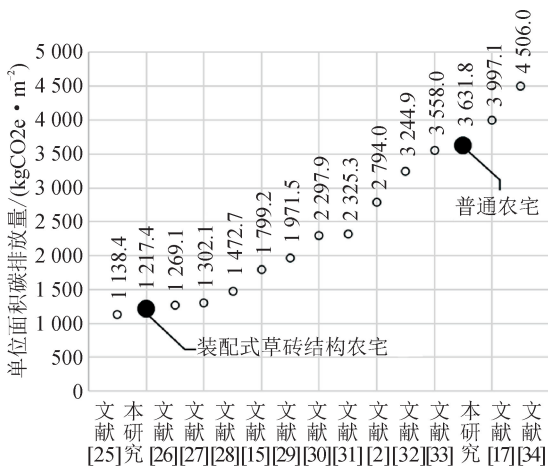


图8 案例农宅与相关研究中建筑生命周期单位面积碳排放量比较

Fig.8 Comparison of life-cycle carbon emissions per unit area between the case residences and related research

在50年生命周期内,装配式草砖结构农宅碳排放主要来源于使用阶段,占比69%,其中供暖能耗造成的碳排放最大;其次为物化阶段,占比30%,其主要来自于建材的生产运输阶段,占比71%以上。普通农宅生命周期碳排放也主要来源于使用阶段,占比63%,其中供暖能耗造成的碳排放也最大;其次为物化阶段,占比29%,建材的生产运输造成碳排放占物化阶段全部碳排放的89%以上。两类型农宅在建筑生命周期拆除阶段所产生的碳排放比例较小。

从生命周期碳排放计算结果可得,装配式草砖结构农宅单位面积碳排放量远低于普通农宅,仅为普通农宅的1/3,以草砖等生物质材料代替传统粘土砖作为主要建材,在物化阶段每平方米可以减碳

155.5 kgCO<sub>2</sub>e。此外,在农宅中增设光伏发电,空气源热泵等节能技术,能够明显降低建筑使用阶段的碳排放量,在满足室内舒适度标准的情况下,装配式草砖结构农宅50年共计比普通农宅减碳2 209.67 kgCO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>。在拆除阶段,装配式草砖结构农宅建材及设备回收利用率高于传统建材,因此在废弃物处置回收时产生的碳排放也会远远降低。相较普通农宅,装配式草砖结构农宅生命周期内共计可减少66.48%的碳排放量,其中在使用阶段减碳比例较大(72.42%),在物化阶段预计可减少29.93%的碳排放量。

### 3.2 子阶段碳排放

#### 3.2.1 建筑物化阶段

在物化阶段,装配式草砖结构农宅的碳排放量为364.09 kgCO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>,普通农宅为519.63 kgCO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>。根据图9和图10中装配式草砖结构农宅和普通农宅中建材加工运输碳排放占比可以看出,装配式草砖结构农宅在此阶段的主要碳排放源依旧是钢材、水泥、混凝土、石灰等主流建材,草砖作为主要材料,仅贡献了0.1%左右的碳排放。

表9为装配式草砖结构农宅因安装光伏发电、空气源热泵以及其他设备在物化阶段产生的碳排放,总计8 962.77 kgCO<sub>2</sub>e。普通农宅在物化阶段没有使用节能设备,因此在忽略此部分碳排放的情况下进行建材的碳足迹对比更加客观,装配式草砖结构农宅相比于普通农宅在建材生产运输阶段可以减碳42%。由此可以得出,在满足建筑稳定性和舒适度的基本要求下,使用秸秆草砖作为房屋的主要材料,可以很好地满足农村地区节能减排的要求。

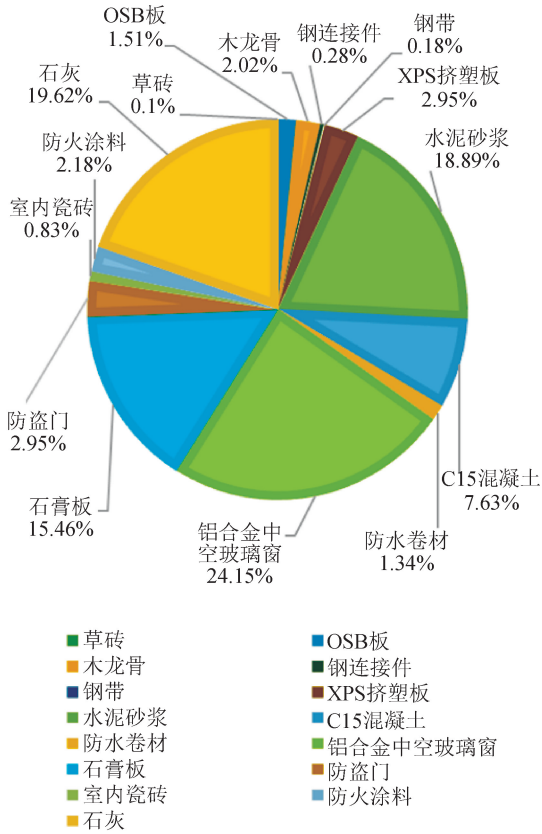


图9 装配式草砖结构农宅建材加工运输过程碳排放  
Fig.9 Carbon emissions caused by processing and transportation of construction materials for the prefabricated straw bale residence

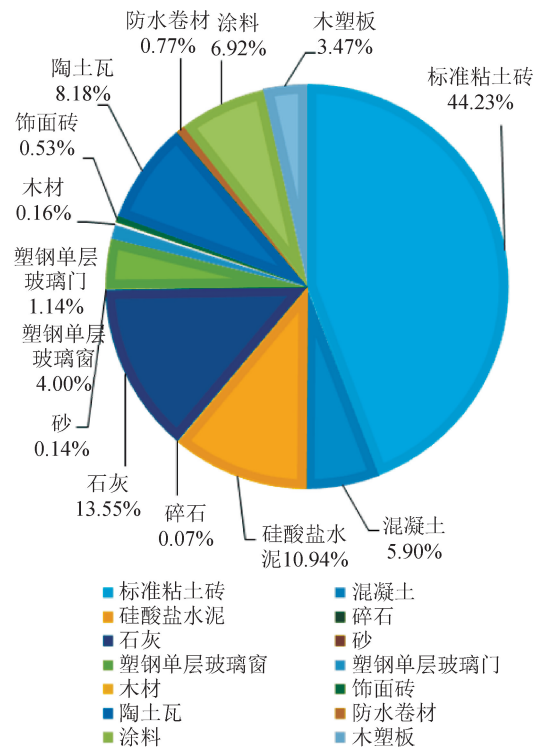


图10 普通农宅建材加工运输过程碳排放  
Fig.10 Carbon emissions caused by processing and transportation of construction materials for the normal rural residence

表9 装配式草砖结构农宅建筑设备生产碳排放量  
Tab.9 Carbon emissions caused by construction equipment of the prefabricated straw bale residence

设备类型	总碳排放量/ (kgCO <sub>2</sub> e)	单位面积碳排放量 /(kgCO <sub>2</sub> e·m <sup>-2</sup> )
太阳能光伏系统	6 362.01	61.61
空气源热泵	311.20	3.01
循环水泵	36.76	0.36
其他线路耗材等	2 252.80	21.81
总计	8 962.77	86.79

3.2.2 建筑使用阶段

根据调研得知,农村住宅建筑使用阶段的碳排放主要来源于:1)用电消耗,来自于电视、照明灯具、洗衣机、电磁炉、冰箱等日常家用电器,同时包括夏季空调消耗电能;2)用水消耗,这部分碳排放来源于上游自来水厂的水资源处理;3)冬季供暖,装配式草砖结构农宅使用空气源热泵以及普通农宅使用煤炭供暖造成的碳排放;4)建筑构配件维修更换,仅考虑建筑外部主要围护结构的维修与替换,50年内建筑主体结构墙体、基础、梁柱等在不影响功能的情况下,设计年限内均无需改造与更新,因此该阶段碳排放主要来自屋顶瓦片的更新、外墙的粉刷等。

装配式草砖结构农宅在使用阶段产生的碳排放量为841.62 kgCO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>,普通农宅为3 051.29 kgCO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>,根据图11可以看出,两种类型农宅在此阶段消耗能源所产生的碳排放占比最大的均为供暖消耗,其中装配式草砖结构农宅比普通农宅减少72.96%的碳排放量。

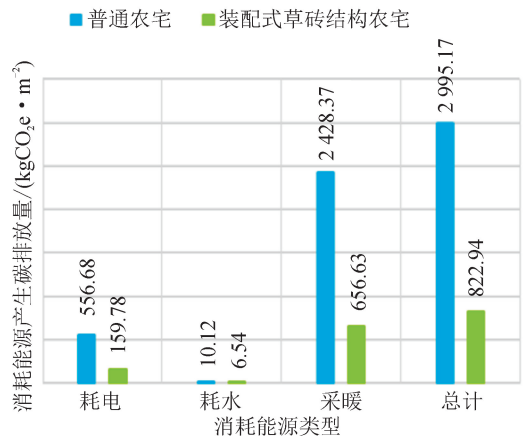


图11 案例农宅使用阶段能源消耗碳排放  
Fig.11 Carbon emissions caused by energy consumption of the case residences during operation phase



草砖墙体保温性好于普通粘土砖墙体,农宅冬季热负荷远低于普通农宅,此外空气源热泵消耗的电能大部分来自于光伏发电,从能源类型上看,也要比燃煤取暖更环保。从电能的消耗来看,装配式草砖结构农宅利用太阳能产生的电量可以满足建筑大部分的电力需求,仅有少部分依赖市政供电,在同样使用条件下,可以比普通住宅减少 71.3% 的电能消耗。

### 3.2.3 建筑拆除阶段

在建筑拆除阶段,装配式草砖结构农宅和普通农宅因拆除和废弃物运输带来的能源消耗相比于物化和使用阶段占比均较小,其中装配式草砖结构农宅在此阶段的碳排放量仅为生命周期碳总排放的 0.96%,普通农宅则为 1.68%。在不考虑材料回收利用的情况下,装配式草砖结构农宅在拆除阶段可比普通农宅减碳 80.75%。

### 3.3 环境影响评价

图 12 为装配式草砖农宅和普通农宅相关生态指标经过标准化的影响结果对比,可以看出两案例农宅影响最严重的指标均为人体毒性部分,酸化和光化学臭氧生成潜力、富营养化潜力指数和细颗粒物生成指数也较大,电离辐射和生态毒性较小,臭氧层消耗几乎可忽略不计。此外,普通农宅的产生的生态影响为装配式草砖农宅的 3 倍,产生的环境危害较严重。

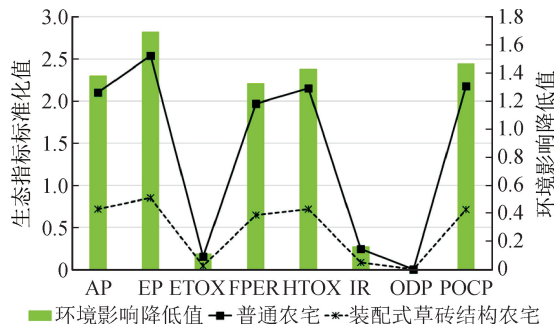


图 13 案例农宅用电消耗导致的环境影响  
Fig. 13 Environmental effect caused by water consumption of the case residences

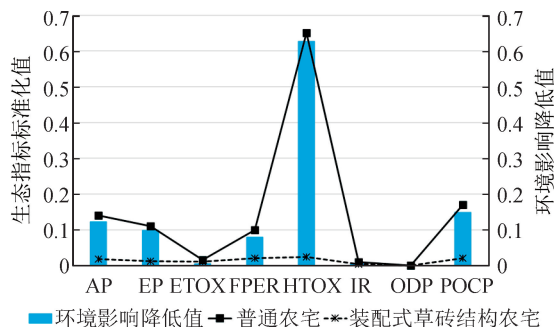


图 14 案例农宅用水消耗导致的环境影响  
Fig. 14 Environmental effect caused by power consumption of the case residences

## 4 结论

1) 在建筑物化阶段,装配式草砖结构农宅的碳排放量为  $364.09 \text{ kgCO}_2 \text{ e} \cdot \text{m}^{-2}$ ,在仅考虑建筑材料的情况下相比普通农宅可减碳 42%,其中墙体草砖仅贡献了 0.1% 的碳排放量;普通农宅此阶段碳排放量为  $519.63 \text{ kgCO}_2 \text{ e} \cdot \text{m}^{-2}$ ,主要墙体材料粘土砖碳排放贡献占 44%。

2) 在建筑使用阶段,装配式草砖结构农宅产生的碳排放量为  $841.62 \text{ kgCO}_2 \text{ e} \cdot \text{m}^{-2}$ ,而普通农宅为  $3051.29 \text{ kgCO}_2 \text{ e} \cdot \text{m}^{-2}$ ,共计减碳 72.96%。具体地,装配式草砖结构农宅冬季供暖碳排放可减少 64.3%,日常电力消耗减少 71.3%。

3) 在建筑拆除阶段,装配式草砖结构农宅和普通农宅产生的碳排放量分别为  $11.72 \text{ kgCO}_2 \text{ e} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $60.88 \text{ kgCO}_2 \text{ e} \cdot \text{m}^{-2}$ ,碳排放量均较小,仅占两案例农宅生命周期碳排放量的 0.96% 和 1.68%,因此农宅减碳重点应着眼于物化阶段和使用阶段。

4) 装配式草砖结构农宅产生的环境影响程度最严重的三项指标为富营养化潜力、人体毒性和酸化潜力,而普通农宅为人体毒性、富营养化潜力、光化学臭氧生成潜力。综合各项指标,装配式草砖结

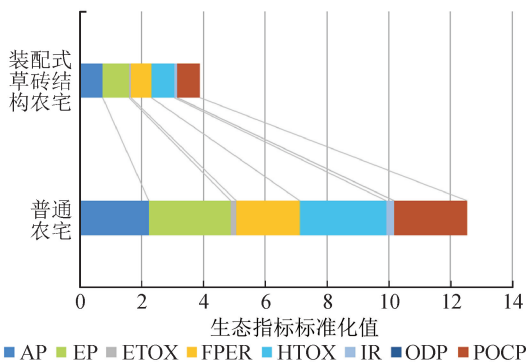


图 12 案例农宅使用阶段环境影响

Fig. 12 Comparison of environmental effect between the prefabricated straw bale residence and normal rural residence

通过 Gabi 软件对装配式草砖农宅和普通农宅具体能源消耗带来的污染进行对比,图 13 和图 14 分别为案例农宅使用阶段消耗电能和水资源的生态足迹量化结果。从中可以看出节能设计带来的环境效益,主要表现在农宅生命周期电能使用减少上,水资源消耗带来的生态影响整体较小。但综合各指标来看,装配式草砖农宅相比普通农宅明显体现出资源节约环境友好的特点。

构农宅产生的环境影响仅为普通农宅的 1/3, 其中在降低细颗粒物形成方面最显著, 可减少 73.4%。

5) 装配式草砖结构农宅生命周期内碳排放量为普通农宅的 33.52%, 同时其造成的综合环境影响仅为普通农宅的 30.99%, 具有显著的生态效益。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: synthesis report[R]// Environmental Policy Collection[M]. Geneva: IPCC, 2007.
- [2] 郭春梅, 刘清华, 李胜英. 基于绿色建筑评价体系的绿色建筑全生命周期碳排放核算模型构建与实例分析[J]. 绿色建筑, 2019, 11(5): 13-18.  
GUO Chunmei, LIU Qinghua, LI Shengying. Green building life cycle carbon emission accounting modelling and case analysis based on green building evaluation system[J]. Green Building, 2019, 11(5): 13-18.
- [3] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2021[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [4] 蔡伟光, 蔡彦鹏. 全国建筑碳排放计算方法研究与数据分析[J]. 建设管理研究, 2019(2): 61-76.  
CAI Weiguang, CAI Yanpeng. National construction carbon emission calculation method research and data analysis[J]. Construction Management Research, 2019(2): 61-76.
- [5] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2019[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [6] 徐旭东, 罗智星. 草砖民居室内环境实测与优化研究[J]. 住宅科技, 2019, 39(2): 58-61.  
XU Xudong, LUO Zhixing. Research on measurement and optimization of indoor environment of grass brick folk house[J]. Housing Science, 2019, 39(2): 58-61.
- [7] 赵建宁, 张贵龙, 杨殿林. 中国粮食作物秸秆焚烧释放碳量的估算[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 812-816.  
ZHAO Jianing, ZHANG Guilong, YANG Dianlin. Estimation of carbon emission from burning of grain crop residues in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(4): 812-816.
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部, 住房和城乡建设部. 促进绿色建材生产和应用行动方案[EB/OL]. (2015-08-31)[2021-05-29]. <http://www.scio.gov.cn/32344/32345/33969/35217/xgzc35223/Document/1492872/1492872.htm>.
- [9] 傅志前, 朱兰玺. 国外秸秆建筑的产生与发展研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(2): 33-36.  
FU Zhiqian, ZHU Lanxi. Research on the occurrence and development of foreign straw-bale buildings[J]. Industrial Construction, 2012, 42(2): 33-36.
- [10] BURATTI C, BELLOIN E, MERLI F, et al. An innovative multilayer wall composed of natural materials: experimental characterization of the thermal properties and comparison with other solutions[J]. Energy Procedia, 2018, 148: 892-899.
- [11] 杨青松, 徐学东. 玉米秸秆草砖住房建造技术及保温性能研究[J]. 新型建筑材料, 2015, 42(5): 61-63, 80.  
YANG Qingsong, XU Xuedong. Study on construction technology and heat-insulating property of corn straw-bale building [J]. New Building Materials, 2015, 42(5): 61-63, 80.
- [12] CORNARO C, V ZANELLA, ROBAZZA P, et al. An innovative straw bale wall package for sustainable buildings: experimental characterization, energy and environmental performance assessment[J]. Energy and Buildings, 2020, 208: 109636.
- [13] D'ALESSANDRO F, BIANCHI F, BALDINELLI G, et al. Straw bale constructions: laboratory, in field and numerical assessment of energy and environmental performance [J]. Journal of Building Engineering, 2017, 11: 56-68.
- [14] 刘崇, 谭令舸. 自承重式秸秆建筑的建造与节能研究[J]. 世界建筑, 2018(2): 98-101.  
LIU Chong, TAN Lingge. Construction technology and energy efficiency study of load-bearing straw bale building[J]. World Architecture, 2018(2): 98-101.
- [15] 徐旭东. 基于 Hybrid-LCA 模型的秸秆草砖建筑生命周期碳排放研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.  
XU Xudong. Study on life cycle carbon emission of straw bale buildings based on Hybrid-LCA mode[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [16] ASDRUBALI F, BALDASSARRI C, FTHENAKIS V. Life cycle analysis in the construction sector: guiding the optimization of conventional Italian buildings [J]. Energy and Buildings, 2013, 64: 73-89.
- [17] 张庭宁. 基于 LCA 的建筑装饰装修工程环境影响测度方法与应用研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.  
ZHANG Tingning. Characterizing the environmental implications from the decoration activities of buildings by using LCA method[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019.
- [18] 世界可持续发展工商理事会, 世界资源研究所. 温室气体核算体系: 企业核算与报告标准[M]. 修订版. 北京: 经济科学出版社, 2012.
- [19] 曹静, 沈志明, 王晓玉, 等. 混凝土装配式与现浇住宅建筑碳排放分析与研究[J]. 建设科技, 2020(3): 69-73.  
CAO Jing, SHENG Zhiming, WANG Xiaoyu, et al. Research on carbon emission of concrete prefabricated and cast-in-place residential buildings[J]. Construction Science and Technology, 2020(3): 69-73.

- [20] 罗智星. 建筑生命周期二氧化碳排放计算方法与减排策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.  
LUO Zhixing. Study on calculation method of building life cycle CO<sub>2</sub> emission and emission reduction strategies[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [21] 赵若楠,董莉,白璐,等. 光伏行业生命周期碳排放清单分析[J]. 中国环境科学,2020,40(6):2751-2757.  
ZHAO Ruonan, DONG Li, BAI Lu, et al. Inventory analysis on carbon emissions of photovoltaic industry [J]. China Environmental Science, 2020, 40 (6): 2751-2757.
- [22] 杨远程. 北京农宅冬季供暖碳排放及能源系统改善研究[D]. 北京:中国建筑科学研究院,2019.  
YANG Yuancheng. Heating carbon emission and system improvement for rural building of Beijing[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2019.
- [23] 任志勇. 基于 LCA 的建筑能源系统碳排放核算研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.  
REN Zhiyong. Research of building energy system carbon emissions accounting base on LCA[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [24] 张孝存. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.  
ZHANG Xiaocun. Research on the quantitative analysis of building carbon emissions and assessment methods for low-carbon buildings and structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [25] 李海峰. 上海地区住宅建筑全生命周期碳排放量计算研究[C]//第七届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集,2011:424-427.
- [26] 黄志甲,赵玲玲,张婷,等. 住宅建筑生命周期 CO<sub>2</sub> 排放的核算方法[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(增刊 2):103-105.  
HUANG Zhijia, ZHAO Lingling, ZHANG Ting, et al. The assessment method of Life-cycle CO<sub>2</sub> emission for residential buildings[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33 (S2): 103-105.
- [27] 张又升. 建筑物生命周期二氧化碳减量评估[D]. 台湾:成功大学,2002.  
ZHANG Yousheng. Assessment of carbon dioxide reduction in building life cycle[D]. Taiwan: National Cheng Kung University, 2002.
- [28] 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.  
GAO Yuanxue. Assessment methodology and empirical analysis of embodied carbon footprint of building construction[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [29] 熊宝玉. 住宅建筑全生命周期碳排放量测算研究[D]. 深圳:深圳大学,2015.  
XIONG Baoyu. Research on the measurement of carbon emissions in the whole life cycle of residential building [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015.
- [30] 张凯,李岳岩. 国内高层钢筋混凝土结构住宅建筑全生命周期碳排放对比分析[J]. 城市建筑,2020,17(25): 36-38.  
ZHANG Kai, LI Yueyan. Comparative analysis of carbon emission in the whole life cycle of high-rise reinforced concrete residential buildings in China[J]. Urbanism and Architecture, 2020, 17(25): 36-38.
- [31] 李金潞. 寒冷地区城市住宅全生命周期碳排放测算及减碳策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2019.  
LI Jinlu. Study on carbon emissions calculation and carbon reduction strategy of urban residential life cycle in cold areas [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [32] 周晓. 浙江省城市住宅生命周期 CO<sub>2</sub> 排放评价研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.  
ZHOU Xiao. Research of CO<sub>2</sub> emission of urban residential buildings in Zhejiang province based on life cycle assessment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [33] 彭渤. 绿色建筑全生命周期能耗及二氧化碳排放案例研究[D]. 北京:清华大学,2012.  
PENG Bo. Case study on life cycle energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions of green buildings[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [34] 杨晓静. 西部地区城镇太阳能住宅全生命周期碳排放研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.  
YANG Xiaojing. Study on carbon emission in the whole life cycle of solar residential buildings in western China[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.

(责任编辑 王绪迪)