

湘中地区农村住宅全生命周期碳排放分析与 低碳设计策略研究

王心怡, 李 丹, 喻紫文, 徐京景, 张锦宏, 徐 卉

湖南科技大学建筑与设计学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年4月15日; 录用日期: 2025年6月17日; 发布日期: 2025年6月27日

摘 要

本研究聚焦湘中地区农村住宅, 旨在深入剖析其在全生命周期内的碳排放特征及影响因素。通过广泛的数据收集和实地调研, 对建筑物化、运行维护及拆除清理三个阶段的碳排放进行了详尽测算。研究结果表明, 湘中地区农村住宅碳排放主要集中于建材生产和运行维护阶段, 且能源消耗模式和建材选择是关键的影响因素。针对不同阶段碳排放特征提出低碳设计策略, 包括优化住宅朝向以充分利用自然采光通风, 选用煤矸石空心砖等节能环保建材, 分类回收再利用建筑材料、推广太阳能、生物质能等可再生能源的应用以及加强住宅的耐久性设计等, 为实现湘中地区农村住宅的低碳可持续发展提供理论依据和实践指导。

关键词

碳排放, 农村住宅, 湘中地区, 全生命周期评价, 减碳策略

Analysis of Life Cycle Carbon Emission and Study on Low-Carbon Design Strategy of Rural Residences in Central Hunan Province

Xinyi Wang, Dan Li, Ziwen Yu, Jingjing Xu, Jinhong Zhang, Hui Xu

School of Architecture and Design, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Apr. 15th, 2025; accepted: Jun. 17th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

Abstract

This study focuses on rural residential buildings in central Hunan Province, aiming to conduct an in-depth analysis of their carbon emission characteristics and influencing factors throughout the life cycle. Through extensive data collection and on-site investigations, a comprehensive calculation of carbon emissions was carried out for the three stages: building materialization (construction), operation

文章引用: 王心怡, 李丹, 喻紫文, 徐京景, 张锦宏, 徐卉. 湘中地区农村住宅全生命周期碳排放分析与低碳设计策略研究[J]. 可持续发展, 2025, 15(6): 125-139. DOI: 10.12677/sd.2025.156171

and maintenance, and demolition and clearance. The research findings indicate that carbon emissions from rural residential buildings in central Hunan are primarily concentrated in the building material production and operation and maintenance stages. Energy consumption patterns and the selection of building materials are identified as the key influencing factors. In response to the distinct carbon emission profiles of each phase, this research proposes low-carbon design strategies, including: optimizing the orientation of residential buildings to maximize natural lighting and ventilation, selecting energy-efficient and environmentally friendly building materials, such as coal gangue hollow bricks, recycling and reutilization of construction materials, promoting the application of renewable energy sources, notably solar energy and biomass energy and strengthening the durability design of residential buildings. These strategies aim to provide a theoretical basis and practical guidance for achieving low-carbon and sustainable development of rural residential buildings in central Hunan Province.

Keywords

Carbon Emission, Rural Residences, Central Hunan Province, Life Cycle Assessment, Carbon Reduction Strategies

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

人类当今面临气候变暖的重大挑战,采取积极措施应对该挑战已成为国际共识。中国作为全球最大的发展中国家,面临经济发展和碳减排的双重压力[1]。建筑业作为国民经济的支柱产业,在“双碳”目标的实现过程中占据关键地位。2022 年建筑运行与建筑业建造的碳排放总量为 51.3 亿 tCO₂,占全国能源相关碳排放的 48.3%,其中村镇居住建筑的能耗和碳排放占比为 59% [2]。中共中央、国务院要求在城乡建设中大力发展节能低碳建筑,而目前湖南农村住宅的能耗水平较低,尚未充分释放减排潜力[3]。湘中地区(娄底市、邵阳市、益阳市)存在碳排放经济贡献与空间发展格局不协调等问题,是湖南省低碳转型规划中的重点攻坚区域[4]。因此,本研究针对湘中地区农宅开展全生命周期碳排放的实地调研和量化分析,探索具有地域适应性的低碳设计策略,为乡村振兴战略提供有关绿色建筑的参考方案,助力实现建筑领域碳中和目标。

1.2. 研究现状

1) 全生命周期碳排放评估标准

我国建筑碳排放标准体系经历了从规范化到精细化的发展历程。2014 年《建筑碳排放计量标准》(CECS 374:2014)根据中国建筑业碳排放的特点采用建筑业全生命周期的碳足迹跟踪技术,提出实测数据法与 BIM 模型法双路径计算框架,奠定了建筑碳计量技术规范基础[5]。2019 年《建筑碳排放计算标准 GB/T 51366-2019》进一步规范了建筑碳排放的计算,为行业低碳转型提供了关键技术支撑[6]。

国内外关于建筑碳排放计算与核算的标准体系和应用研究已经比较全面,为碳排放测算的应用和推广提供了条件[7],能实现建筑全生命周期碳排放的实时动态监测计算[8]与阶段精细化分析[9]。目前,许多研究细化了建筑碳排放计算边界及排放清单,得出计算过程中的关键影响因素与相关减碳策略[10],并逐渐完善碳排放数据平台[11]。

2) 建筑物化阶段碳排放研究

建筑信息模型 BIM 可结合现代夯土建筑的具体施工方式构建物化阶段碳排放计算模型[12]。相关研究通过梳理该阶段碳排放研究边界,可确定主要碳排放来源,并建立工程定额碳排放测算模型,不仅简化了物化阶段碳排放计算步骤,还具有实现建筑工程绿色施工与可持续发展的重要实践价值[13]。

3) 运行维护阶段碳排放研究

该阶段的碳排放计算主要包括生活热水、暖通空调、设备、照明、电梯以及可再生能源系统在建筑使用期间的综合碳排放量[14]。BIM 技术可实时监测各类能源使用情况并及时调节,提高建筑物管理效率,评估建筑物运营情况[15]。

4) 拆除清理阶段碳排放研究

全生命周期评价方法可被用于界定建筑废弃物拆除阶段碳排放的计算边界[16],将建筑拆除处理阶段进一步细分为建筑拆除、建筑废弃物运输和废弃物处置等工序,为建筑的节能减排提供参考[17]。

综上,现有研究已建立较完备的方法体系,但需根据湘中地区农宅的地域特色和具体建造方式优化计算参数,提升量化精度,以支撑低碳建筑技术推广。

1.3. 研究目标

本研究聚焦于湘中地区农村住宅的低碳转型,基于全生命周期评价理论,通过选取恰当的碳排放因子并计算,揭示农村住宅在建材生产运输、施工建造、使用阶段能源消耗及建筑废弃物处置等环节的碳排放量,帮助解决农村地区存在的重视程度不够、研究范围不全等问题,针对性地提出相应的减碳策略,寻求减少湘中地区农村建筑碳排放方法,并将其推广应用于湖南其他地区。

1.4. 研究路线

本文的研究框架如下图 1 所示。

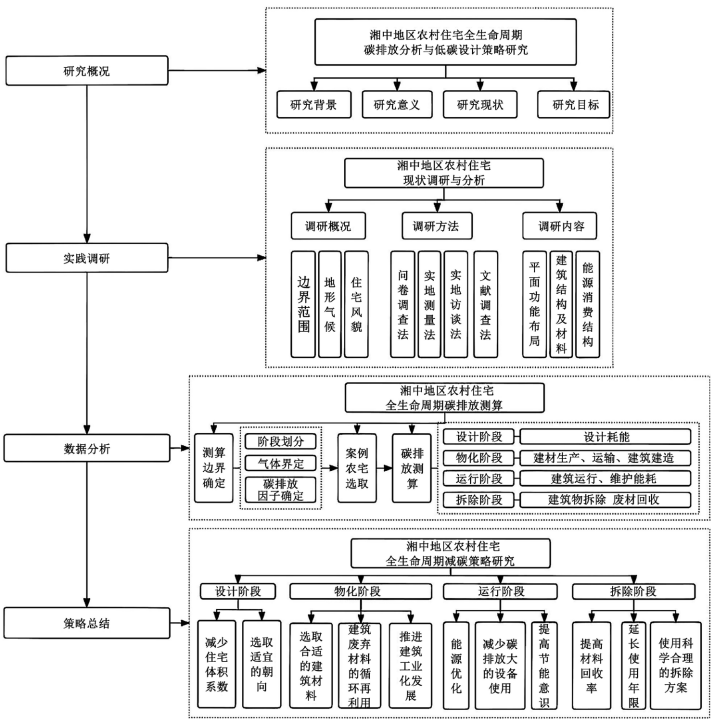


Figure 1. Framework of the study
图 1. 研究框架

2. 实践调研

2.1. 调研概况

湘中地区地处湖南省中部偏东，包含娄底、邵阳、益阳三个市，属于亚热带季风湿润气候区，雨量充沛，春温多变，夏秋季节炎热，冬季严寒难耐[18]。基于气候适应性需求，当地农宅需兼顾冬季保温蓄热与夏季自然通风双重功能。本研究在综述相关文献的基础上，遵循地域代表性、样本多样性、调研可行性三重原则，选取娄底市新化县与邵阳市城步县、洞口县作为典型抽样单元，最终确定 6 个行政村作为调研点，完成 78 栋典型农宅的全生命周期碳排放数据采集(表 1)，样本覆盖砖混结构、砖木结构、土木结构等主要建筑类型，确保研究结论的普适性与推广价值。

Table 1. Statistics from field surveys

表 1. 实地调研统计数据

区域	城步县	洞口县	新化县	合计
调研村落(个)	2	2	2	6
调研数量(户)	25	21	32	78
农宅测绘(栋)	6	2	5	13

2.2. 调研方法

- 1) 问卷调查法：通过线上、线下发放问卷，了解农宅的基本情况。再筛选有效数据，确保结果的有效性和准确性，为后续研究提供数据支持。
- 2) 实地测量法：对已选村落进行实地调研，调查湘中地区农村住宅的建筑建造方式及结构形式，选取具有代表性的住宅进行测绘，以便后续进行碳排放的计算。
- 3) 实地访谈法：访谈当地居民和乡镇干部，了解当地政策方针、经济水平、人居环境及发展趋势等情况，询问日常生活习惯、个人居住体验和能源消费结构，总结现有的问题。
- 4) 文献调查法：通过查找政府文件、地方政策和法规，了解湘中地区农村住宅特色以及政策导向，并总结其中的难点，为减碳策略的制定做准备。同时查阅湘中地区农宅、全生命周期评价理论和碳排放计算方法相关文献，全面了解研究现状，对相关内容和数据进行完善补充。

2.3. 调研内容

2.3.1. 平面功能布局

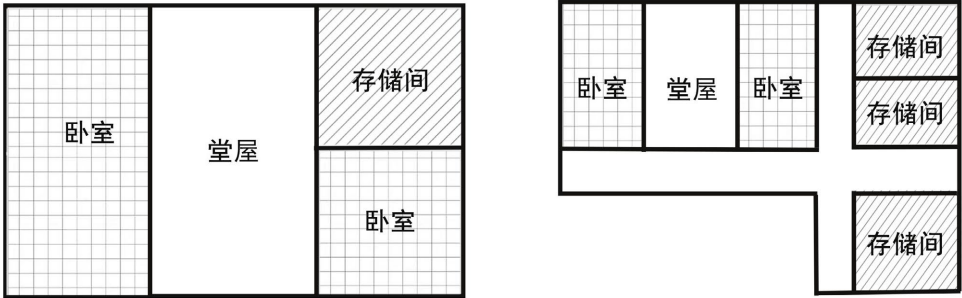


Figure 2. House layout typology

图 2. 房屋平面类型

湘中地区的传统建筑较为高大，讲究南向、通风、遮阳以及保温防潮的效果。在平面布局上(图 2)，经典的正堂式建筑以“一”字形平面为原型，以堂屋为空间核心，两侧对称延伸出正房与厢房，构成严谨的三开间格局。当家族人口增长或地形条件允许时，建筑便向“L”形演化：在主体一侧加建附属用房，形成半围合的院落空间，既拓展了生活场域，又保持了空间的向心力[18]。这种“中心扩散式”布局原则，使得农宅在方寸之间实现了功能分区与家族凝聚的平衡。

2.3.2. 建筑结构及材料

湘中民居的主体结构普遍采用墙承重体系，其构造特点在于将檩条、楼板直接架设于墙体之上，由内外墙共同承担楼面与屋面的荷载(图 3)。该体系的承重墙体主要呈现两种形式：一种是青砖砌筑墙体；另一种是生土夯筑的土坯墙[18]。外墙基本为 240 mm 厚实心黏土砖，墙壁外侧用水泥砂浆抹面，内侧则用石灰砂浆抹面，保温隔热效果差，使得用于降温 and 取暖的能耗大大增加。



(a) 湖南省娄底市新化县楼下村(生土夯筑的土坯墙、瓦作屋面)



(b) 湖南省娄底市新化县正龙古村(木板隔墙、瓦作屋面)



(c) 湖南省邵阳市城步县罗家水村(青砖砌筑墙体、瓦作屋面)

Figure 3. Research site map
图 3. 调研现场图

在地域适应性方面，受复杂山地条件制约，其建筑朝向多顺应山势走向灵活布局，对日照采光、空气流通等要求相对宽松；传统民居注重建筑材料的优化组合，普遍采用砖石基础、木构框架与瓦作屋面相结合的建造方式，通过砖、木、石三种材料的协同运用，不仅形成了具有地域特色的建筑形态，更发展出成熟的建造技术体系。

2.3.3. 能源消费结构

经调查分析可知，湘中地区农户的能源消耗除满足日常照明需求外，主要集中于冬季取暖、夏季降温以及日常热水供应等关键方面[3]。农户的冬季取暖设备主要以低能效的小型取暖器为主，存在较大的安全隐患；虽然空调的拥有率最高，但农户倾向于采用自然通风 + 电风扇组合的低成本降温策略；日常使用的热水设备有电热水器、太阳能热水器(大多使用电辅热太阳能热水器)、燃气热水器(包括天然气热水器、液化气热水器)、空气能热水器共 4 种，其中电热水器最受欢迎。当前农村能源设备选择呈现“便利性优先”特征，忽视建筑本体性能与气候适应性，出现低效设备引发高能耗与高排放问题。

3. 数据分析

3.1. 建筑全生命周期的定义和计算方法

根据农村住宅的特点和建筑全生命周期的概念，本研究按照住宅建造的时间顺序，将建筑全生命周期划分为四个阶段：建筑设计阶段、建筑物化阶段(包括建筑材料的生产加工、运输和建筑的施工建造过程)、运行维护阶段、拆除清理阶段(包括建筑物的拆除和废旧建材的回收处理)，并将每个阶段产生的温室气体用二氧化碳当量(kgCO₂e)进行计量。

3.1.1. 建筑设计阶段碳排放测算

建筑设计阶段产生的碳排放主要来自于设计过程中设备运行、人员活动以及设计决策对后续阶段碳排放的间接影响。在湘中地区，农宅的设计大多凭借当地施工队的经验，并没有请专门的设计师进行设计，因此这一阶段的碳排放量比较少，不再另作计算。但是在设计阶段中规定的朝向、窗墙比、体形系数等要素对后续碳排放量计算有很大的影响，所以在下表 2 进行单独划分[19]。

Table 2. Coefficient of the shape of the house and the window-to-wall ratio
表 2. 住宅体形系数及窗墙比

体形系数		0.87
窗墙比	朝向	
	东	0.08
	南	0.20
	西	0.08
	北	0.12

团队成员根据实地调研结果完成测绘图纸，并在 BIM 软件中构建模型(图 4)。案例农宅总建筑面积为 273 m²，首层建筑面积为 143 m²，二层建筑面积为 130 m²。



Figure 4. 3D model
图 4. 三维模型

3.1.2. 建筑物化阶段碳排放测算

建筑物化阶段的碳排放量为建筑材料生产、运输以及施工三个阶段的碳排放量之和。

$$C_2 = C_{sc} + C_{ys} + C_{jz} \tag{1}$$

式中, C_2 为建筑物化阶段的碳排放量; C_{sc} 为建筑材料生产阶段碳排放量(kgCO₂e); C_{ys} 为运输阶段碳排放量(kgCO₂e); C_{je} 为施工建造阶段碳排放量(kgCO₂e) [19]。

1) 建材生产阶段计算公式:

$$C_{sc} = \sum_{i=1}^n M_i F_i \tag{2}$$

式中, n 为建材种类数; M_i 为第 i 种建筑材料消耗量(单位数量); F_i 为第 i 种建筑材料的碳排放因子(kgCO₂e/单位数量)。

结合各种材料的碳排放因子即可得出生产阶段中建筑材料的碳排放量, 见下表 3。

Table 3. Carbon emissions from building materials
表 3. 建筑材料碳排放量

材料名称	碳排放因子	单位	数量	碳排放(kgCO ₂ e)
地面砖	15.96	kgCO ₂ e/m ²	110.67	1766.293
屋面瓦(330 mm × 420 mm)	120.7	kgCO ₂ e/千片	0.99	119.493
实心粘土砖(240 mm × 115 mm × 53 mm)	482.6	kgCO ₂ e/千块	30.422	14681.6
钢筋	2340	kgCO ₂ e/t	3.95	9243
木材	146.3	kgCO ₂ e/m ³	2.79	408.177
平板玻璃	2280	kgCO ₂ e/m ³	0.08	182.4
碎石	11	kgCO ₂ e/t	55.335	608.685
砂	12	kgCO ₂ e/t	85.036	1020.432
木门	878	kgCO ₂ e/m ³	0.66	579.48
塑钢窗	121	kgCO ₂ e/m ²	17.84	2158.64
自来水	0.168	kgCO ₂ e/t	74.613	12.534984
水泥	538	kgCO ₂ e/t	4.31	2318.78
防水卷材	2.38	kgCO ₂ e/m ²	128.01	304.6638
总计				31518.39

2) 建材运输阶段计算公式:

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i D_i F_i \tag{3}$$

式中, M_i 为第 i 种的建筑材料消耗量(t); D_i 为第 i 种的建材平均运输距离(km); F_i 为第 i 种的建材单位重量单位运输距离的碳排放因子[kgCO₂e/(t·km)] [19]。

结合建材运输的碳排放因子即可得出建材运输阶段的碳排放量, 见下表 4。

Table 4. Carbon emissions from the transportation process
表 4. 运输过程碳排放量

运输方式	碳排放因子	数量(t)	距离(km)	碳排放量(kgCO ₂ e)
轻型柴油货车运输(载重 2t)	0.286	1	30	8.58
中型柴油货车运输(载重 8t)	0.179	27.5	30	147.68
重型柴油货车运输(载重 46t)	0.057	331.5	30	567.21
总计				723.46

3) 建筑建造阶段计算公式:

$$C_{jz} = \sum_{i=1}^n E_i EF_i \tag{4}$$

式中, E_i 为第 i 种使用能源的消耗量; EF_i 为第 i 种使用能源的碳排放因子(kgCO₂/kWh 或 kgCO₂/kg) [19]。
结合建造机械的碳排放因子即可得到建筑建造阶段的碳排放量, 见下表 5。综上可得出案例农宅建筑
物化阶段的碳排放量为 32885.21 kgCO₂e。

Table 5. Carbon emissions from the use of machinery
表 5. 机械使用碳排放量

机械名称	规格型号	能源用量	
		电(kWh)	柴油(kg)
双锥反转出料混凝土搅拌机	出料容量 500 L	231.13	-
灰浆搅拌机	拌筒容量 200 L	90.40	-
混凝土抹平机	功率 5.5 kW	12.67	-
钢筋调直机	直径 14 mm	6.19	-
钢筋切断机	直径 40 mm	14.35	-
钢筋弯曲机	直径 40 mm	13.28	-
木工圆锯机	直径 500 mm	13.77	-
木工平刨床	刨削宽度 500 mm	6.03	-
木工三面压刨床	刨削宽度 400 mm	23.48	-
木工榫机	榫头长度 160 mm	8.26	-
木工打眼机	榫槽宽度 16 mm	1.73	-
木工裁口机	宽度 mm400	4.55	-
交流弧焊机	容量 32 kVA	123.74	-
对焊机	容量 75 kVA	30.41	-
电焊条烘干箱	容量 45 cm × 35 cm × 45 cm	0.86	-
汽车式起重机	提升质量 5 t	-	14.89
载重汽车	提升质量 6 t	-	26.12
机动翻斗车	提升质量 1 t	-	5.88
能源总量		580.85	46.89
碳排放因子		0.8587 kgCO ₂ /kWh	3.0839 kgCO ₂ /kg
碳排放总量(kgCO ₂)		498.76	144.6
总计		643.36 kgCO ₂ e	

3.1.3. 运行维护阶段碳排放测算

该阶段计算公式为:

$$C_3 = C_{jx} + C_{wh} \tag{5}$$

其中, C_3 为运行维护阶段碳排放量(kgCO₂e); C_{jx} 为运行阶段能源消耗碳排放量; C_{wh} 为维护阶段碳排

放量。

1) 运行阶段的碳排放计算

运行阶段碳排放主要包括维持建筑本体环境舒适所需能源和人在建筑内生活所需能源，本体建筑运行阶段的碳排放量计算公式为：

$$C_{yx} = \sum_{i=1}^n (E_i EF_i) \quad (6)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - ER_{i,j}) \quad (7)$$

式中， E_i 为第 i 类能源消耗量； EF_i 为第 i 类能源碳排放因子； $E_{i,j}$ 为 j 类系统的第 i 类能源消耗量， $ER_{i,j}$ 为 j 类系统消耗的第 i 类可再生能源量为消耗能源，如电、天然气、柴薪等； i, j 为建筑系统，如家用电器、炊事、热水等[19]。计算后可得运行阶段能源碳排放量，见下表 6。

Table 6. Carbon emissions from energy during the operational phase
表 6. 运行阶段能源碳排放量

能源	年用量	使用年限(年)	碳排放因子	碳排放量(kgCO ₂)
电	1500 kWh	50	0.8587 kgCO ₂ /kWh	64402.5
柴薪	3000 kg	50	18.4 kgCO ₂ /kg	2760000
总计			2824402.5 kgCO ₂ e	

2) 维护阶段的碳排放计算

维护阶段碳排放量主要来源于建材和能源消耗。但农村住户往往都是自己购买材料对住宅进行维护和修缮，参考熊宝玉[20]的研究，将住宅维护阶段的碳排放量按建筑物化阶段的 20%进行估算。

$$C_{wh} = 20\% \times C_2 \quad (8)$$

计算得案例农宅维护阶段的碳排放量为 6577.042 kgCO₂e。

3.1.4. 拆除清理阶段碳排放测算

拆除清理阶段碳排放主要包括建筑拆除中的能源消耗以及废弃物处理过程中运输所产生的碳排放量，计算公式为：

$$C_4 = C_{cc} + C_{cy} \quad (9)$$

式中， C_4 为拆除清理阶段碳排放量(kgCO₂e)； C_{cc} 为建筑拆除过程中能源消耗产生的碳排放量(kgCO₂e)； C_{cy} 为废弃物处理过程中运输所产生的碳排放量(kgCO₂e) [19]。

1) 拆除过程中的碳排放量计算

$$C_{cc} = \sum_{i=1}^n E_i EF_i \quad (10)$$

式中， E_i 为第 i 种主要能源的消耗量； EF_i 为第 i 种主要能源的碳排放因子(kgCO₂/kWh 或 kgCO₂/kg) [19]。

但根据调研情况，拆除过程的数据难以统计。因此，参考建设阶段的能源消耗，得出的结论是建设工程的能源消耗约占建筑本体建造过程的 10%，即

$$C_{cc} = 10\% \times C_{jz} \quad (11)$$

2) 废弃物运输的碳排放量计算

$$C_{cy} = \sum_{i=1}^n (M_i D_i F_i) \quad (12)$$

其中, M_i 为第 i 种主要建材的消耗量(t); D_i 为第 i 种建材的平均运输距离(km); F_i 为第 i 种建材的运输方式下, 单位重量运输距离的碳排放因子[$\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{t}\cdot\text{km})$] [19]。

可得案例农宅在拆除过程和废弃物运输的碳排放量分别为 $64.3 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 和 $204.7 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

3.1.5. 全生命周期碳排放测算

建筑碳排放总量可按以下公式进行计算:

$$C_{LC} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (13)$$

其中, C_{LC} 为建筑碳排放总量(kgCO_2e) [19]。

为了方便碳排放量进行对比, 本文以单位建筑面积碳排放量为指标进行分析, 可按以下公式计算:

$$C_A = \frac{C_{LC}}{A} \quad (14)$$

其中, C_A 为单位建筑面积碳排放量($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$); A 为建筑面积(m^2) [19]。

经上述全生命周期评估(LCA)测算, 可得案例农宅碳排放总量为 $2864133.75 \text{ kgCO}_2\text{e}$, 其单位建筑面积碳排放量为 $10502.76 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$, 见下表 7。

Table 7. Carbon emissions at each stage of the case study farmhouse

表 7. 案例农宅各阶段碳排放量

各阶段	各子阶段	碳排放量(kgCO_2e)	单位面积碳排放量($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$)
建筑设计阶段	-	0	0
建筑物化阶段	建材生产	31518.39	115.45
	建材运输	723.46	2.65
	建筑建造	643.36	2.36
	总计	32885.21	120.46
运行维护阶段	运行阶段	2824402.5	10345.80
	维护阶段	6577.042	24.09
	总计	2830979.542	10369.89
拆除清理阶段	拆除过程	64.3	0.24
	废弃物运输	204.7	0.75
	总计	269	0.99
总计		2864133.75	10502.76

4. 碳排放影响因素分析

通过数据分析可知, 建筑物化阶段的碳排放主要来源于建筑材料的加工生产、建筑设备的运行能源消耗以及建造材料与设备的运输; 建筑维护阶段的碳排放主要来源于建筑日常运行能源消耗(供暖、照明、空调和电力使用等方面)和建筑维护活动(维修材料的生产以及维修设备的运行); 建筑拆除阶段的碳排放主要来源于拆除设备运行和建筑废弃物及拆除设备运输活动。三个阶段的碳排放可以被归纳为两项: 材料加工与开采时的碳排放以及能源消耗产生的碳排放, 包括设备材料运输以及户主的日常使用。通过这

一分类，可更清晰地了解建筑全生命周期内碳排放的来源，为制定减排策略提供科学依据。

5. 低碳设计策略

5.1. 建筑设计阶段

1) 减少住宅体积系数

体形系数即住宅与大气接触面积和体积的比值，通常与采光通风、建筑造型相关。按节能标准，夏热冬冷地区的低层农村住宅的体形系数不应超过 0.55 [21]。在湘中地区，通过调整建筑一字形地面形状可以有效减少住宅体积系数。具体而言，保持面宽不变而增大进深时，采暖和供冷能耗随之减少，进而降低碳排放。

2) 选取适宜的朝向

住宅的朝向设计受风向、日照等自然因素制约，对建筑全生命周期(尤其是运行阶段)的能耗与碳排放影响显著。湘中地区冬季暖气供应产生了大量的碳排放。冬季主导风向为西北风，寒冷气流直接冲击建筑外墙，导致热量通过门窗缝隙、围护结构快速散失。因此，在设计农宅朝向时应考虑坐北朝南，且在东西立面少开门窗以阻挡热量散失、抵抗冷空气侵略，进而减少供暖设备的使用。研究表明，夏季西向开窗在日中至日落所吸收的热量为南向开窗同时时间的 18 倍[21]。因此，通过南向开窗以及窗墙比优化可以有效地减少能源消耗，从而降低建筑运行阶段碳排放强度。

5.2. 建筑物化阶段

前期数据分析显示，建材生产过程所产生的碳排放量占据建筑物化阶段总碳排放量的大部分。各类建筑材料中，水泥和实心粘土砖占比突出(图 5)。因此，如何有效降低建筑材料本身所产生的碳排放量，已成为减少建筑物化阶段碳排放量的关键着力点。

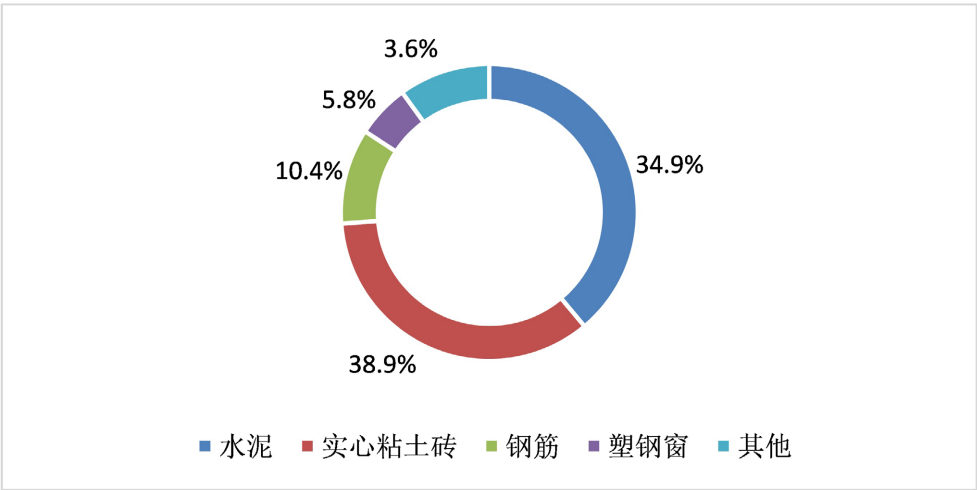


Figure 5. Proportion of carbon emissions from case study farmhouse building materials
图 5. 案例农宅各建筑材料的碳排放量占比

1) 选取合适的建筑材料

当前，湘中地区农宅外墙多采用实心粘土砖砌筑加混凝土抹灰结构，其中混凝土主要起到粘结与装饰的作用，碳排放核心来源为砌体实心粘土砖。相较于同等规格的空心粘土砖和粘土多孔砖，每生产 1000 块实心粘土砖将导致全生命周期碳排放量增加 64.6 kgCO₂，且热工性能差。单栋农宅(外墙面积约 300 m²)

的外墙材料若改为空心粘土砖,可在建筑全生命周期减少碳排放 20.6 t(较实心砖减排约 30%),减碳效果明显[19]。另有轻质复合墙板、新型植物纤维建材等节能墙体材料以及 Low-E 窗户等门窗类材料可降低碳排放和能耗。

2) 建筑废弃材料的循环再利用

建筑建造过程中产生的一些废弃材料可进行二次加工转化。例如,废弃的塑料可以再加工成塑料木材,用于室内装饰或建筑结构;旧玻璃经熔融可再制造成新的玻璃制品;废石材木材可制成室外休息桌椅以及室内家具等。既能延长材料的使用寿命,又能减少废弃物的量以及降低碳排放。

3) 推进建筑工业化发展和智能建造

推进建筑工业化,即以现代工业化生产模式代替传统建筑行业的一些手工作业,可显著提高工作效率,减少高危作业,降低碳排放。装配式建造作为工业化代表,具备绿色、低能耗特点。相较于传统现浇湿作业,装配式建筑能有效减少建造过程中的建筑垃圾,同时实现构件的标准化与通用化,与被动式建筑结合可以提高建筑的能效性[22]。另有智能建造技术通过应用信息数字化设计和制造技术,以及自动化和机器人技术来实现智能化、信息化建造,可更好地规划、管理绿色建筑项目,提升能源利用率,进一步推动绿色建筑的发展[23]。

5.3. 建筑维护运行阶段

1) 减少碳排放量大的设备使用

湘中地区碳排放量大的设备有冬季采暖器“火箱”,其功率多在 500 W~1000 W 之间。在建筑维护阶段,可以通过更新农宅的保温材料从而减少此类设备的使用。有研究指出,煤矸石空心砖可代替传统农宅的红砖作为墙体自身材料。这种材料的导热系数小,保温性能强,属于墙体自保温材料,满足该地区住宅冬季保温要求[21]。

2) 能源优化

能源优化指使用清洁能源代替传统能源,例如太阳能、风能、生物能等。湘中地区气候具有降水丰富、光照充足、雨热同期的特点,其夏季平均气温在 29℃左右且紫外线强。因此,可以发展太阳能资源。太阳能作为清洁能源碳排放几乎为零,比传统化石燃料能源在运行过程中通常能减少 90%以上的碳排放。户用沼气在农村地区有着良好的条件和发展前景,能够为农村居民提供可持续能源,低碳效益好。生物质能源与太阳能耦合可节约成本,提高农村低碳投资[24]。

3) 提高节能意识

用户日常行为模式对建筑维护阶段碳排放具有显著影响。经过访谈得知,在农村中仍存在屋内无人时照明设备持续运行、空调使用过度等资源浪费行为。可开展多样化的节能宣传活动、增强居民的节能意识,促使其在日常生活场景中主动践行节能措施,以实现建筑维护阶段碳排放的有效削减。

5.4. 建筑拆除阶段

在建筑全生命周期中,拆除阶段碳排放占比虽相对较低,但因其对材料处置方式及拆除技术的敏感性,可能对建筑周围环境产生较大的影响(如建筑垃圾围城、粉尘污染等),因此应该从以下方面完成减碳处理:

1) 延长使用年限

我国建筑平均设计寿命虽为 50 年,然而由于现实因素的影响,绝大多数建筑的寿命并不能达 50 年。在建筑使用年限之外其他条件均不变的情况下,当建筑寿命从 50 年延长至 70 年时,建筑年单位面积碳排放量可降低 4 kgCO₂e,降幅达 12.5% [19]。

2) 提高材料回收率

大部分发达国家已基本形成成熟高效的建筑垃圾资源化利用体系,建筑垃圾再生利用率高,而我国尚不足 10%,仅在个别城市进行了建筑垃圾再生利用试点[25]。回收并资源化利用砖混建筑垃圾能有效解决天然砂石资源短缺问题和减轻建筑垃圾堆填危害。砖混再生材料可应用于再生砂浆、再生砌块和对土/固化土性能改良等方面,有助于资源节约和环境协调[26]。

3) 使用科学合理的拆除方案

通过制定科学合理的建筑拆除方案,可实现“拆除-运输-处置”全链条碳减排。开发拆除工程碳排放测算模型,将拆除时段、运输距离、设备能耗等关键参数纳入动态优化算法,生成最优拆除时序图。同时,积极推行“日间拆除+夜间清运”模式,利用交通低谷期进行建筑垃圾运输,减少怠速等待造成的燃油浪费。在设备选用方面,逐步淘汰高能耗、高排放的燃油破拆设备,推广电动液压剪、氢能源破碎机等新装备,使单机能耗降低 40%~60%。此外,采用“分栋拆除+即拆即清”工艺,减少建筑垃圾临时堆放造成的二次污染与碳排放。

致 谢

本研究的顺利完成,得益于多方支持与协助。首先,衷心感谢我们的导师李丹老师。她亦师亦友,给予悉心的指导和宝贵的建议。老师严谨治学的态度与追求至善的科研精神,成为鞭策我们在学术道路上持续精进的動力。同时,本研究凝结着整个课题组成员的智慧与汗水。我们群策群力,攻坚克难。正是这种团结协作、锐意进取的团队精神,为研究的顺利推进提供了坚实保障。

参考文献

- [1] 杜祥琬. 我国实现“双碳”目标面临的现实挑战与对策建议[J]. 人民论坛·学术前沿, 2025(2): 13-19.
- [2] 蔡伟光, 于艳辉, 刘源. 中国城乡建设领域碳排放研究报告(2024 年) [J]. 建筑, 2025(2): 56-63.
- [3] 周梅, 吴兴应, 郑羽彤, 等. 湖南地区农村住宅能耗现状与节能措施探讨[J]. 绿色建筑, 2024, 16(4): 42-45.
- [4] 周宸帆, 谢水波. 湖南省国土空间碳排放分区特征与优化策略[J]. 地理科学研究, 2023, 12(2): 200-210.
- [5] 中国建筑设计研究院. CECS 374:2014 建筑碳排放计量标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51366-2019 建筑碳排放计算标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [7] 孙德宇, 徐伟, 高雨识, 等. 建筑碳排放计算与核算标准体系研究[J/OL]. 暖通空调: 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2832.TU.20250423.1406.002.html>, 2025-05-04.
- [8] 路振伟, 袁帅, 阎俏, 等. 基于全生命周期评价和能耗采集系统的建筑碳排放计算云平台的设计与实现[J]. 建筑科学, 2024, 40(6): 17-25.
- [9] Huang, Z., Zhou, H., Miao, Z., Tang, H., Lin, B. and Zhuang, W. (2024) Life-Cycle Carbon Emissions (LCCE) of Buildings: Implications, Calculations, and Reductions. *Engineering*, **35**, 115-139. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.08.019>
- [10] 王小炜. 建筑生命周期碳排放计算过程中的关键影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [11] 欧晓星, 李德智, 吴刚. 基于多专业协同设计的建筑碳排放活动数据模型构建[J]. 建筑结构, 2024, 54(24): 130-135.
- [12] 万丽, 肖旭, 史靖源, 等. 西南农村地区现代夯土住宅物化阶段碳排放研究[J]. 西部人居环境学刊, 2024, 39(3): 123-128.
- [13] 贾怡红, 高天, 崔凯丽, 等. 建筑物化阶段碳排放量测算方法与应用技术研究[J/OL]. 建筑科学: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1962.TU.20250324.1115.002.html>, 2025-05-04.
- [14] 胡长明, 付晨曦, 杨新宇, 等. 超低能耗居住建筑全生命周期碳排放量与经济效益研究[J]. 中国市政工程, 2024(6): 106-110+165.
- [15] 李志信, 王瑶, 陈永忠, 等. 基于文献计量学的 BIM 建筑全生命周期减碳应用[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版): 1-11. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2025.26.030>, 2025-05-04.

-
- [16] 孟庆成, 胡垒, 李明健, 等. 建筑废弃物拆除阶段碳排放及碳补偿分析[J]. 环境工程, 2023, 41(7): 45-52.
- [17] 李强, 诸纪萍, 茅建平, 等. 建筑拆除处理阶段碳排放模型与测算研究[J]. 建设科技, 2023(24): 62-64.
- [18] 曾德锐. 乡村振兴背景下湘中民居风貌更新设计研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- [19] 刘智勇. 重庆农宅全生命周期碳排放测算及减碳策略研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [20] 熊宝玉. 住宅建筑全生命周期碳排放量测算研究[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- [21] 汪涟涟. 以建筑减碳为目标的长株潭地区新农村住宅设计策略研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [22] 邓晓雪. 夏热冬冷地区装配式被动式建筑节能设计策略研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2024.
- [23] 钟凌宇, 陈朋, 王霄翔, 等. 基于“双碳”目标的湖南省首栋近零能耗建筑项目实践[J]. 绿色建筑, 2024, 16(3): 108-111.
- [24] 王芳琳, 敖仪斌. 中国农村绿色低碳住宅研究进展[J]. 科技导报, 2025, 43(6): 29-38.
- [25] 张一伟, 王章琼, 石钊, 等. 国内外建筑垃圾资源化利用现状及对策分析[J]. 山西建筑, 2022, 48(16): 173-176.
- [26] 焦杨, 方祥位, 申春妮, 等. 砖混建筑垃圾资源化再生利用研究进展[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20250414.1008.002.html>, 2025-05-04.