

装配式建筑生命周期碳足迹评价研究 ——以陕西省某住宅建筑为例*

张艳敏^{1,2} 郭曦倩^{1,3} 周佳洁^{1,2} 白礼彪^{1,2}

(1. 长安大学绿色工程与可持续发展研究中心, 陕西 西安 710064;

2. 长安大学经济与管理学院, 陕西 西安 710064;

3. 长安大学运输工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为明晰装配式建筑生命周期碳足迹及其关键来源, 构建装配式建筑生命周期碳足迹评价模型, 并将其应用于实际工程案例。在探究装配式建筑减排潜力的基础上, 从生命周期阶段、建设与使用活动两个层面分析装配式建筑生命周期碳足迹分布特征, 探讨使用寿命对装配式建筑生命周期碳足迹的影响。研究结果表明: 由取暖、制冷、照明等活动组成的运营维护阶段是装配式建筑生命周期碳足迹的主要来源; 随着使用寿命的增加, 装配式建筑年碳足迹先降低后增加。该研究结果可为装配式建筑生命周期碳足迹评估及低碳管理提供理论支撑。

关键词: 装配式建筑; 生命周期评价; 碳足迹; 分布特征

0 引言

为解决当前温室气体过度排放造成的气候变暖问题^[1], 我国力争在 2030 年前实现碳达峰、在 2060 年前实现碳中和。在此背景下, 减少二氧化碳等温室气体排放成为各行业发展的基本准则。建筑业作为国民经济的支柱产业, 建造阶段碳排放占全国碳排放总量的 29.2%。若考虑到建筑运行和其他过程中的能源消耗, 建筑业全过程碳排放占比将超过 50%^[2]。因此, 节能减排成为建筑业发展的必然趋势。

装配式建筑具有节能、利废、环境污染少等优点, 是建筑业实现绿色转型的重要技术路径。在此背景下, 研究装配式建筑生命周期碳足迹并明确其关键来源, 有助于提升装配式建筑绿色低碳管理水平, 对推动建筑业节能减排具有重要意义。

相比传统现浇建筑, 装配式建筑建造阶段分为构件工厂生产、运输、现场组装三个环节^[3], 其碳排放问题受到了学者们的广泛关注。Ding 等^[4]基于 BIM 技术和碳排放系数法, 构建了装配式住宅物化阶段碳足迹核算模型。Hao 等^[5]设计了一种基于 BIM 技术的方法, 用以测量装配式建筑项目物化阶段碳排放。李萌萌等^[6]通过碳排放系数法建立了装配式建筑物化阶段碳排放量计算模型, 并利用结构方程模型分析其影响因素。谢婉君等^[7]将碳排放系数法和工程量清单相结合, 计算装配式建筑施工阶段碳排放量。上述学者们的研究表明, 建筑材料生产阶段在整个物化阶段碳排放量占比最高, 达到 90%。部分学者也关注了装配式建筑运营阶段碳排放问题。郑晓云等^[8]基于能源类型角度, 构建装配式建筑建造、使用、废弃三个阶段的碳排放量计算模型。

*基金项目: 高端外国专家引进计划项目“‘双碳’目标下的建设工程项目群协同管理模式及其优化研究”(G2022171004L); 陕西省青年创新团队项目“低碳导向下的建设工程项目组合协同进化机理与效益研究”(21JP009); 陕西省社会科学基金项目“常态化疫情防控背景下陕西建设工程产业联动与协同发展策略研究”(2022R027); 中央高校基本科研业务费专项资金项目“突发事件下面向公众参与的基础设施建设工程项目群风险传播路径及应急决策研究”(300102233602)。

Tavares 等^[9]分析了不同气候类型下装配式建筑从建设到使用阶段的综合环境影响。Luo 等^[10]基于生命周期评估方法，计算了不同地区和结构的装配式建筑生命周期碳排放量。以上研究聚焦于装配式建筑不同阶段，通过构建碳排放计算模型评估其环境影响，但缺乏对装配式建筑生命周期中碳足迹分布特征的研究。基于此，本文构建装配式建筑生命周期碳足迹评价模型，并结合实际工程案例，在探究装配式建筑减排潜力的基础上，分析其生命周期碳足迹分布特征和关键来源，旨在为装配式建筑参与主体制定节能降碳策略提供参考。

1 装配式建筑生命周期碳足迹评价模型构建

1.1 明确系统边界

1.1.1 定义时间范围

本文旨在探究装配式建筑生命周期碳足迹分布特征，故将其时间范围定义为从建筑材料生产阶段到装配式建筑物拆除阶段。结合预制施工技术特点，装配式建筑物化阶段可分为 5 个环节，包括建筑材料生产、建筑材料运输、预制构件生产、预制构件运输和现场施工。通常，物化阶段为 1~2 年，运营维护阶段为 30~50 年。当装配式建筑失去原有使用功能时，应予以拆除。

术特点，装配式建筑物化阶段可分为 5 个环节，包括建筑材料生产、建筑材料运输、预制构件生产、预制构件运输和现场施工。通常，物化阶段为 1~2 年，运营维护阶段为 30~50 年。当装配式建筑失去原有使用功能时，应予以拆除。

1.1.2 定义活动范围

根据上述时间范围，本文将装配式建筑生命周期碳足迹活动范围定义为与装配式建筑建造、使用和消耗资源或能源有关的活动。具体包括：生产加工过程中原材料的使用和机械设备的能耗；预制构件在生产、养护等工艺过程中机械设备的电、油、煤消耗；建筑材料和预制构件运输至使用点（预制构件厂、施工现场），运输车辆使用的汽油、柴油等其他能源；在现场施工阶段，起重机和交流弧焊机等机械设备在预制构件安装和现浇建筑施工过程中的能耗；照明、取暖、制冷、电梯和用水等运营活动以及设施设备翻新、替换等维护活动的能耗；拆除机械、拆除物运输与处置产生的汽油、柴油消耗。

综上所述，明确装配式建筑生命周期碳足迹评价边界，如图 1 所示。

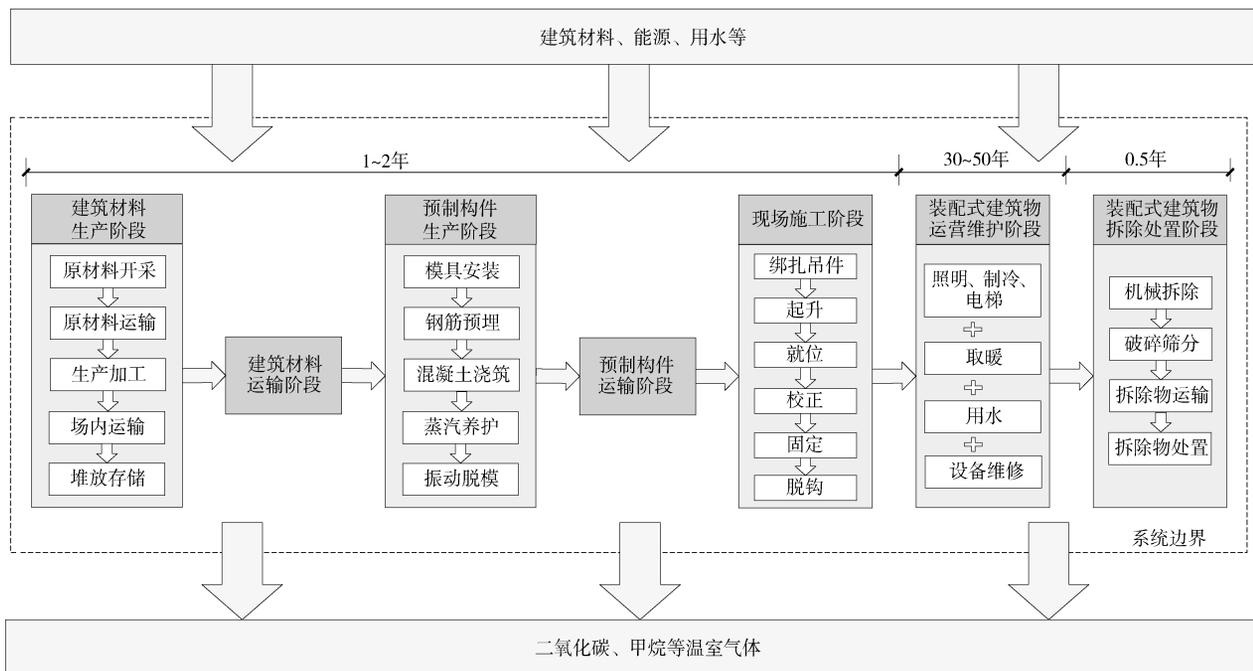


图 1 装配式建筑生命周期碳足迹评价边界

1.2 模型计算公式

根据上述系统边界定义,将装配式建筑生命周期碳足迹分为6个阶段:建筑材料生产、预制构件生产、建筑材料与预制构件运输、现场施工、运营维护和拆除处置。计算装配式建筑生命周期碳足迹,公式如下

$$C_{total} = C_{mat} + C_{pcp} + C_{trans} + C_{const} + C_u + C_e \quad (1)$$

式中, C_{total} 为装配式建筑生命周期碳足迹; C_{mat} 、 C_{pcp} 、 C_{trans} 、 C_{const} 、 C_u 、 C_e 分别为建筑材料生产、预制构件生产、建筑材料与预制构件运输、现场施工、运营维护和拆除处置的碳足迹。

1.2.1 建筑材料生产阶段

预制工程和现浇工程的建筑材料碳足迹共同构成装配式建筑建筑材料生产阶段碳足迹,计算公式见式(2)。其中,预制工程建筑材料碳足迹计算方法见式(3),现浇工程建筑材料碳足迹计算方法见式(4)

$$C_{mat} = C_{pc} + C_{on} \quad (2)$$

$$C_{pc} = \sum_{i=1} Q_{i-pc} \times (1 + a_{i-mpc}) \times (1 + a_{i-trans}) \times (1 + a_{i-instl}) \times F_i \quad (3)$$

$$C_{on} = \sum_{i=1} Q_{i-on} \times (1 + a_i) \times F_i \quad (4)$$

式中, C_{pc} 为预制工程建筑材料碳足迹; C_{on} 为现浇工程建筑材料碳足迹; Q_{i-pc} 为预制工程第 i 种建筑材料消耗量; Q_{i-on} 为现浇工程第 i 种建筑材料消耗量; a_{i-mpc} 、 $a_{i-trans}$ 、 $a_{i-instl}$ 分别为预制构件生产、运输、安装过程中第 i 种建筑材料损耗率; a_i 为第 i 种建筑材料损耗率; F_i 为第 i 种建筑材料碳足迹因子。

1.2.2 预制构件生产阶段

预制构件生产阶段碳足迹应根据预制构件加工生产和蒸汽养护过程中的能源消耗和对应的能源碳足迹因子进行计算,公式如下

$$C_{pc} = \sum_{i=1} Q_{i-energy} \times F_{energy} \quad (5)$$

式中, $Q_{i-energy}$ 为预制构件生产和养护过程中第 i 种能源用量; F_{energy} 为相应的能源碳足迹因子。

1.2.3 建筑材料和预制构件运输阶段

建筑材料和预制构件运输阶段碳足迹由运输车辆能耗产生,其关键参数为:建筑材料或预制

构件质量(体积)、车辆核定载重、运输距离等。此外,运输车辆从预制构件厂或施工现场返回时,一般为空载运输,空载状态下环境负荷是满载的0.67倍。在空载情况下,运输阶段碳足迹计算公式如下

$$C_{trans} = \sum_{i=1} \sum_{v=1} \left(\frac{Q_i}{V_{v-i}} \right) \times F_v \times D_i \times (1 + \beta) \quad (6)$$

式中, Q_i 为第 i 种建筑材料或预制构件的质量(体积); V_{v-i} 为第 i 种建筑材料或预制构件采用 v 汽车的核定载重; F_v 为 v 汽车单位运输距离碳足迹因子; D_i 为第 i 种建筑材料或预制构件从原产地运输至使用点的距离; β 为空载系数。

1.2.4 现场施工阶段

装配式建筑现场施工阶段碳足迹来自预制构件安装和现浇建筑施工过程中的机械设备能耗、生活和办公用电,计算公式如下

$$C_{const} = \sum_{i=1} (Q_{i-mach} \times F_{i-mach}) + (Q_{e-ofc} + Q_{e-ljfc}) \times F_e \quad (7)$$

式中, Q_{i-mach} 为第 i 种施工机械设备台班; F_{i-mach} 为第 i 种施工机械设备的碳足迹因子; Q_{e-ofc} 、 Q_{e-ljfc} 为工作人员办公和生活的耗电量; F_e 为电力碳足迹因子。

1.2.5 运营维护阶段

装配式建筑运营维护阶段碳足迹分为两个部分:一是建筑基础设备和外围护结构修缮改造产生的碳足迹;二是建筑电梯、取暖、用水、照明和制冷等运营活动消耗电力、煤炭等能源产生的碳足迹,计算公式如下

$$C_u = C_{maint} + C_{op} \quad (8)$$

式中, C_{maint} 、 C_{op} 分别为装配式建筑维护、运营活动的碳足迹。

$$C_{maint} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{B_L}{M_L} \right) \times F_i \quad (9)$$

式中, B_L 为装配式建筑设计使用年限; M_L 为第 i 种建筑材料或基础设备的设计使用年限; $\frac{B_L}{M_L}$ 为建筑材料或设备的翻新、替换次数,需向上取整。

$$C_{op} = \sum_{i=1}^{30/50} (C_{elevator} + C_{heating} + C_{water} + C_{lighting} + C_{cooling}) \quad (10)$$

式中, $C_{elevator}$ 、 $C_{heating}$ 、 C_{water} 、 $C_{lighting}$ 、 $C_{cooling}$ 为装配式建筑电梯、取暖、用水、照明和制冷的碳足迹。

$$C_{t-elevator} = \left(\frac{K_1 \times K_2 \times K_3 \times H \times F \times P}{3600V} + E_{standby} \right) \times F_e \times Q_{elevator} \quad (11)$$

式中, K_1 为驱动系统系数; K_2 为平均运行距离系数; K_3 为轿内平均载荷系数; H 为最大运行距离; F 为年启动次数; P 为电梯的额定功率; V 为额定速度; $E_{standby}$ 为 1 年内的待机总能耗; $Q_{elevator}$ 为电梯个数。

$$C_{heating} = \frac{24 \times Z \times Q_H}{H_c \times \eta_1 \times \eta_2} \times A_{c-bldg} \times F_c \quad (12)$$

式中, Z 为供暖天数; Q_H 为建筑物耗热量指标; H_c 为标准煤热值; η_1 为供热管网传输效率; η_2 为锅炉运行效率; A_{c-bldg} 为供热面积; F_c 为煤炭的碳足迹因子。

$$C_{water} = Q_{w/p} \times Q_{p/h} \times Q_h \times D \times F_w \quad (13)$$

式中, $Q_{w/p}$ 为人均日生活用水量; $Q_{p/h}$ 为每户人口数; Q_h 为户数; D 为天数; F_w 为水的碳足迹因子。

照明和制冷碳足迹分别为其用电量乘以电力碳足迹因子。设备老化、设备升级、环境污染、居民收入等会影响照明和制冷的能耗。因此, 还应考虑上述因素引起的碳足迹变化, 计算公式如下

$$C_{t-lighting/cooling} = Q_{1-lighting/cooling} \times (1 \pm A_{t-lighting/cooling}) \times F_e \quad (14)$$

式中, $Q_{1-lighting/cooling}$ 为首年照明、制冷系统的耗电量; $A_{t-lighting/cooling}$ 为第 t 年照明、制冷活动的调整因子。调整因子是指设备功能老化、设备升级、环境污染、居民收入等因素使居民设备使用时间、使用强度发生变化而造成电力消耗量变化的程度, 取值见表 1^[11]。

表 1 照明、制冷活动调整因子取值

取值	照明活动		制冷活动	
	2020—2030 年	2030—2070 年	2020—2030 年	2030—2070 年
使用时长	—	—	0.016	0.014
使用强度	0.020	0.014	0.009	0.008

1.2.6 拆除处置阶段

装配式建筑拆除处置阶段碳足迹与建筑物拆除机械设备台班、拆除物运输相关, 计算公式如下

$$C_e = C_{dem} + C_{trans} \quad (15)$$

$$C_{dem} = \sum_{i=1} Q'_{i-mach} \times F'_{i-mach} \quad (16)$$

$$C_{trans} = \sum_{v=1} \frac{Q_{i'}}{V_{v-i'}} \times F_v \times D_{i'} \times (1 + \beta) \quad (17)$$

式中, C_{dem} 为装配式建筑拆除过程中机械设备的碳足迹; C_{trans} 为建筑拆除物运输的碳足迹; Q'_{i-mach} 为第 i 种型号拆除机械设备台班; F'_{i-mach} 为第 i 种拆除机械设备的碳足迹因子; $Q_{i'}$ 为第 i' 种建筑拆除物的质量 (体积); $V_{v-i'}$ 为第 i' 种建筑拆除物运输时采用 v 型号汽车的核定载重量; $D_{i'}$ 为第 i' 种建筑拆除物从建筑物使用点运输至废物处理厂的距离。

综上所述, 装配式建筑生命周期碳足迹受各阶段建设与使用活动的能耗、相应的碳足迹因子和使用寿命的影响。其中, 碳足迹因子是指消耗单位质量物质 (原材料、能源等) 产生的温室气体量, 一般通过实验测定。因此, 本研究以明确装配式建筑碳减排潜力为基础, 重点从生命周期阶段、建设和使用活动两个层面分析装配式建筑生命周期碳足迹的分布特征和关键来源, 同时探讨使用寿命对装配式建筑碳足迹的影响。

2 实证分析

2.1 项目概况

《国家统计年鉴》相关数据显示, 近两年, 住宅新开工面积占全国房屋新开工面积的 73%, 且随着城镇化进程加快和住房需求的提升, 住宅建筑由多层建筑向高层建筑发展。因此, 本文选取具有代表性的陕西省某住宅建筑为研究对象。该建筑总建筑面积为 25 237.19m², 地上 33 层、地下 1 层; 结构体系为钢筋混凝土剪力墙结构; 2 层以上采用预制技术, 预制构件主要为预制叠合板, 预制部分体积为 3800m³。

2.2 碳足迹计算与分析

首先, 通过 BIM 技术计算该建筑的建筑材料

消耗量,结合工程定额确定施工机械台班;其次,依据调研数据确定该建筑的建筑材料和预制构件运输方式及路线,采用 Dest-h 能耗模拟软件进行该建筑照明、制冷系统负荷计算;最后,参考高鑫等^[12]和刘胜男^[13]相关研究中建筑材料碳足迹因子、施工机械设备碳足迹因子、运输工具碳足迹因子和能源碳足迹因子取值,结合上文公式得到该建筑生命周期碳足迹计算结果。

2.2.1 传统建筑与装配式建筑建造碳足迹对比分析

为了探究装配式建筑减排潜力,本文为该建筑设计了两种施工方案,即传统现场施工(方案1)和基于楼板的半预制施工(方案2)。两种施工方案的碳足迹计算结果见表2。

表2 传统建筑与装配式建筑建造碳足迹计算结果

阶段	方案1	方案2
建筑材料生产阶段	8 909.06tCO _{2eq}	8 904.62tCO _{2eq}
预制构件生产阶段	0.00tCO _{2eq}	21.07tCO _{2eq}
建筑材料和预制构件运输阶段	120.31tCO _{2eq}	148.02tCO _{2eq}
现场施工阶段	326.20tCO _{2eq}	143.83tCO _{2eq}
建造阶段	9 355.58tCO _{2eq}	9 217.54tCO _{2eq}
单位面积碳足迹	395.155 7kgCO _{2eq}	389.325 2kgCO _{2eq}

由表2可知,若该建筑采用预制施工方式,单位面积碳足迹为389.325 2kgCO_{2eq}。与传统施工方法相比,单位面积碳足迹降低5.83kgCO_{2eq},减少1.50%,说明采用预制施工技术进行建筑建造可显著减少碳足迹。

2.2.2 不同阶段碳足迹对比分析

该建筑生命周期碳足迹计算结果见表3。

表3 某住宅建筑生命周期碳足迹

生命周期阶段	各阶段碳足迹 (tCO _{2eq})	占比 (%)	年碳足迹 (tCO _{2eq})
建筑材料生产阶段	8 904.62	14.17	8 904.62
预制构件生产阶段	21.07	0.03	21.07
建筑材料与预制构件运输阶段	148.02	0.24	148.02
现场施工阶段	143.83	0.23	143.83
运营维护阶段	53 416.41	85.03	1 068.33
拆除处置阶段	186.38	0.30	186.38
总碳足迹 tCO _{2eq}	62 820.33	100	1 208.08

由表3数据可知,该建筑碳足迹总量为62 820.33tCO_{2eq},年碳足迹为1 208.08tCO_{2eq}。在整个生命周期碳足迹中,运营维护阶段碳足迹占比最高,为85.03%;其次为建筑材料生产阶段的碳足迹,占比为14.17%;随后依次为拆除处置阶段、建筑材料与预制构件运输阶段、现场施工阶段、预制构件生产阶段。基于以往文献研究结果可知,运营阶段对建筑生命周期的环境影响约占80%~85%^[14],验证了上述计算结果的可靠性。然而,本研究结果与现有研究结果^[15]存在一定差异,主要原因如下:①该建筑的碳足迹评估考虑了生活用水和公共电梯使用带来的碳足迹;②该建筑考虑了设备老化、设备升级、环境污染等因素对照明和制冷碳足迹的影响;③门、窗等常用设施的设计寿命影响运营维护阶段碳足迹。

该建筑运营维护阶段年碳足迹总量为1 068.33tCO_{2eq},低于建筑材料生产阶段的年碳足迹8 904.62tCO_{2eq},说明建筑材料生产阶段碳排放集中,排放强度高;尽管运营维护阶段年碳足迹总量约占建筑材料生产阶段的14%,但50年使用寿命使运营维护阶段的碳足迹在整个生命周期中占据首位。因此,建筑材料生产阶段是建筑业实现短期节能减排目标的主要着力点,运营维护阶段是未来建筑业实现节能减排目标的关键对象。

该建筑拆除处置阶段碳足迹总量为186.38tCO_{2eq},占比为0.30%。这是由于该建筑废弃物的长途运输,造成该阶段碳足迹相对较高。拆除处置阶段是建筑材料和设施设备集中报废的时期,也是装配式建筑环境污染最为严重的阶段。因此,该阶段利用BIM技术和无线射频识别技术(RFID)对拆除处置方案进行优化,提高建筑材料的回收及再利用率,能够有效促进建筑业环境污染减少。

该建筑现场施工阶段碳足迹总量为143.83tCO_{2eq},占比为0.23%,可见该阶段碳足迹并不显著。相较其他普通住宅建筑0.5%~2%的占比^[16],该建筑现场施工阶段碳足迹总量占比较低,主要原因在于:一方面,该建筑采用了预制技术,在减少施工机械设备台班能耗的同时缩短了施工时间;另一方

面,该建筑采用了铝模板+全钢爬架黄金组合,实现外墙底层涂料饰面及铝合金外窗与主体工程的同步施工,有效缩短了工期,从而降低了该阶段碳足迹总量。

2.2.3 不同活动碳足迹对比分析

为了进一步分析装配式建筑生命周期碳足迹的关键来源,对该建筑各阶段碳足迹活动进行细分和计算。对比分析发现:该建筑冬季供暖的煤炭消耗是生命周期碳足迹的首要来源,占35.05%;空调制冷、建筑照明分别占30.37%和14.23%。这三项活动均发生在装配式建筑运营维护阶段,说明运营维护阶段碳足迹较高。为实现节能减排目标,应对上述三项活动采取控制措施,如采用太阳能光伏发电技术,形成夏季供电、冬季供暖的双重节能模式。

综上所述,绘制该建筑生命周期各活动碳足迹,如图2所示。

2.2.4 不同使用年限碳足迹对比分析

为探究装配式建筑使用寿命对生命周期碳足迹的影响,以5年为间隔,比较30~70年使用寿命的该建筑年碳足迹及增长率,如图3所示。

由图3可以看出,随着建筑使用寿命的增加,该建筑年碳足迹先降低后持续提高。首先,在30~40年寿命期限内,年碳足迹下降的主要原因是建筑材料生产、预制构件生产、建筑材料与预制构件

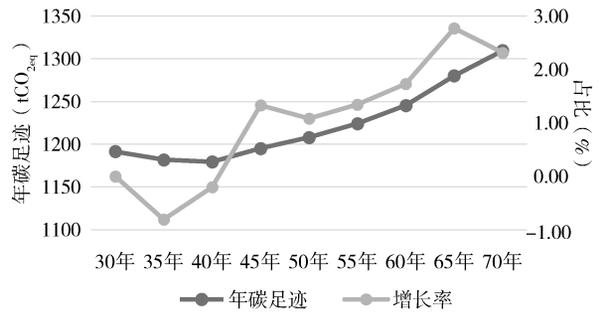


图3 基于使用寿命的某住宅建筑年碳足迹及增长率

运输、现场施工和拆除处置阶段碳足迹为固定值,该部分的年碳足迹随使用寿命增加而逐渐减少。在40年寿命期限后,考虑到设备升级与老化、建筑材料和设备损毁的运营维护活动,年碳足迹逐渐增加,而建筑材料生产、预制构件生产、建筑材料与预制构件运输、现场施工和拆除处置阶段的年碳足迹降幅趋于固定值,增幅远高于降幅,造成装配式建筑生命周期年碳足迹持续增加。其次,年碳足迹增长率整体呈上升趋势,在40~45年和60~65年寿命期间,年碳足迹增长率较高是因为20~50年使用寿命期间的门窗设备和15~50年使用寿命期间的建筑装饰材料分别在第40年和第60年进行了集中替换。由此可见,为了延长该建筑的使用寿命,实现综合效益最大化,可采取改善建筑维护结构,提高居民节能低碳意识,加强生物质能、地热能等可再生资源利用等措施控制运营维护阶段活动能耗。

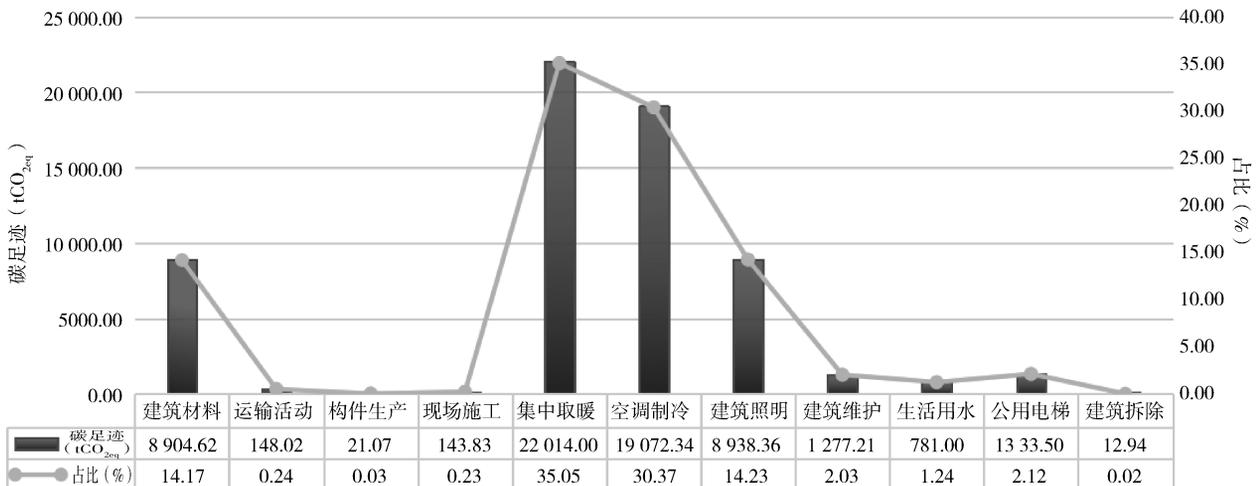


图2 某住宅建筑生命周期各活动碳足迹

3 结语

本文基于装配式建筑各阶段碳足迹活动分析,运用碳排放系数法构建装配式建筑全生命周期碳足迹评价模型;以陕西省某住宅建筑为例,分析装配式建筑减排潜力,从生命周期阶段和活动两个层面探究碳足迹分布特征和关键来源。同时,评估使用寿命对装配式建筑生命周期碳足迹的影响,为制定装配式建筑生命周期节能降碳策略提供数据支撑。

本研究仍存在一定的局限性,如仅以陕西省某住宅建筑为例,后续可以增加不同地区以及不同类型装配式建筑的对比分析,更加全面地开展装配式建筑碳足迹研究。

参考文献

- [1] 联合国世界气象组织. 2022 年全球气候状况 [R]. 2022.
- [2] 中国建筑节能协会. 2022 中国建筑能耗与碳排放研究报告 [R]. 2022.
- [3] 王玉. 工业化预制装配建筑的全生命周期碳排放研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [4] DING Z K, LIU S, LUO L W, et al. A building information modeling-based carbon emission measurement system for prefabricated residential buildings during the materialization phase [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020 (264): 121728. 1-121728. 18.
- [5] HAO J L, CHENG B, LU W, et al. Carbon emission reduction in prefabrication construction during materialization stage: a BIM-based life-cycle assessment approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2020 (723): 137870. 1-137870. 9.
- [6] 李萌萌, 陈为公, 李龙. 装配式建筑物化阶段碳排放计算及影响因素研究 [J]. *安全与环境学报*, 2022 (7): 1-10.
- [7] 谢婉君, 李晓娟, 杨婷, 等. 装配式建筑施工阶段碳排放测算研究 [J]. *工程管理学报*, 2022, 36 (3): 52-57.
- [8] 郑晓云, 徐金秀. 基于 LCA 的装配式建筑全生命周期碳排放研究——以重庆市某轻钢装配式集成别墅为例 [J]. *建筑经济*, 2019, 40 (1): 107-111.
- [9] TAVARES V, FREIRE F. Life cycle assessment of a prefabricated house for seven locations in different climates [J]. *Journal of Building Engineering*. 2022 (53): 104504.
- [10] LUO L, CHEN Y. Carbon emission energy management analysis of LCA-based fabricated building construction [J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2020 (27): 100405.
- [11] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期 (2030、2050) 发展战略研究. 综合卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [12] 高鑫, 朱建君, 陈敏, 等. 装配式混凝土建筑物化阶段碳足迹测算模型研究 [J]. *建筑节能*, 2019, 47 (2): 97-101.
- [13] 刘胜男. 装配式混凝土建筑物化阶段碳足迹评价研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [14] TUMMINIA G, GUARINO F, LONGO S, et al. Life cycle energy performances and environmental impacts of a prefabricated building module [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018 (92): 272-283.
- [15] BONAMENTE E, COTANA F. Carbon and energy footprints of prefabricated industrial buildings: a systematic life cycle assessment analysis [J]. *Energies*, 2015, 8 (11): 12685-12701.
- [16] ZHANG Y, ZHENG X J, ZHANG H, et al. Carbon emission analysis of a residential building in China through life cycle assessment [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, 10 (1): 150-158. **PMT**

收稿日期: 2023-05-07

作者简介:

张艳敏 (通信作者) (1998—), 女, 研究方向: 装配式建筑、低碳管理。

郭曦倩 (1996—), 女, 研究方向: 低碳交通。

周佳洁 (1994—), 女, 研究方向: 装配式建筑碳减排。

白礼彪 (1986—), 男, 教授, 研究方向: 工程项目管理。