

DOI: 10.7672/sgjs2025170089

基于 LCA 预制管片物化阶段的碳足迹 测算与应用研究*

曾韩军,严晓东

(宁波大学土木工程与地理环境学院,浙江 宁波 315211)

[摘要] 随着我国“双碳”战略目标提出,地铁建设进入高速发展期,但目前国内较少对地铁全生命周期碳足迹计算进行相关研究。基于生命周期评价方法,将物化阶段划分为生产阶段、运输阶段以及施工阶段,通过文献查阅,结合实地调研,收集相关碳排放源、水平活动数据和碳排放因子,利用碳排放系数法建立碳足迹测算模型。经测算,中埋预制管片碳足迹因子为 6 417.4kgCO_{2e}/环,其中生产阶段为主要碳排放源,占比约 91%,而钢筋、水泥分别占比 57%和 36%。结果表明,生命周期评价方法能够以较好的准确度定量评估预制管片碳排放值。

[关键词] 预制管片;碳足迹;测算;生命周期评价;碳排放系数法

[中图分类号] U231.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)17-0089-05

Study on Calculation and Application of Carbon Footprint in Materialization Stage of Prefabricated Segments Based on LCA

ZENG Hanjun, YAN Xiaodong

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University,
Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: With China's "dual-carbon" strategic goal, subway construction has entered a period of rapid development, however, at present, there are few studies on the calculation of carbon footprint in the whole life cycle of subway. Based on the life cycle assessment(LCA) method, the materialization stage is divided into production stage, transportation stage and construction stage, through literature review and field research, relevant carbon emission sources, horizontal activity data and carbon emission factors were collected, using the carbon emission coefficient method to establish a carbon footprint calculation model. After calculation, the carbon footprint factor of the middle buried prefabricated segment is 6 417.4kgCO_{2e}/ring, of which the production stage is the main source of carbon emission, accounting for about 91%, and steel and cement accounting for 57% and 36%, respectively. The results show that, it is possible to quantitatively assess the value of the carbon emission with good accuracy.

Keywords: prefabricated segments; carbon footprint; measurement; life cycle assessment(LCA); carbon emission coefficient method

0 引言

为减少碳排放量,我国提出“碳达峰、碳中和”目标^[1]。地铁出行的碳排放因子为 0.034 5kgCO_{2e}/(P·km),而公路出行的碳排放因子为 0.081 2kgCO_{2e}/(P·km)^[2],采用地铁出行仅为公路出行碳排放的 1/3。根据部分城市统计数据可

知,地铁年运营电能耗占城市用电量的 1%~2%。目前国内没有对地铁全生命周期碳足迹计算进行相关研究,无法计算地铁出行实现“碳中和”所需人流量,进而无法根据各阶段碳足迹进行相应碳减排策略的研究。

由于生命周期较长,涉及碳排放源种类较多,较难精确计算全生命周期碳足迹。通过查阅文献发现,多数房建项目全生命周期碳足迹主要集中于运营阶段,单从单位时间来看,施工阶段碳足迹强

* 国家社会科学基金(19BJL041)

[作者简介] 曾韩军,硕士研究生,E-mail:2211110062@nbu.edu.cn

[收稿日期] 2025-04-02

度高于运营阶段。随着我国地铁建设不断发展,目前地铁大多采用盾构法施工^[3],预制管片是盾构法施工主要配件之一。因此,对预制管片生产工艺进行碳足迹测算,可为管片碳减排提供帮助。目前对预制管片的研究大多限于生产质量、抗裂性能^[4]以及管片上浮等问题中,而预制管片碳足迹的确定对减碳策略的制定以及“碳中和”人流量计算意义重大。因此,亟需进行预制管片碳足迹测算。

“碳足迹”指某产品或服务系统在全生命周期内的碳排放总量,通常描述由个人或组织活动产生的温室气体排放^[5],尽管甲烷、氮氧化物排放量相对较小,但其对气候变化影响较大,通常将全球变暖潜能值转化为二氧化碳量,因此最终结果以二氧化碳当量表示。我国对建筑碳足迹的定义在CECS 374—2014《建筑碳排放计量标准》^[6]中有明确说明,即在建筑全生命周期内产生的温室气体排放综合以二氧化碳当量表示^[7]。碳足迹和碳排放其实是包含与被包含的关系,碳排放一般指一个主体在某段时间内的温室气体排放,通常只计算直接排放和间接排放,而碳足迹指一个产品或一项服务在全生命周期内产生的全部碳排放^[8]。

1 研究方法

1.1 碳足迹测算方法

近年来,生命周期评价方法被广泛应用于碳排放与能耗计算分析中,形成基于全过程的生命周期评价方法、基于投入产出细分的生命周期评价方法、混合式生命周期评价方法,以及实测法等。基于过程全碳排放计算方法指依据碳排放源活动数据及相应单位活动水平碳排放因子实现碳排放量化的计算方法,常被称作碳排放系数法^[9]。

碳排放系数法首先根据识别出的排放源列出计算清单,然后按照排放源采集活动数据,并统计现有研究中的碳排放因子。按照研究对象技术水平和经济条件,计算单排放源的碳排放量,再对各类别碳排放源的排放量进行求和,得到产品碳足迹,即碳排放量=活动数据×碳排放因子^[10]。

1.2 碳足迹测算步骤

在GB/T 24044—2008《环境管理 生命周期评价 要求与指南》^[11]中,将生命周期评价分成相互联系、相互循环的4个步骤,即目的和范围确定、生命周期清单分析、生命周期影响评价、生命周期结果解释。

目的和范围确定的主要工作是描述功能单位和系统边界,该功能单位为一环管片,系统边界为物化阶段。一般将构件物化阶段划分为生产、运输、施工子阶段,尽可能统计划分阶段涉及的碳排

放源。根据功能单位和系统边界划分分析生命周期清单,获取水平活动数据与相应碳排放因子数据,并建立碳足迹测算模型和实例论证,进行生命周期影响评价。其次,根据上述测算结果,可联系构件碳足迹与构件面积、构件成本等,也可提出基于某地区的某构件碳足迹因子。最后解释碳足迹测算结果,提出减碳措施。预制管片碳足迹研究框架如图1所示。

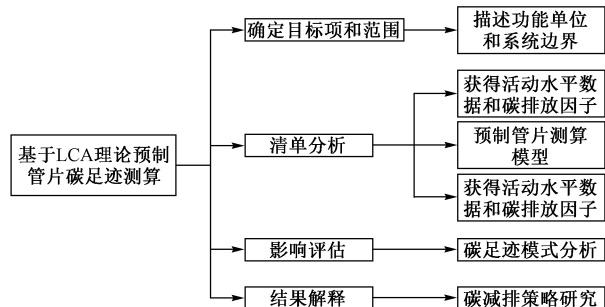


图1 预制管片碳足迹研究框架

Fig. 1 Carbon footprint study framework for prefabricated segments

1.3 功能单位

宁波市中埋 C50 预制管片外径 6.2m、厚 0.35m、宽 1.2m,一环管片总体积为 7.72m³。由于管片尺寸与埋深不同,预制管片在物化阶段的碳足迹存在较大差异,为使研究成果在不同案例中有可比性,本文采用 kgCO_{2e}/m³ 作为计量单位。

1.4 碳足迹测算模型

为精确计算预制管片在物化阶段的碳足迹,通过预制管片施工工艺流程,即钢筋下料→钢筋笼成型→钢筋笼检验→脱模→钢模清理→涂刷脱模剂→合模→钢筋笼入模→预埋件安装→混凝土生产并运至现场后浇筑、振捣→外弧面压实→蒸汽养护→管片翻身→降温修补→水养池养护,将物化阶段划分为3个阶段,并界定其各自范围,即生产阶段、运输阶段、施工阶段^[12]。运用 LCA 理论得到预制管片3个阶段的碳排放量^[13],从而得到其物化阶段的碳足迹。将管片堆放及出场运输定义为运输阶段,将安装定义为施工阶段,将其余工艺环节定义为生产阶段。

1) 生产阶段

生产阶段的碳排放量计算如下:

$$E_{Sc} = A_e C_e + A_m (C_m + L_m + C_t) + A_1 C_1 \quad (1)$$

式中: E_{Sc} 为生产阶段碳排放总量(kgCO_{2e}); A_e 为机械的能源消耗量(kW·h); C_e 为机械的能源碳排放因子; A_m 为材料的消耗量(t); C_m 为材料碳排放因子; L_m 为材料的运输距离(km); C_t 为运输碳排放因子; A_1 为人工消耗量(人·工日); C_1 为人工碳排放因子。

2) 运输阶段

通常预制构件的生产工厂地点、堆放地点、施工地点不同,因此运输阶段碳排放量计算如下所示:

$$E_{YS} = W_{se} L_{se} C_t + A_1 C_e \quad (2)$$

式中: E_{YS} 为运输阶段碳排放总量 (kgCO_2e); W_{se} 为一环管片质量 (t); L_{se} 为管片运输距离 (km); A_1 为抬升机械需要的能源消耗量 (kg)。

3) 施工阶段

施工阶段碳排放量计算如下所示:

$$E_{SC} = A'_e C_e + A'_m C_m + A'_1 C_1 \quad (3)$$

式中: E_{SC} 为施工阶段碳排放总量 (kgCO_2e); A'_e 为施工阶段消耗的机械能源量 ($\text{kW} \cdot \text{h}$); A'_m 为施工阶段消耗材料量; A'_1 为施工阶段相关机械操作人工消耗量 ($\text{人} \cdot \text{工日}$)。

2 案例研究结果

为进一步论证该碳足迹测算模型的准确性和真实性,对宁波市地铁 7 号线福明公园站—新天路 stations 中埋预制管片进行研究。

2.1 碳排放因子

1) 建筑材料碳排放因子

预制管片在地铁建造时通常以 1 环为单位发挥作用,1 环预制管片包括 3 块标准块、2 块连接块及 1 块封顶块。根据预埋深度,将管片分为浅埋管片、中埋管片、深埋管片及超深埋管片,其仅有钢筋用量方面的区别,其他原材料用量保持不变。预制管片生产消耗大量原材料,主要包括水泥和钢筋。

建筑材料碳排放因子选取以文献调研为主,参考 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》^[10] 和《建筑工程碳排放计量》,水泥、碎石、砂、粉煤灰、外加剂、脱模剂、水、热轧钢筋、普碳钢的碳排放因子分别为 735, 2.18, 2.51, 8, 1 164, 2 081, 0.168, 2 340, 2 050 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{t}$ 。对于定制材料无法查询碳排放因子,可将其自身视为构件,因此,其碳足迹因子计算方法与预制管片一致,通过联系定制厂家获取相关材料、机械和人工方面的消耗进而计算得出。

2) 能源碳排放因子

通过《建筑碳排放计算标准》可知,汽油、柴油碳含量分别为 18.9, 20.2 t/TJ , 碳氧化率均为 98%, 低位发热值分别为 430.7, 426.5 $\text{TJ}/\text{万 t}$, 单位热值碳排放因子分别为 67.91, 72.59 $\text{tCO}_2\text{e}/\text{TJ}$, 单位质量碳排放因子分别为 2.93, 3.07 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$ 。

我国不同省市间的发电形式差别较大,国家发展改革委员会将中国电网划分为 6 大区域,本文采用 2016 年华东区域电网基准线排放因子 0.808 $6\text{tCO}_2\text{e}/\text{MWh}$, 作为电力碳排放因子进行

计算。

3) 人工碳排放因子

通常使用我国人均碳排放因子代替建筑业的人工碳排放因子,即将居民生活能源消耗碳排放量折算为每日人均碳排放 (每工日按 8h 计算)^[14], 得到人工碳排放因子为 6.61 $\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{人} \cdot \text{工日})$ ^[15]。

4) 运输碳排放因子

通过对构件厂实地调研可知,建筑原材料及管片均采用公路及柴油货车运输。运输碳排放因子参考《建筑碳排放计算标准》,当柴油货车运输 18, 30, 46t 重物时,碳排放因子分别为 0.129, 0.078, 0.057 $\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{t} \cdot \text{km})$ 。

2.2 生产阶段

该阶段大部分原料集中于混凝土生产浇筑振捣环节,由于钢模具在脱模、入模、预埋件安装等生产环节均有涉及,故本文将钢模具碳排放量归于钢筋笼入模环节。

根据生产车间提供的原材料使用表,结合实际使用情况统计计算各原材料消耗量。通过实际调查可知,钢筋废料率为 1 个月 2%,该构件厂 5 月份第一车间预制管片 916 环,故 1 个月的钢筋消耗量为 1 258.584t,平均每环管片钢筋消耗量为 1.401t。对于预埋件和钢模具等定制材料,通过联系各定制厂家了解相关材料、机械和人工方面的消耗,得到该钢模具碳排放因子为 31.902 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{环}$,因为部分材料商业保密原因,仅计算占比最大材料产生的碳排放量。1 环管片生产阶段材料消耗与运输碳排放表 1 所示。

表 1 生产阶段材料消耗与运输碳排放

Table 1 Carbon emissions from material consumption and transportation during the production stage

| 碳排放源 | 消耗量/t | 运输距离/km | 运输碳排放因子/ $[\text{kgCO}_2\text{e} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}]$ | 碳排放因子/ $(\text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{t}^{-1})$ | 碳足迹/ kgCO_2e |
|------|---------|---------|--|--|------------------------------|
| 水泥 | 2.78 | 522.4 | 0.057 | 735 | 2 126.08 |
| 碎石 | 9.34 | 7.7 | 0.057 | 2.18 | 24.46 |
| 砂 | 4.79 | 8.9 | 0.057 | 2.51 | 14.45 |
| 粉煤灰 | 0.54 | 9.3 | 0.078 | 8 | 4.71 |
| 外加剂 | 0.023 | 144.1 | 0.129 | 1 164 | 27.2 |
| 脱模剂 | 0.000 6 | 160.2 | 0.129 | 2 081 | 1.31 |
| 水 | 20.638 | 0 | 0 | 0.168 | 3.47 |
| 预埋件 | 0.009 | 266.7 | 0.057 | 7 467.3 | 67.34 |
| 热轧钢筋 | 1.401 | 826.3 | 0.057 | 2 340 | 3 344.33 |
| 模具 | 24.595 | 257.5 | 0.057 | 29.633 | 0.73 |
| 总计 | | | | | 5 614.08 |

注:水分为养护用水和混凝土用水,水仅考虑消耗量;模具为周转材料,1 环模具可生产 1 500 环管片

本文仅考虑生产机械消耗的能源碳排放,未考虑照明设备与降温设备,通过实地调研各生产环节,结合功率以及制作 1 环管片所需时间,得出各环节各机械耗电量。

1 环中埋预制管片生产阶段碳足迹总量为 5 848.1 kgCO_{2e},生产阶段碳排放如表 2 所示。

表 2 生产阶段碳排放

Table 2 Carbon emissions during the production stage

| 工序 | 材料 | 能耗 | 人工 | 总和 |
|-------|----------|-------|------|----------|
| 钢筋下料 | 3 344.33 | 26.41 | 2.11 | 3 372.85 |
| 钢筋笼成型 | 0 | 72.05 | 4.55 | 76.6 |
| 钢筋笼检验 | 0 | 0 | 0.99 | 0.99 |
| 脱模 | 0 | 2.67 | 0.08 | 2.75 |
| 钢模清理 | 0 | 0 | 0.99 | 0.99 |
| 涂刷脱模剂 | 1.31 | 0 | 0.25 | 1.56 |
| 合模 | 0 | 0 | 0.74 | 0.74 |
| 钢筋笼入模 | 0 | 12.94 | 0.17 | 13.11 |
| 预埋件安装 | 67.34 | 7.08 | 0.41 | 74.83 |
| 混凝土生产 | 2 197.08 | 13.8 | 0.41 | 2 211.29 |
| 混凝土运输 | 0 | 1.82 | 0 | 1.82 |
| 浇筑、振捣 | 0 | 36.27 | 0 | 36.27 |
| 外弧面压实 | 0 | 0 | 1.24 | 1.24 |
| 蒸汽养护 | 0 | 9.4 | 0 | 9.4 |
| 管片翻身 | 0 | 19.71 | 0.25 | 19.96 |
| 降温修补 | 0 | 0 | 0.17 | 0.17 |
| 水养池养护 | 3.29 | 14.35 | 0.25 | 17.89 |
| 管片堆放 | 0 | 5.23 | 0.41 | 5.64 |

2.3 运输阶段

通过实地调研可知,管片运输质量为 19.3t,运输距离为 17.1km,其中叉车每小时消耗柴油 4L,柴油密度取 0.845kg/L。运输碳排放因子为 0.057kgCO_{2e}/(t·km),碳足迹为 18.81kgCO_{2e}。管片装车时间为 0.5h,耗能量为 3.38kg/h。能源碳排放因子为 3.07kgCO_{2e}/kg,碳足迹为 5.23kgCO_{2e}。故 1 环中埋预制管片运输阶段的碳排放总量为 24.04kgCO_{2e}。

2.4 施工阶段

通过对宁波市地铁 7 号线进行实地调研,统计分析施工阶段辅助材料、机械、人工所用种类及其消耗量,完成预制管片施工阶段碳排放量测算。

1) 辅助材料方面

辅助材料主要为同步注浆液、纵向和环向螺栓以及单圆压浆闷头。同步注浆液碳排放因子通过施工配合比结合公式计算得出。纵向和环向螺栓与单圆压浆闷头通过联系定制厂家获得相关人材机信息得出。

2) 机械方面

主要施工机械为电机车、盾构机以及各种照明

设备。通过询问 7 号线相关负责人得知,该区间通过 2 台电机车、1 台盾构机完成日常地铁推进任务。

3) 人工方面

主要包括材料吊运、同步注浆、测量以及维修人员。辅助材料、机械、人工产生的碳排放相加即可得到 1 环中埋预制管片施工阶段碳排放量,如表 3 所示,其中 1 套螺栓包含 1 个螺栓、2 个螺母、1 根螺杆以及 2 个垫圈。

表 3 施工阶段碳排放

Table 3 Carbon emissions during the construction stage

| 碳排放源 | 用量 | 碳排放因子/ (kgCO _{2e} ·单位 ⁻¹) | 碳足迹/ kgCO _{2e} |
|---------------------|--------|---|----------------------------|
| 同步注浆/m ³ | 2.7 | 38.891 | 105.01 |
| 纵向螺栓/套 | 16 | 11.262 | 180.19 |
| 环向螺栓/套 | 12 | 11.262 | 135.14 |
| 压浆闷头/个 | 6 | 0.793 | 4.76 |
| 人工/(人·工日) | 2.25 | 6.61 | 14.87 |
| 机械用电/(kW·h) | 130.21 | 0.808 6 | 105.29 |
| 总计 | | | 545.26 |

3 分析与讨论

1) 生产阶段

钢筋和水泥并非用量最大的材料,但碳足迹较高,碳排放因子高是导致碳足迹高的主要原因。因此,对于钢筋、水泥等用量较小、碳排放因子较高的建材,可采取碳排放因子较低的材料进行替换,或尽可能选择回收率较高的可再生建材进行减碳。而对于碎石、水等用量较大、碳排放因子较小的建材,可通过工艺提升降低其用量达到减排效果。同时,选择离施工场地较近的建材生产厂,以及合适的运输方式,将运输过程效益最大化,显著降低材料运输造成的碳足迹。在预制管片生产过程中还应管理生产机械,以降低机械故障造成的材料浪费。

2) 运输阶段

该阶段碳足迹总值较小的原因为本文将材料运输产生的碳排放计入生产阶段,运输阶段仅考虑将管片运至施工现场以及由叉车抬升管片产生的碳排放。

3) 施工阶段

排放占比最高的碳排放源为螺栓,碳足迹为 315.33kgCO_{2e},占比约 57%。定制建材应尽量选择加工程度较低、加工程序较简单的材料,以降低其生产过程中消耗的能源以及人工。

4 结语

参考 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》,结合各省级统计数据 and 电话访问计算得出,浙

江省运输汽油的碳排放因子为 $72.59\text{tCO}_2\text{e}/\text{TJ}$ 或 $3.07\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$ 、柴油碳排放因子为 $67.91\text{tCO}_2\text{e}/\text{TJ}$ 或 $2.93\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$ 。各类定制的建材碳排放因子,如预制管片生产阶段所用钢模具以及预埋件的碳排放因子分别为 $0.73\text{kgCO}_2\text{e}/\text{环}$ 和 $7467.3\text{kgCO}_2\text{e}/\text{t}$,施工阶段同步注浆液和压浆闷头的碳排放因子分别为 $105.01\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$ 和 $0.79\text{kgCO}_2\text{e}/\text{个}$ 。

生产阶段产生的碳足迹约占总碳足迹的 91%,其中钢筋、水泥等建材消耗为碳足迹的主要影响因素。其次为施工阶段,占比约 8.5%。占比最小的为运输阶段,约 0.5%。因此,对预制管片物化阶段碳足迹进行估算,可仅考虑生产阶段的建材消耗。

从单一碳排放源来看,钢筋、水泥材料的生产与运输占比最大,分别约 57%,36%。故通过减少原材料用量、选择碳排放量小的材料、尽量采用本地建材,以减少预制管片碳足迹。

本文通过分析预制管片的碳足迹,能够较准确地定量评估碳排放值。尽管本文研究目标已经实现,但仍存在许多问题,如计算碳足迹时涉及大量定制建材,多数定制材料碳排放因子需自行计算得出,存在一定误差,且仅适用于宁波地区。

参考文献:

[1] 姚颖超. 打好实现碳达峰碳中和这场硬仗[J]. 宁波通讯, 2021(17):3.
YAO Y C. Fighting the hard battle to achieve carbon peak and carbon neutrality[J]. Ningbo newsreport, 2021(17):3.

[2] 席逸元,李文翔. 基于 IC 卡数据的城市地铁绿色出行碳减排机理分析[J]. 中国水运,2023(6):145-147.
XI Y Y, LI W X. Analysis of carbon emission reduction mechanism of green travel in urban metro based on IC card data [J]. China water transport,2023(6):145-147.

[3] LI X J, XIE W J. Holistic LCA evaluation of the carbon footprint for prefabricated concrete stairs [J]. Journal of cleaner production, 2021, 329:129621.

[4] 王永琴,周叶,张荣. 碳排放影响因子与碳足迹文献综述:基于研究方法视角[J]. 环境工程,2017, 35(1):155-159.
WANG Y Q, ZHOU Y, ZHANG R. Literature review on carbon emission influence factors and carbon footprint: based on research methodology perspective[J]. Environmental engineering, 2017, 35(1):155-159.

[5] 弗朗凯蒂. 碳足迹分析概念、方法、实施与案例研究[M]. 北京:科学出版社,2016.
FRANCHETTI M J. Carbon footprint analysis concepts, methods, implementation and case studies[M]. Beijing:Science Press, 2016.

[6] 中国建筑设计研究院. 建筑碳排放计量标准:CECS 374:2014 [S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
China Architecture Design & Research Group. Standard for measuring, accounting and reporting of carbon emission from buildings: CECS 374: 2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[7] 李岳岩,陈静. 建筑全生命周期的碳足迹[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2020.
LI Y Y, CHEN J. Carbon footprint of the whole life cycle for a building [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

[8] 张黎维. 基于 BIM 技术的绿色建筑碳足迹计算模型及应用研究[D]. 扬州:扬州大学,2022.
ZHANG L W. Research on carbon footprint calculation model and application of green buildings based on BIM technology[D]. Yangzhou:Yangzhou University, 2022.

[9] 张孝存,王凤来. 建筑工程碳排放计量[M]. 北京:机械工业出版社, 2022.
ZHANG X C, WANG F L. Measuring carbon emissions from construction[M]. Beijing:China Machine Press, 2022.

[10] 中国建筑科学研究院有限公司. 建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
China Academy of Building Research. Standard for building carbon emission calculation: GB/T 51366—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

[11] 中国标准化研究院. 环境管理 生命周期评价 要求与指南:GB/T 24044—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
China National Institute of Standardization. Environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines: GB/T 24044—2008[S]. Beijing:Standard Press of China, 2019.

[12] LI X J, LAI J Y, MA C Y, et al. Using BIM to research carbon footprint during the materialization phase of prefabricated concrete buildings: a China study [J]. Journal of cleaner production, 2021, 279:158762.

[13] CARINE L, VILDE B, HELGE B. LCA modelling for zero emission neighborhoods in early stage planning[J]. Building and environment, 2019,1-49.

[14] 周越. 浙江省建筑外墙保温体系物化过程 CO₂ 排放研究 [D]. 杭州:浙江大学,2017.
ZHOU Y. Study on CO₂ emission during the materialization process of exterior wall insulation system in Zhejiang [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2017.

[15] 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.
GAO X, ZHU J J, CHEN M, et al. Carbon footprint measurement modeling study of assembled concrete buildings at the materialization stage[J]. Building energy efficiency, 2019, 47(2):97-101.