

基于 SD 的公共建筑全寿命周期碳排放特性及敏感性仿真 ——以夏热冬暖地区为实证

祁神军¹, 余洁卿^{1,2}, 张云波¹

(1 华侨大学土木工程学院 福建 厦门 361021, 2 莆田学院土木工程学院 福建 莆田 351100)

摘要: 立足于全寿命周期视角, 采用系统动力学建立了公共建筑全寿命周期碳排放模型; 以夏热冬暖地区为例, 模拟和仿真了公共建筑全寿命周期的碳排放特征, 确立影响公共建筑碳排放的主要因素; 进而改变部分关键因素, 模拟了它们对全寿命周期碳排放的敏感度, 针对性地提出了夏热冬暖地区公共建筑减排的具体措施。

关键词: 系统动力学; 公共建筑; 全寿命周期; 碳排放; 冬暖夏热地区

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)01-0101-08

Research on life cycle carbon emission and its reduction sensitivity of public building on the basis of system dynamics: a case study in hot summer and warm winter area

QI Shenjun¹, SHE Jieqing^{1,2}, ZHANG Yunbo¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Civil Engineering, Putian University, 351100, Putian Fujian, China)

Abstract: On the basis of Life Cycle Assessment, the model of life cycle carbon emission of public building with System Dynamics (SD) is proposed for studying the character and reduction sensitivity. Take a public building in hot summer and warm winter area as an example. The carbon emission characteristics is simulated and the most important factors are found, and then their reduction sensitivity was also simulated with the SD model. Accordingly the targeted countermeasures have proposed to reduce the carbon emission of public building.

Key words: system dynamics; public building; life cycle assessment; carbon emission; hot summer and warm winter area

我国目前仍处于城市化及城镇化高峰期, 伴随着我国粗放式的建筑业蓬勃发展的同时, 造成了巨大的能源消耗, 仅仅建筑材料生产、建筑材料运输、房屋建造、维修和拆毁等过程能耗已占到我国社会总能耗的 15%~20%^[1]. 而公共建筑的能耗问题更为突出, 2010 年公共建筑能耗(不含北方采暖)为 1.74 亿 t 标准煤, 占建筑能耗的 25.6%; 2001 年至 2010 年平均单位面积能耗从 18.3 kgce/m² 增加到 2012 年 22.118.3 kgce/m², 是增长最快的建筑用能分类^[1]. 近几年, 围绕推进公共建筑节能低碳、发展绿色公共建筑、实现低碳生态城市, 世界各国都积极探索, 已把公共建筑的节能减排作为可持续发展的重要工作。

在公共建筑的碳排放研究领域, 生命周期评价理论^[2]被广泛应用, 主要集中在碳排放阶段的划分和各阶段碳排放范畴的界定^[3-4], 包括原材料生产、原材料运输、现场建造、运营使用及拆除处置等阶段, 但较少考虑使用阶段建筑材料更新导致的再物

化、拆除回收利用对碳排放的影响. 碳排放清单核算法^[5]和生态环境投入产出法^[6]等方法也被用于定量核算各阶段的碳排放量, 尽管能够核算不同类型、不同结构的建筑各阶段碳排放的比例, 但未对各阶段碳排放的趋势进行分析和预测, 也未对影响公共建筑全生命周期碳排放的重要因素进行敏感性分析, 所提出的减排措施与建议缺乏一定的针对性. 目前系统动力学(System Dynamics, SD)在碳排放预测、碳排放强度控制、碳排放政策等方面的研究中得到了较好的应用^[7-8], 从系统的角度分析影响碳排放的主要因素、构建碳排放模型, 并对各影响因素进行系统分析、模拟预测未来碳排放强度, 进而为降低碳排放强度提供理论指导和对策思路。

鉴于此, 采用系统动力学, 建立公共建筑全生命周期碳排放模型, 以夏热冬暖地区公共建筑为例, 仿真公共建筑全生命周期碳排放的特征, 分析公共建筑全生命周期碳排放的关键影响因素, 进一步仿真和对比分析它们的敏感度, 进而从定性和定

量的角度探索公共建筑低碳减排的有效途径,为公共建筑低碳减排策略的制定提供理论指导和定量决策依据。

2 基于 SD 的公共建筑全寿命周期碳排放模型

在公共建筑生命周期碳排放这个特定的系统中,系统的碳排放随着时间不断变化,碳排放的流入、流率变化、辅助变量等之间往往存在着物质、信息的反馈作用。而系统动力学侧重研究系统的整体性、联系性、运动性与发展性,注重分析系统的结构、功能和行为之间的动态辩证关系,在解决公共建筑生命周期碳排放动态发展的系统问题有巨大的优势。对于不同的公共建筑来讲,虽然在建筑面积、建筑形态、建筑功能等方面会存在很大的区别,但是公共建筑生命周期碳排放评价系统中都具有一些共性的结构—子系统,主要包括初始物化和再物化阶段的建材生产及运输子系统、更新及拆除后废弃建材运输能耗模型子系统、建筑施工子系统、建筑运行使用子系统、建筑拆除子系统和全寿命周期碳排放量及评价子系统。

2.1 初始物化和再物化阶段的建材生产及运输能耗模型

设公共建筑的建设工期为 n 个月,假定建筑材料按照建设工期呈现正态分布投入,则在第 t 月第 i 种建材投入比例 R_{it} 可表述为

$$R_{it} = 6 \times \frac{(t^2 - nt)}{n(n+1)(2n+1) - 3n^2(n+1)} \quad (1)$$

建材因生产、运输过程都会产生必要的损耗和废弃,设某种建材的清单预算量为 m_i ,生产废弃率、运输损耗率分别为 l_{i1} 、 l_{i2} ,则建材的实际运输量为 $m_i(1+l_{i2})$ 、工厂实际生产量为 $m_i(1+l_{i1})(1+l_{i2})$ 。相应地设该种建材单位生产能耗、单位运输能耗为 M_i 、 T_{i1} 。则在第 t 月初始物化建材生产、运输能耗 E_{1it} 可表述为

$$E_{1it} = R_{it} [M_i m_i (1+l_{i1})(1+l_{i2}) + T_{i1} m_i (1+l_{i2})] \quad (2)$$

假定第 i 种建材的使用寿命为 L_i 个月,且低于公共建筑的运营期 L_B 月,则更新的次数为 $[L_B/L_i]$ ($[\]$ 表示取整的含义),更新的时间发生在 $n+[L_B/L_i]$,且假定更新时间仅需 1 个月,在整个使用寿命周期内可忽略。则再物化建材生产、运输能耗 E_{2i} 表述为

$$E_{2i} = \left[\frac{L_B}{L_i} \right] [M_i m_i (1+l_{i1})(1+l_{i2}) + T_{i1} m_i (1+l_{i2})] \quad (3)$$

鉴于此,建立如图 1 所示的公共建筑初始物化

和再物化阶段生产及运输能耗模型。

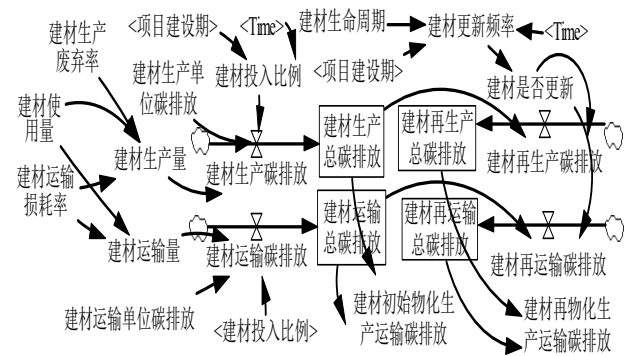


图1 公共建筑初始物化及再物化阶段的建材生产及运输能耗系统流程图

Fig.1 The energy consumption system flow of building materials production and transportation of the initial embodied and recurring embodied phase for public building

2.2 更新及拆除后废弃建材运输能耗模型

建材的拆除过程会产生一定的损耗率,假设第 i 种建材拆除的损耗率为 l_{i3} ,则废弃建材量为 $m_i(1-l_{i3})$,相应地设该种建材回收利用率为 r_i ,则可回收量为 $m_i(1-l_{i3})r_i$,不可回收量为 $m_i(1-l_{i3})(1-r_i)$ 。设可回收建材单位运输能耗、不可回收建材单位运输能耗分别为 T_{2i} 、 T_{3i} 。则更新后废弃建材运输能耗 B_{1i} 、拆除后废弃建材运输能耗 B_{2i} 可表述为

$$B_{1i} = \frac{L_B}{L_i} m_i (1-l_{i3}) [r_i T_{2i} + (1-r_i) T_{3i}] \quad (4)$$

$$B_{2i} = m_i (1-l_{i3}) (r_i T_{2i} + (1-r_i) T_{3i}) \quad (5)$$

鉴于此,建立如图 2 所示的公共建筑更新及拆除后废弃建材运输能耗模型。

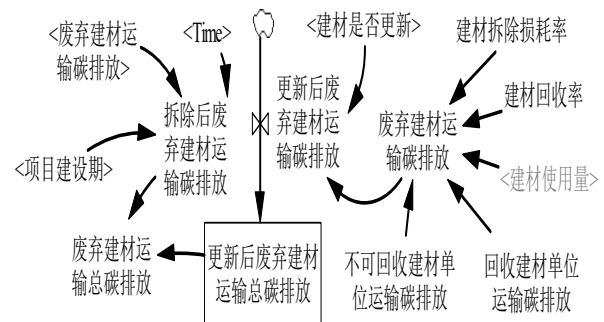


图2 公共建筑更新及拆除后废弃建材运输能耗系统流程图

Fig.2 The energy consumption system flow of abandoned materials transportation after the public building renewal and demolition

2.3 建筑施工能耗模型

建筑施工能耗指公共建筑施工过程中施工机械和施工照明所消耗的能源,施工机械包括水平运输机械、加工机械、泵类机械、土石方及筑路机械、起重机械、垂直运输机械、混凝土及砂浆机械、焊接机械、地下工程机械、打桩机械、动力机械以及其他机械。设 C_i 为第 i 种施工机械的单位建筑面积

能耗, E 为施工照明单位建筑面积能耗, A 为总建筑面积. 假定建筑施工过程施工机械台班的投入与建材的投入保持同样的比例 R_{it} . 则在施工的第 t 月使用第 i 种施工机械产生的施工能耗 CE_{it} 可表述为

$$CE_{it} = R_{it} C_i A \quad (6)$$

则仍然以第 i 种施工机械为例, 可建立如图 3 所示的公共建筑施工阶段的能耗模型, 将所有的施工机械的能耗汇总外加施工照明的能耗即可得到施工阶段的总能耗为 $\sum C_i A + EA$.

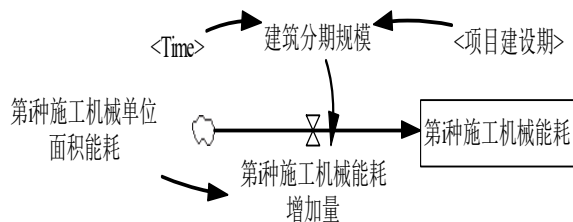


图 3 公共建筑施工阶段能耗系统流图

Fig.3 The energy consumption system flow in the construction phase for public building

2.4 建筑运行使用能耗模型

公共建筑使用阶段主要能耗集中在供暖、通风空调、照明设备等, 设使用阶段单位面积在单位时间(月度)的能耗为 E_0 , 则使用阶段的总能耗 OE 可表述为

$$OE = E_0 L_B \quad (7)$$

由此建立如图 4 所示的公共建筑运行阶段的能耗模型。

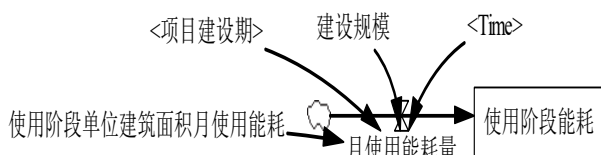


图 4 公共建筑运行使用过程能耗系统流图

Fig.4 The energy consumption system flow in the use process for public building

2.5 建筑拆除能耗模型

公共建筑生命的终点主要进行建筑物的拆除破坏、土方平整和废弃建材的回收及不可回收处理(详见 2.3 废弃建材运输能耗), 一般而言建筑拆除能耗等于建筑施工能耗的 0.9 倍^[9]. 而填覆土能耗主要由回填土面积 S 、回填土比重 w 、填土深度 h 、回填土运输距离 d 、单位运输方式能耗 T 决定, 则建筑拆除阶段的总能耗 DE 可表述为

$$DE = 0.9 \times (\sum C_i A + EA) + S \times h \times d \times w \times T + \sum B_{1i} + \sum B_{2i} \quad (8)$$

鉴于此, 建立如图 5 所示的建筑拆除阶段的能耗模型。

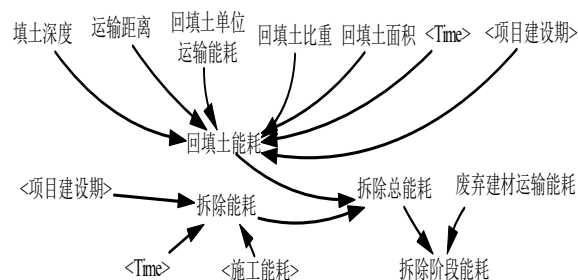


图 5 公共建筑拆除阶段能耗系统流图

Fig.5 The energy consumption system flow of the final demolition phase for public building

2.6 全寿命周期碳排放量及评价模型

公共建筑全寿命周期碳排放核算是一个简化的过程, 通过收集公共建筑三个阶段的能耗乘以该地区的能耗碳排放因子 CMF (每消耗单位能量所产生的碳排放量), 汇总计算即可得到公共建筑生命周期碳排放 $LCCE$, 可表述为

$$LCCE = (EE + OE + DE) \times CMF \quad (9)$$

根据公式(9)建立如图 6 所示的公共建筑全寿命周期碳排放量及评价模型。其中物化阶段包括初始物化、再物化及建筑施工阶段; 拆除阶段主要包括回填土及拆除。而碳排放评价指标主要考虑年度单位建筑面积碳排放强度、月度单位建筑面积碳排放强度。

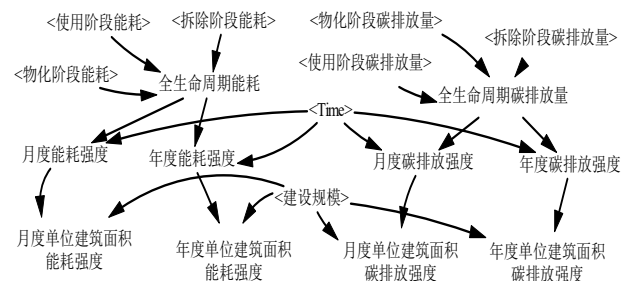


图 6 公共建筑全寿命周期碳排放量及评价系统流图

Fig.6 The system flow of the life cycle carbon emissions and the assessment of public building

3 实验仿真

3.1 工程概况

厦门市某写字楼, 地上 9 层, 首层高 4.8 m, 标准层高 4.2 m, 建筑高度达 38.4 m, 建筑占地面积 2 725.91 m², 总建筑面积 24 533.19 m², 一层为门厅和总控制室, 地上 2 层及以上都是写字楼, 其结构为钢筋混凝土、外墙为粘土多孔砖+聚苯颗粒保温浆料、内墙为粘土多孔砖、窗墙比为 0.63、全空气变风量空调系统, 主体使用年限为 50 年, 外窗采用 Low-e 玻璃, 窗帘采用百叶窗。

3.2 基础数据来源及处理

通过收集和整理有关建材碳排放的文献和资料, 得出本模型所需要的建材碳排放的基础数据,

如表 1 所示

表 1 建材清单、生产废弃率、运输损耗率、单位生产能耗
Tab.1 Building materials list, production scrap rate, transport attrition rate, energy consumption per unit production

建材	单位	清单量	运输损耗 ^[10] /%	生产废弃 ^[10] /%	单位生产能耗 ^[11] /MJ	回收率 ^[12] /%	拆除损耗 ^[12] /%	密度 ^[10] /t
水泥	t	9 931.55	1.5	0.05	2 303.32	60	20	-
钢筋	Ton	3 361.12	2	0.1	16 387.00	95	20	-
砂	m ³	14 574.10	2.5	0.05	4.97	60	20	1.45
石	m ³	17 423.13	2	0.05	5.78	60	20	1.55
砖	块	1 111 275	1	0.05	11.18	60	20	0.003 43
木材	m ³	121.50	0	0.05	540.00	10	20	0.6
玻璃	Ton	84.06	2	0.05	8 651.00	80	20	-
铝材	Ton	54.47	0	0.1	4 948.92	90	20	-
涂料	kg	81 100.68	1	0.05	4.46	0	20	-
陶瓷	Ton	269.70	2	0.1	843.12	0	20	-

此外,本工程主要以公路运输为主,建材运距取 10km,单位运输能耗为 3.10 MJ/t·km^[11]. 工程施工中主要使用 10 种施工机械,根据施工机械使用量和单位使用能耗可得施工机械总能耗,再按照建筑面积计算,可得单位建筑面积能耗分别为:水平运输机械(76.66 MJ/m²)、加工机械(8.38 MJ/m²)、泵类机械(43.56 MJ/m²)、土石方及筑路机械(40.81 MJ/m²)、起重机械(28.13 MJ/m²)、垂直运输机械(17.19 MJ/m²)、混凝土及砂浆机械(16.63 MJ/m²)、焊接机械(6.29 MJ/m²)、地下工程机械(0.39 MJ/m²)、打桩机械(1.20 MJ/m²). 公共建筑使用阶段的能耗按照厦门市的气候条件,采用 DeST-c 模拟软件建立能耗模型进行仿真,得出年单位建筑面积能耗为 104.17 kW·h/ a·m². 建筑拆除后的覆土和回填材料运输的能耗,取回填面积为 2 725.91 m²、回填土比重为 2 t/m³、填土深度为 1.5 m、回填土运输距离为 10 km,因此单位运输能耗都为 31 MJ/t. 废弃建材拆除后采用公路运输方式,可回收建材运距 10 km,单位运输能耗为 31 MJ/t;不可回收建材运距 5 km,单位运输能耗为 15.5 MJ/t. 且福建省的一次能源消

耗主要由煤、原油构成,比例分别为 73.6%和 26.4%,则每消耗 1 KJ 能量所产生的碳排放量为 1.078 ×10⁻⁴kg×73.6%+0.895×10⁻⁴kg×26.4%=1.03×10⁻⁴kg^[13].

3.3 实验结果分析

3.3.1 寿命周期各阶段碳排放量

通过公共建筑全寿命周期碳排放模型的模拟,得出各阶段能耗及碳排放总量、比重及单位碳排放强度,与清单核算结果一致,由此说明本模型完全可行,详细结果如表 2 所示.

由表 2 可知,使用阶段的碳排放量最大,占 79.39%,远大于其余两阶段之和;其次是物化阶段,占 19.25%;消除阶段的碳排放量最少,约 1.36%. 物化阶段中的初始物化阶段碳排放量占 18.98%,再物化阶段的碳排放只占 0.27%,几乎可不计. 而消除阶段的破坏拆除占 1.13%,废弃建材处理占 0.23%. 因此,使用阶段和初始物化阶段是公共建筑低碳的关键,具有巨大的节能潜力,只有将这两部分视为节能减排的重点,处理好这两部分的碳排放,公共建筑的全寿命周期碳排放才会得到降低,才能从根本上实现公共建筑的低碳目标.

表 2 公共建筑寿命周期各个阶段碳排放
Tab.2 The carbon emission of every phase in the public building life cycle

建筑全寿命周期阶段	能耗总量/MJ	碳排放总量/t	年每平方米碳排放量/kg·a ⁻¹ ·m ⁻²	碳排放比重/%
1 物化阶段	111 545 791.80	11 489.22	9.01	19.25
1.1 初始物化阶段	109 967 680.00	11 326.67	8.88	18.98
1.1.1 建材生产	100 875 000.00	10 390.13	8.14	17.41
1.1.2 建材运输	2 074 910.00	213.72	0.17	0.36
1.1.3 建筑施工	7 017 770.00	722.83	0.57	1.21
1.2 再物化阶段	1 578 111.80	162.55	0.13	0.27
1.2.1 建材生产	1 565 210.00	161.22	0.13	0.27
1.2.2 建材运输	12 901.80	1.33	0.00	0.00
2 使用阶段	460 013 000.00	47 381.34	37.14	79.39

续表 2

3 消除阶段	7 891 160.00	812.79	0.64	1.36
3.1 拆除施工	6 569 500.00	676.66	0.53	1.13
3.2 废弃建材运输	1 321 660.00	136.13	0.11	0.23
全寿命周期	579 449 951.80	59 683.35	46.78	100

3.3.2 全寿命周期各阶段碳排放量趋势

使用年限对公共建筑物化阶段、使用阶段、拆除阶段、建材生产、建材运输、初始物化阶段、再物化阶段、施工阶段碳排放量及碳排放强度影响较大, 其趋势如图 7 和图 8 所示。

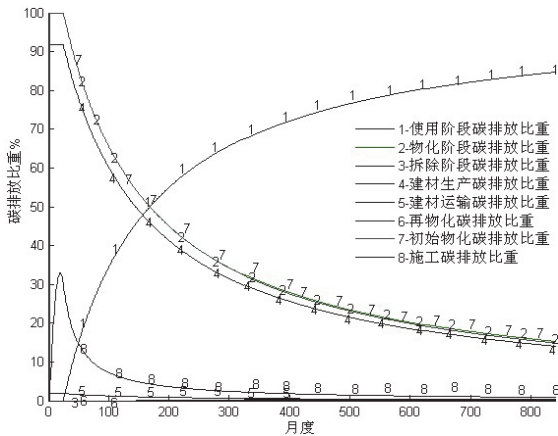


图 7 碳排放比重变化趋势
Fig.7 The variation tendency of the percentage of carbon emissions

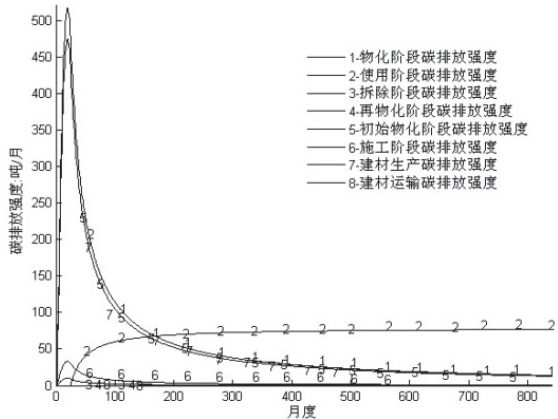


图 8 月度碳排放强度变化趋势
Fig.8 The variation tendency of monthly carbon emission intensity

公共建筑物化阶段、建材生产阶段、初始物化阶段、建材运输阶段的碳排放比重随着公共建筑生命周期的增加而逐渐降低, 且降低速度越来越慢; 公共建筑的物化阶段、建材生产阶段、建材运输阶段、初始物化、施工阶段的月度碳排放强度以及施工阶段的碳排放比重随公共建筑生命周期呈现先升后降的抛物线趋势, 在建设期内快速增长, 但在使用阶段呈现凸向原点的曲线下降, 且下降速度越来越慢, 且物化阶段、建材生产阶段、初始物化阶

段的无论是碳排放比重曲线趋势还是月度碳排放强度曲线都相近, 并随着公共建筑生命周期的增加而呈现逐渐重合的趋势。使用阶段的碳排放比重和月度碳排放强度都是公共建筑生命周期的增函数, 且增长速度越来越慢, 最终趋向平稳。拆除阶段的月度碳排放强度随着生命周期的增加, 而呈现凸向原点的曲线下降趋势, 而且下降速度越来越慢, 最终趋向平稳。

3.4 减排敏感性仿真与分析

公共建筑全寿命周期碳排放受运输损耗率、生产损耗率、施工机械单位能耗、单位使用能耗、建材回收率等因素的影响, 并对这些敏感性因素进行组合, 得出以下 5 种主要减排模式: (I)降低建材单位生产能耗、(II)降低建材单位运输能耗、(III)降低建筑施工机械单位能耗、(IV)降低单位建筑面积使用能耗、(V)降低废弃建材单位运输能耗, 并着重模拟和仿真它们对全寿命周期碳排放总量和年每平方米碳排放量的敏感度。

3.4.1 降低建材单位生产能耗

将建材生产单位能耗提高 10%和减少 10%, 其余参数保持初始值不变, 对公共建筑全寿命周期碳排放模型进行仿真, 模拟仿真后的结果如表 3 所示:

由表 3 可知, 尽管降低建材生产单位能耗对全寿命周期碳排放的影响较小, 其敏感度仅为 0.18, 但可以有效降低建材生产碳排放占总碳排放的比例和建材生产碳排放总量。

3.4.2 降低建材单位运输能耗

将建材运输单位能耗提高 10%和减少 10%, 其余参数保持初始值不变, 对公共建筑全寿命周期碳排放模型进行仿真, 模拟仿真后的结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 虽然建材运输单位能耗降低能有效降低建材运输阶段的碳排放, 但几乎对公共建筑全寿命周期碳排放总量和年每平方米碳排放量的没有影响, 主要原因是建材运输碳排放所占比例极低, 仅为 0.36%, 无论建材运输单位能耗如何降低, 对于该公共建筑全寿命周期碳排放的影响都甚微。

3.4.3 降低建筑施工机械单位能耗

将施工机械单位能耗提高 10%和减少 10%, 其余参数保持初始值不变, 对公共建筑全寿命周期碳

排放模型进行仿真,模拟仿真后的结果如表 5 所示.

表 3 情形 I 下公共建筑全寿命周期碳排放主要变量变化情形
Tab.3 The change of the main variables of the life cycle carbon emission of public building in the first case

变化幅度	建材生产碳排放 总量/t	全寿命周期碳排放 总量/t	年每平方米碳排放量 /kg·a ⁻¹ ·m ⁻²	建材生产碳排放比例/%
单位生产能耗+10%	11 606.48	60 738.48	47.61	19.11
初始值	10 551.34	59 683.35	46.78	17.68
单位生产能耗-10%	9 496.21	58 628.21	45.96	16.20
平均敏感度	0.45	0.18	0.18	0.82

表 4 情形 II 下公共建筑全寿命周期碳排放主要变量变化情形
Tab.4 The change of the main variables of the life cycle carbon emission of public building in the second case

变化幅度	建材运输碳排放 总量/t	全寿命周期碳排放 放总量/t	年每平方米碳排放量 /kg·a ⁻¹ ·m ⁻²	建材运输碳排放比例/%
运输单位能耗+10%	236.55	59 704.85	46.80	0.40
初始值	215.04	59 683.35	46.78	0.36
运输单位能耗-10%	193.54	59 661.84	46.77	0.32
平均敏感度	1.00	0	0	0.99

表 5 情形 III 下公共建筑全寿命周期碳排放主要变量变化情形
Tab.5 The change of the main variables of the life cycle carbon emission of public building in the third case

变化幅度	建筑施工碳排放 总量/t	全寿命周期碳排放 放总量/t	年每平方米碳排放量 /kg·a ⁻¹ ·m ⁻²	建筑施工碳排放比例/%
施工机械单位能耗+10%	783.29	59 790.80	46.87	1.31
初始值	722.83	59 675.91	46.78	1.21
施工机械单位能耗-10%	662.37	59 561.00	46.69	1.11
平均敏感度	0.84	0.02	0.02	0.83

表 6 情形 IV 下公共建筑全寿命周期碳排放主要变量变化情形
Tab.6 The change of the main variables of the life cycle carbon emission of public building in the fourth case

变化幅度	使用阶段碳排放 放总量/t	全寿命周期碳排放 放总量/t	年每平方米碳排放 量/kg·a ⁻¹ ·m ⁻²	使用阶段碳排放比例/%
单位建筑面积使用能耗+10%	52 119.50	64 414.10	50.49	80.91
初始值	47 381.30	59 675.91	46.78	79.40
单位建筑面积使用能耗-10%	42 643.00	54 937.60	43.06	77.62
平均敏感度	1.00	0.79	0.79	0.21

表 7 情形 V 下公共建筑全寿命周期碳排放主要变量变化情形
Tab.7 The change of the main variables of the life cycle carbon emission of public building in the fifth case

变化幅度	消除阶段碳排放总量/t	全寿命周期碳排放 总量/t	年每平方米碳排放量 /kg·a ⁻¹ ·m ⁻²	消除阶段碳排放比例/%
单位运输能耗+10%	826.40	59 696.96	46.79	1.38
初始值	812.79	59 683.35	46.78	1.36
单位运输能耗-10%	799.18	59 669.73	46.77	1.34
平均敏感度	0.17	0	0	0.15

由表 5 可知,施工机械单位能耗降低较建材运输单位能耗降低对全寿命周期碳排放总量和年每平方米碳排放量的影响大,但它们的敏感度仍然极小,仅为 0.02,其原因与建材运输单位能耗降低基本相似,但相对而言降低施工机械能耗对全寿命周期碳排放影响更大.

3.4.4 降低单位建筑面积使用能耗 106
将使用阶段单位建筑面积能耗提高 10%和减少 10%,其余参数保持初始值不变,对公共建筑全寿命周期碳排放模型进行仿真,模拟仿真后的结果如表 6 所示.
由表 6 可知,降低公共建筑使用阶段的能耗对

其全寿命周期碳排放总量和年每平方米碳排放量的影响最大,平均敏感度达到了0.79,但使用阶段碳排放比例的平均敏感度却较低,仅为0.21,因为使用阶段碳排放占总碳排放比例极高,达到了79.39%,这说明该公共建筑碳排放降低的关键在于使用阶段,能够有效降低全寿命周期阶段碳排放量。

3.4.5 降低废弃建材单位运输能耗

将拆除阶段的单位运输能耗提高10%和减少10%,其余参数保持初始值不变,对公共建筑全寿命周期碳排放模型进行仿真,模拟仿真后的结果如表7所示。

由表7可知,降低废弃建材运输能耗与降低建材运输能耗的结果几乎一样,对公共建筑全寿命周期碳排放总量和年每平方米碳排放量的影响几乎为0,且对消除阶段的碳排放总量和比例的影响都非常小。因此降低废弃建材的运输能耗对该公共建筑全寿命周期的碳排放影响最小,减排效率也是较低的。

3.5 公共建筑低碳减排策略

从全寿命周期各阶段碳排放量的分析来看,使用阶段和初始物化阶段是公共建筑低碳的关键;从敏感度仿真来看,单位建筑面积能耗强度的影响远远大于其他因素,其次是建材生产单位能耗,而建材运输能耗、施工碳排放、废弃建材运输的影响程度相当乏力,与其他学者研究结论基本一致^[14]。因此公共建筑的低碳减排必须在降低使用阶段的碳排放的基础上,结合公共建筑各阶段的特征、地域性气候及经济发展状况制定一系列切实可行的低碳减排措施。

(1) 使用阶段

使用阶段是公共建筑减排的关键阶段,可行的减排措施主要有:①节能减排改造,对遮阳设备、采暖、制冷、热水供应、办公电器、照明、电梯等方面进行节能减排改造,以减少能源的消耗,并提高能源利用率;②开发利用低碳新能源,如太阳能、风能、生物质能、地热能、潮汐能等可再生能源的使用,降低对高排放能源的依赖;③加强低碳减排宣传、激励及宣传工作,不仅加大公共建筑低碳减排的宣传,培养良好的低碳减排的办公习惯,而且完善物业管理,制定并实施低碳减排制度,甚至建立低碳减排管理的激励机制。

(2) 建材生产阶段

建材生产阶段的减排是公共建筑减排的第二大关键环节,不应忽视该阶段的减排潜力。从建材

生产阶段的碳排放核算过程可知,该阶段的碳排放主要与建材的种类、用量、生产废弃率、运输废弃率和单位生产能耗有关。因此,在不影响公共建筑功能的情况下,应尽量采用低碳的建材,并考虑选用在全生命周期的可再生建材。提高建材生产工艺,降低单位生产能耗以及生产废弃率。合理选用建材运输工具,合理保护运输途中的建材,降低运输废弃率。

(3) 建筑施工阶段

在公共建筑的施工建造阶段,涉及各种施工机械设备的施工及管理,能源消耗点多面广,不易控制,容易造成过度的碳排放,应进行全面管理和控制。在保证安全、质量、工期等基本要求的的前提下,科学合理编制施工组织管理、施工方案等,加强施工过程碳排放的动态管理,减少资源和能源的消耗。同时,还应加强对现场工作人员低碳减排意识的宣传,规范其工作流程,培养其低碳减排操作的良好习惯。

(4) 建材运输阶段

建材运输过程的碳排放主要与建材的重量、运输距离、运输废弃率和单位运输能耗有关,因此除了降低运输废弃率,更关键的是提高本地化建筑材料的使用比例,缩短运输距离,选取合理的运输工具,降低运输过程中的资源和能源消耗。

(5) 废弃建材运输阶段

对公共建筑拆除后所产生的废弃建材,应该统一堆放,分类管理,并进行有效回收、利用和垃圾处理。废弃建材运输碳排放也与废弃建材的重量、回收率、运输距离、单位运输能耗有关。因此,提高建材的回收利用率,缩短运输距离,减少因此产生的能源耗费。

4 结论

采用系统动力学,结合DeST-c模拟仿真的数据和工程本身的工程量清单,构建了冬暖夏热地区公共建筑全寿命周期碳排放模型,对各阶段的碳排放的趋势及敏感性因素进行了仿真,并针对性地提出了公共建筑全寿命周期减排策略。通过实验,得出以下三方面的结论:

(1) 公共建筑使用阶段对全寿命周期碳排放量的影响最大,其次是建筑材料的生产阶段,它们对全寿命周期碳排放的影响达到了98.37%,是减排的关键。

(2) 随着使用年限的延长,使用阶段碳排放强

度会逐渐减小,而其他类型的碳排放强度也会逐渐下降,50年后则它们的变化幅度极小,因此公共建筑存在合理的使用寿命,至少应为50年。

(3) 通过合理有效的节能设计及改造能有效降低单位建筑面积使用能耗,是最有效的减排方式;有效降低建材单位生产能耗也是降低公共建筑碳排放的重要措施;施工机械能耗的降低,对全寿命周期碳排放的敏感度仅为0.02,对碳排放的影响极小;而初始物化阶段和再物化阶段建筑材料运输能耗的降低对全寿命周期碳排放的影响几乎可忽略。但本文的研究并未考虑废弃建材循环再利用、区域性绿化的负碳排放效应,这正是下一阶段的主要研究工作。

参考文献 References

- [1] 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[R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Building Energy Conservation Research Center of Tsinghua University. The annual development report of Chinese building energy conservation[R]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [2] Environment management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines: ISO14040.2006[S]. Geneva: International Standard Organization (ISO).
- [3] 张智慧, 尚春静, 钱坤. 建筑生命周期碳排放评价[J]. 建筑经济, 2010(02): 44-46.
ZHANG Zhihui, SHANG Chunjing, QIAN Kun. The assessment of building life cycle carbon emission[J]. Construction economy, 2010(02):44-46.
- [4] LEIF Gustavsson, ANNA Joelsson, ROGER Sathre. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(2):230-242.
- [5] 刘念雄, 汪静, 李嵘. 中国城市住区排放量计算方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(9):1433-1446.
LIU Nianxiong, WANG Jing, LI Rong. Computational method of CO₂ emissions in Chinese urban residential communities [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2009, 49(9):1433-1446.
- [6] CHEN G Q., CHEN ZM. Low-carbon building assessment and multi-scale input-output analysis[J]. Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2011, 16(1):201-212.
- [7] 陈彬, 鞠丽萍, 戴婧. 重庆市温室气体排放系统动力学研究[J]. 中国人口、资源与环境, 2012(4): 72-79.
CHEN Bin, JU Linping, DAI Jing. System dynamics of greenhouse gases emission in Chongqing city[J]. China Population, Resources and Environment, 2012(4):72-79.
- [8] 唐建荣, 郇旭东, 张白羽. 基于系统动力学的碳排放强度控制研究[J]. 统计与决策, 2012 (9):63-65.
TANG Jianrong, GAO Xudong, ZHANG Baiyu. The research of carbon emission intensity control based on system dynamics[J]. Statistics and Decision, 2012 (9):63-65.
- [9] LIN S L. LCA-based energy evaluating with application to school buildings in Taiwan[C]//Proceedings of Eco Design 2003:Third International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2003:409-413.
- [10] 常用建筑材料重量损耗率参考表及材料损耗率表[DB/OL]. 中国建筑论坛.
Weight Loss Rate Reference Table and Material Attrition Rate Table of Commonly Used Building Materials[DB/OL]. China Building Forum.
- [11] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
GONG Zhiqi. A quantitative method to the assessment of the life cycle embodied environmental profile of building materials[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [12] 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.
ZHONG Ping. Study of building life-cycle energy use and relevant environment impacts[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [13] 余洁卿, 张云波, 祁神军. 夏热冬暖地区公共建筑全生命周期碳排放特征及减排策略研究—以厦门市为例[J]. 建筑科学, 2014, 30(2): 13-18.
SHE Jieqing, ZHANG Yunbo, QI Shenjun. Study on carbon emission characteristics and emission reduction strategies of public buildings in the hot summer and warm winter areas throughout their life cycles take Xiamen city as an example[J]. Building Science, 2014, 30(2): 13-18.
- [14] 余洁卿. 基于 LCA 的夏热冬暖地区公共建筑碳排放及减排策略研究—以厦门市为例[D]. 厦门: 华侨大学, 2014.
SHE Jieqing. Study on carbon emission and emission reduction strategies of public buildings in hot summer and warm winter area based on lca: take Xiamen city as an example [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2014.

(编辑 吴海西)