

# 建筑结构隐含碳排放限值预设方法研究

肖建庄<sup>1,2\*</sup>, 夏冰<sup>1</sup>, 肖绪文<sup>1</sup>, 胡晓龙<sup>1</sup>, 丁陶<sup>1</sup>, 周颖<sup>1</sup>, 朱合华<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004)

**摘要:** 隐含碳排放限值是建筑结构碳排放量化调控与减碳目标保障的关键指标。本文从社会“碳中和”所需减碳路径出发, 依据建筑结构保有与需求量中的新建与既有结构构成比例, 提出减碳目标分解方法, 为既有结构低碳维护与新建结构低碳设计提供与宏观年度减碳需求相匹配的限值预设依据。依托“双碳”目标的减碳需求构建行业预期发展情景, 得出在维持现状、常规预估、拆除限制、减量预估四类典型情景下, 2022 年我国新建建筑结构隐含碳排放限值分别为 442.6 kg CO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>、456.2 kg CO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>、485.9 kg CO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>、616.0 kg CO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup> (对应结构设计使用年限 50 年); 给出 2022—2060 年建筑结构建造与维护碳排放限值的变化趋势, 厘清了新建结构总量控制、既有结构延寿等减碳措施促使结构单体隐含碳排放限值宽松的成效。进一步从概率化调控、区域特征量化、可操作性、数据驱动优化等方面, 提出了建筑结构隐含碳排放限值设定的相关建议。

**关键词:** 建筑结构; 隐含碳排放限值; 减碳目标分解; “双碳”目标; 低碳设计

**中图分类号:** TU318 **文献标识码:** A

## Presetting Method for Embodied Carbon Emission Limit of Building Structures

Xiao Jianzhuang<sup>1,2\*</sup>, Xia Bing<sup>1</sup>, Xiao Xuwen<sup>1</sup>, Hu Xiaolong<sup>1</sup>, Ding Tao<sup>1</sup>,  
Zhou Ying<sup>1</sup>, Zhu Hehua<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil and Architecture Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The embodied carbon emission limit is a key parameter for quantitatively regulating carbon emissions from building structures and facilitating the achievement of carbon reduction targets. Starting from the social carbon emission reduction pathway toward carbon neutrality, a carbon emission reduction target decomposition approach is proposed based on the proportions of newly built and existing buildings in building structure stock and demand, which provides limit presetting references for existing structure maintenance and new structure design. Then, the expected development scenarios of building construction in China are established referring to the carbon peaking and neutrality goals in China, and correspondingly, the carbon emission limits for four typical scenarios, i.e., business as usual, conventional expectation, regulating demolition, and reduction expectation, are respectively evaluated to be 442.6 kg CO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>, 456.2 kg CO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>, 485.9 kg CO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>, and 616.0 kg CO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup> (the designed service life is 50 years). Besides, the expected trends of carbon emission limits during the year 2022 and 2060 have also been estimated, and the contributions of emission reduction measures, including the amount regulation of newly built structures and the lifespan extension of existing structures, to the relaxation of carbon emission limits for individual structures have been clarified. Furthermore, suggestions for research related to carbon emission limit are provided from the aspects of probabilistic regulation, quantification of regional characteristics, feasibility of

收稿日期: 2023-02-15; 修回日期: 2023-02-28

通讯作者: \*肖建庄, 同济大学土木工程学院教授, 研究方向为再生混凝土材料与结构基础理论; E-mail: jzx@tongji.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“绿色建造发展战略研究”(2022-XZ-21), “建筑业数字化发展战略研究”(2022-XY-80)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

the target achievement, and data-driven refinement.

**Keywords:** building structures; embodied carbon emission limit; carbon emission reduction target decomposition; carbon peaking and neutrality; low-carbon design

### 一、前言

自工业革命以来,人类社会超量碳排放导致气候变化问题日趋严峻<sup>[1]</sup>,减缓气候变化成为人类命运共同体的首要挑战。2015年,第21届联合国气候变化大会(COP21)通过的《巴黎协定》,将相较于前工业化时期的全球平均温升控制在2℃(并努力将温度上升幅度限制在1.5℃以内)以内作为人类社会应对气候变化的长期目标<sup>[2]</sup>。2020年,我国制定了“2030年碳达峰、2060年碳中和”的减碳目标(“双碳”目标),要求各行业积极落实碳减排行动。

传统建筑业具有高能耗、高碳排放的特点,大规模建设热潮使我国建筑全过程碳排放在社会总量中的占比高达50.9%(2020年)<sup>[3]</sup>。建筑全过程碳排放可分为隐含碳排放、运行碳排放两个部分<sup>[4]</sup>:前者包括建材生产、施工、维护、拆除、处置等过程发生的碳排放<sup>[5]</sup>;后者指建筑使用过程中因维持建筑内部环境或使用功能所需的设备运行等造成的碳排放<sup>[6]</sup>。能源结构转型与建筑节能技术的推广可有效降低建筑运行碳排放,使隐含碳排放降低成为建筑业低碳转型的主要瓶颈<sup>[7]</sup>。本文从建筑结构本体出发,聚焦其隐含碳排放调控。

绿色建造研究方兴未艾,低碳建筑材料、减量化结构形式、精益施工模式等的研发,有望降低建筑结构的碳排放。生命周期评价<sup>[8]</sup>等碳排放分析方法的应用,也可实现面向减碳的多方案比选。但应用中,对碳排放量最小化的追求将一定程度制约建筑结构设计方案的多样性,也可能对建筑结构的\*\*安全性、使用性能等其他维度属性造成不利<sup>[9]</sup>;同时,尚难以确保现有可选低碳方案可满足社会低碳可持续转型需求。因此,有待规范和提出建筑结构隐含碳排放限值,将社会碳减排路径的预期目标需求映射至建筑结构单体设计<sup>[10]</sup>,为建筑结构设计减碳水平的衡量与优化提供定量依据。

与宏观减碳目标已得到大量研究关注不同,建筑结构单体设计中的碳排放限值研究尚处于起步阶段。部分探索性研究提出了基于碳预算的建筑碳排

放目标分解方法,为瑞士、新西兰等国家的特定类型建筑设计提供了碳排放限值建议<sup>[11-13]</sup>。但由于国家与地区间的发展状况不一,上述限值难以匹配我国“双碳”目标的减碳路径;此外,上述研究的调控对象为隐含碳排放与运行碳排放之和,涉及建筑节能、机电设备等环节的优化与协调,难以直接用于常规建筑结构设计。而由于建筑结构单体隐含碳排放具有在初始建造、定期维护和拆除阶段出现多离散峰值的特点,与社会宏观减碳目标的连续路径存在明显差异,因而与社会减碳目标相匹配的单体结构设计碳排放限值亟待进一步研判。

基于上述背景,本文从社会宏观年度碳减排目标出发,依据建筑结构隐含碳排放占比状况、以及建筑面积的既往构成与未来预测,提出既有结构维护和新建结构设计的碳排放限值预设方法;以国内建筑结构碳排放现状为基准,面向“双碳”目标需求构建多类发展情景,得出我国建筑结构新建与维护的碳排放限值建议。

### 二、建筑结构碳排放限值预设方法

#### (一) 建筑结构碳排放限值预设原则

##### 1. 限值来源

全球“碳中和”行动使社会宏观碳排放限值逐步明确,现有研究对从社会宏观到建筑全寿命期的碳排放限值分解开展了尝试,这一路径称为“自上而下”的目标分解方法<sup>[11-13]</sup>。该类研究常从气候变化减缓目标允许的人类社会剩余碳排放匡算出发,将其平均配置于“碳中和”前的各年份,进而分摊至建筑行业,并在所分析建筑单体的服役时间段内,依据使用人数<sup>[11]</sup>或建筑面积<sup>[12]</sup>设定其全寿命期碳排放限值。

“双碳”目标明确了我国社会碳减排行动的关键时间节点,当前我国减碳路径研究不断完善,预期以逐年降低的碳排放限值引导“双碳”目标的实现。此时,若依据年均碳预算对结构碳排放进行调控,难以匹配逐年降低的年度碳减排目标,可能制约未来社会低碳目标的顺利达成,同时也将赋予当

前设计过于严格的碳排放限值，不利于推动采用当前可行的低碳技术实现减碳目标。由于碳减排行动下，社会各行业通常呈现并行的碳排放逐年降低特征，未来能源、交通等行业的碳排放强度下降有望为建筑结构的隐含碳排放降低提供更优路径。因此，将逐年降低的社会宏观年度碳排放限值作为建筑结构隐含碳排放限值依据，是有助于“双碳”目标达成与结构低碳设计实现的适配方案。

## 2. 分解方法

虽然单一建筑结构的隐含碳排放仅在建材生产、施工、维护、拆除处置等离散时间点出现，但在宏观层面，由于社会正常运转对大量建筑结构的连续需求，其隐含碳排放总量通常具有逐年连续特点，而这也正对应宏观层面的社会逐年减碳需求，因此将社会年度宏观碳排放限值分解至建筑结构隐含碳排放限值具有了可行性。

现有研究中常用的分解依据有两类：消费支出占比和碳排放占比。当前我国建筑业在GDP中占比约为7%，但隐含碳排放总量占比超29%<sup>[3]</sup>，二者并不处于同一量级，因而依据消费支出占比分解碳排放限值可能显著制约建筑业的正常发展。另一方面，假设建筑结构隐含碳排放总量在社会总碳排放中的占比保持不变也难符合我国发展现状：我国正历经城镇建设的快速发展期，建筑结构隐含碳排放占全国总碳排放的比例高于国际平均水平<sup>[4]</sup>，但这一比例将随着城镇化发展的转型而逐步降低。因此，本文建议以当前建筑结构隐含碳排放总量占比为基准，依据社会低碳转型需求预设占比降低情景，实现碳排放限值科学分解。

在下文论述中，建筑结构建设包含与建筑结构隐含碳排放相关的建材生产、施工、维护、拆除、处置等全寿命期，建造阶段包含新建结构初始建设相关的建材生产、施工及重建所需前端拆除处置过程，维护阶段则包含服役期内对结构本体的修复、加固、局部改造等过程，因而在本文的碳排放限值分解中，隐含碳排放总量对应于建筑结构建设活动总量，可由建造和维护两类建设活动分别对应的隐含碳排放量叠加构成。

由于单一年份内存在建设活动的建筑结构繁多，碳排放限值从行业分解到建筑结构单体仍存在阻碍。依据所分析建筑可服务人数在社会总人口数的占比，将建筑业年度碳预算分解至建筑单体<sup>[11]</sup>，

但这一分解方式将使既有结构维护与新建结构建造的碳排放限值平均化，造成后者在结构低碳设计中难以实现。因此，从结构群体碳排放管理的角度出发，需在建造和维护两类建设活动间平衡碳排放限值，实现从行业年度限值到建筑结构单体限值的目标分解。

## (二) 建筑结构隐含碳排放年度总量限值

为明确社会低碳转型允许的建筑结构隐含碳排放总量，依据建筑结构隐含碳排放总量在社会总碳排放量中的预计占比，分解碳排放限值：

$$I_{\text{cB}} = I_{\text{cT}} \times \eta_{\text{B}} r_{\text{B}} \quad (1)$$

式(1)中， $I_{\text{cT}}$ 为分析年的社会宏观年度碳排放限值， $I_{\text{cB}}$ 为其对应的建筑结构隐含碳排放总量限值； $r_{\text{B}}$ 为建筑结构隐含碳排放总量占社会总碳排放的现状比例； $\eta_{\text{B}}$ 为建筑结构减碳路径的偏移因子，可表征行业碳排放占比变化趋势，利于调节建筑结构减碳与社会总体减碳的同步性。

## (三) 建筑结构建设需求研判

随着人口数量变化与居住品质提升，城镇化推进对建筑面积的需求量将逐年变化。在单一年份建筑总面积需求中，既有建筑结构数量占比大，但单体维护的碳排放量较小；新建建筑结构（含退役结构的拆除重建）数量占比小，但单体建造的碳排放量大。为将建筑结构隐含碳排放总量限值在上述两者间分配，需先预测在满足建筑结构年度需求量中，既有结构与新建结构的占比，思路如图1所示。

通过调研统计获知分析年的上一年度总建筑面积保有量（ $A_{\text{L}}$ ），进而结合建筑竣工面积历史记录与建筑预期使用寿命状况，预估既有结构的建成时间占比，并依据分析年的建筑使用寿命需求，计算拟于分析年退出服役的既有结构建筑面积（ $A_{\text{R}}$ ）：

$$A_{\text{R}} = \frac{A_{\text{L}}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{H}}} A_{\text{H}_i} [1 - F_{T_{\text{E}}}(i-1)]} \times \sum_{i=1}^{N_{\text{H}}} A_{\text{H}_i} \cdot [F_{T_{\text{N}}}(i) - F_{T_{\text{E}}}(i-1)] \quad (2)$$

式(2)中， $A_{\text{H}_i}$ 为距分析年第*i*年前的建筑竣工面积， $N_{\text{H}}$ 为可查统计记录年份数； $T_{\text{E}}$ 和 $T_{\text{N}}$ 分别为既有结构使用寿命的调研统计值与分析年计划达成值， $T_{\text{N}}$ 可

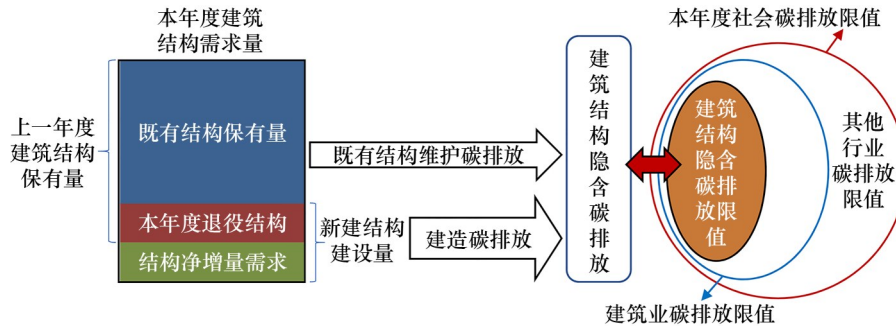


图1 分析年建筑结构新建与维护量简化预测方法

作为建设行业发展状况的调节参数， $F_{T_e}(x)$ 和 $F_{T_n}(x)$ 分别为 $T_e$ 和 $T_n$ 的累积概率函数。当不考虑建筑结构使用寿命的调节或变化时， $T_e$ 和 $T_n$ 的概率分布相同。

此外，社会运转对建筑结构使用需求的变化将造成建筑面积的净增量 $A_I$ ：

$$A_I = A_T - A_L \quad (3)$$

式(3)中， $A_T$ 为分析年的建筑面积需求量。建筑结构新建可同时满足建筑面积的年度增量需求，并实现对不满足继续服役要求的既有结构的替换：

$$A_N = \eta_N \cdot (A_I + A_R) \quad (4)$$

式(4)中， $A_N$ 为分析年的新建结构建筑面积量； $\eta_N$ 为新建结构实际建造量与预估新建需求量的比值。因建筑业企业房屋建筑竣工面积与建筑结构保有量的统计口径差异，以及本文构建的退出服役结构量简化预测模型误差，导致本文预测的分析年预估新建需求量与实际新建量存在偏差，采用系数 $\eta_N$ 近似修正；这一系数也可反映在城镇化发展进程中，因人口迁移或与旧建筑弃用同步出现的额外新建需求。

进一步可预估，在分析年新建结构能够提供的建筑面积量占社会所需建筑面积总量的比例 $r_N$ ：

$$r_N = \frac{A_N}{A_T} \quad (5)$$

#### (四) 建筑结构碳排放限值预设计算

依据分析年的建筑结构隐含碳排放总量限值与建筑面积需求量，可计算既有结构维护与新建结构建造并存下，单位建筑面积对应的建筑结构平均隐含碳排放限值 $I_{cr0}$ ：

$$I_{cr0} = \frac{I_{crB}}{A_T} \quad (6)$$

对于结构单体而言，维护作业的开展具有周期性，并非每年发生；而在建筑结构群体视角中，每年有

一定比例的建筑结构需开展维护，而这一比例可认为与结构单体平均维护频次一致。由此，可通过对典型建筑结构生命周期评价的抽样调查，预估在建筑结构建设行业，既有结构维护的年均碳排放量与相应建筑面积的新建结构建造碳排放量的比值 $r_M$ （单位： $a^{-1}$ ）：

$$r_M = \eta_M \times r_{M0} = \eta_M \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_{M_i}}{I_{N_i} T_i} \quad (7)$$

式(7)中， $I_{N_i}$ 、 $I_{M_i}$ 、 $T_i$ 分别为调研的第 $i$ 个建筑结构建造阶段碳排放、维护阶段碳排放及其设计使用年限（单位： $a$ ）； $N$ 为调研的既有建筑结构数量； $r_{M0}$ 为基于调研样本得出的建筑结构维护阶段年均碳排放量与其建造相关碳排放量的比值； $\eta_M$ 为反映分析年结构维护与新建建造碳排放水平变化的调节因子，可辅助调节建筑结构的宏观建设策略。例如，相较于混凝土结构而言，钢结构的初始建设碳排放量较小，但维护需求将有所增大，当钢结构占比计划逐年增大时， $\eta_M > 1$ ；而当新建结构的耐久性提升得到推广时，结构建造阶段碳排放占比增加，而后续维护碳排放占比适当减少，此时 $\eta_M < 1$ 。

由此，可将分析年的建筑结构隐含平均碳排放限值分解至既有结构维护与新建结构建造：

$$\begin{aligned} I_{cr0} &= (1 - r_N) I_{crE0} \times 1 + r_N I_{crN0} \\ &= (1 - r_N) (r_M \times 1) I_{crN0} + r_N I_{crN0} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中， $I_{crE0}$ 和 $I_{crN0}$ 分别为分析年单位建筑面积对应的既有结构维护年均碳排放限值和新建结构建造碳排放限值；“ $\times 1$ ”中1指的是1年。依据式(8)可得：

$$\begin{cases} I_{crN0} = \frac{I_{cr0}}{(1 - r_N)(r_M \times 1) + r_N} \\ I_{crE0} = r_M I_{crN0} \end{cases} \quad (9)$$

### (五) 建筑结构单体的碳排放量控制与校验

面向上述隐含碳排放限值的建筑结构设计与管理中, 针对在分析年具有维护作业需求的既有结构单体, 其单次维护作业碳排放设计值 $I_{de}$ 控制为:

$$I_{de} \leq I_{cre0} \times A_E \times T_M \quad (10)$$

式(10)中,  $A_E$ 和 $T_M$ 分别为所分析既有结构单体的建筑面积和维护时间间隔(单位: a)。

此外, 依据对分析年所设计新建结构在未来各预期服役年对应的 $I_{cre0}$ 预测结果, 还可设定其全寿命期内结构维护阶段的碳排放总量限值 $I_{crM0}$ :

$$I_{crM0} = \sum_{i=1}^{T_d} [I_{cre0}]_i \quad (11)$$

式(11)中,  $[I_{cre0}]_i$ 为新建结构建成后第 $i$ 年的单位建筑面积既有结构维护年均碳排放限值;  $T_d$ 为新建结构的设计使用年限(单位: a)。

由于分析年所设计新建结构用于满足分析年的建筑面积需求, 因而相应地直接采用分析年的 $I_{crN0}$ 结果作为其建造碳排放限值, 不考虑新建结构实际建造时长对限值的影响。由于材料选用、结构选型、耐久性提升措施等设计优化也同时影响建筑结构全寿命期不同阶段的碳排放, 建筑结构减碳设计的效益需从全寿命期维度综合评价<sup>[15]</sup>, 因此本研究建议针对新建结构设计, 基于单体全寿命期隐含碳排放总量开展约束调控:

$$I_{dt0} \leq I_{crT0} = I_{crN0} + I_{crM0} \quad (12)$$

式(12)中,  $I_{crT0}$ 为分析年单位建筑面积对应的新建结构全寿命期隐含碳排放限值;  $I_{dt0}$ 为单位建筑面积对应的新建结构全寿命期隐含碳排放设计值, 当认为碳排放计算结果为确定性量值时, 计算为:

$$I_{dt0} = I_T / A_0 \quad (13)$$

式(13)中,  $A_0$ 为所设计新建结构单体的建筑面积,  $I_T$ 为其全寿命期隐含碳排放。当所设计新建结构涉及前期旧结构拆除重建时, 后者相关碳排放需纳入其隐含碳排放; 而其自身在未来预期退役后的拆除处置碳排放, 则纳入下一个预期建设结构的隐含碳排放, 即将所设计结构的拆除处置分析时段前置。

## 三、建筑结构碳排放限值案例试算

以中国为分析区域, 笔者调研统计了截至2021年的相关输入计算数据, 将2022年作为分析年, 采用

本文建立的方法确定我国建筑结构隐含碳排放限值建议。

采用增量方式逐年计算建筑结构建设行业不同发展情景下, 2022—2060年我国建筑结构碳排放限值的变化情况。引入以下假定: 上一年度的实际新建结构量取为上一增量步的 $A_N$ 预测结果, 当前分析年的 $T_E$ 与前一个分析年的 $T_N$ 取值保持一致。

### (一) 背景参数调研

我国2021年的全年碳排放量约为 $1.19 \times 10^{10}$  t<sup>[16]</sup>, 有望于2027年实现碳达峰, 年碳排放峰值约至 $1.22 \times 10^{10}$  t<sup>[17]</sup>; 预期于2060年实现碳中和, 即净碳排放量为0, 而这一目标预期需要通过组合负碳技术提供的碳汇实现<sup>[18]</sup>。基于此, 本文采用线性简化大致勾勒我国的社会宏观减碳路径(见图2), 采用分析年的预期碳排放量与可用碳汇量叠加结果作为当年社会宏观碳排放限值。

我国建材相关碳排放量约占全国碳排放总量的28%<sup>[3]</sup>, 用于建筑结构的部分约占1/2<sup>[14]</sup>, 即估测为14%, 此外施工过程碳排放量约占全国碳排放总量的1%<sup>[3]</sup>。由此, 本文认为当前建筑结构隐含碳排放总量在社会宏观碳排放量中的占比( $r_B$ )约为15%。

国家统计局记录了1985—2021年国内建筑业竣工面积的历史数据<sup>[19]</sup>, 本文采用线性插值补充其中缺失年份的数据。上述数据的统计口径为建筑业企业, 即房屋建设的主要承担单位, 但该统计结果仍难以完备对应建筑建成面积总量, 因而需采用公式(2)中归一化后预测的方式计算 $A_R$ 。此外, 当前我

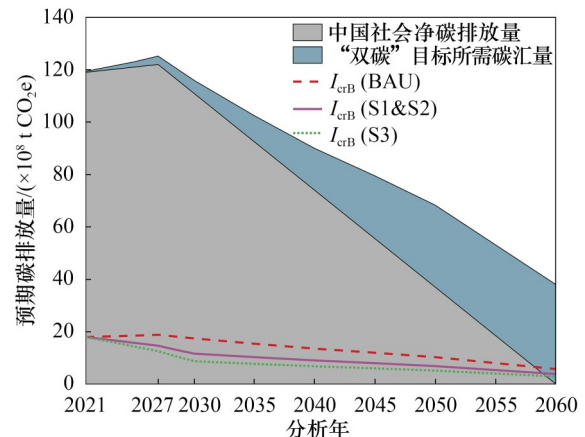


图2 我国“双碳”目标预期碳减排路径与建筑结构隐含碳排放总量逐年限值(符号含义见表2)

国建筑结构使用寿命近似服从均值为35.2年、标准差为10.6年的正态分布<sup>[20]</sup>，即以2022年为分析年时， $T_E \sim N(35.2, 10.6)$ 。结合建筑结构全寿命期碳排放评价结果调研<sup>[21, 22]</sup>（见表1）与公式（7），预估 $r_{M0} = 0.0025 \text{ a}^{-1}$ 。

### （二）建设行业发展情景与可调节参数预设

本文建立的碳排放限值预设方法的可调节参数包括 $\eta_B$ 、 $\eta_N$ 、 $T_N$ 、 $\eta_M$ ，该类参数的取值与建筑结构建设行业的预期发展目标相关。结合建筑结构建设行业现状与低碳高质量转型需求，构建4类可能的预估发展情景（见表2），并依据情景特征分别设定可节参数取值（见表3）。进而，采用公式（2）~（4），可预估2022—2060年，为满足我国社会逐年建筑结构使用需求的既有结构保有量与新建结构建设量，计算结果如图3所示。

由于在本案例分析的年份区间内，预设的各类情景中，建筑结构的平均使用寿命均尚未到达其常规设计使用年限（50年），因而认为无需额外提高既有结构维护工作量及碳排放水平；同时，假定各类型建筑结构的占比在分析的年份区间内不发生明

显变化，即在各类情景下均取 $\eta_M = 1$ 。

### （三）碳排放限值结果与减碳路径

依托上述输入参数，采用本文建立的建筑结构碳排放限值预设方法，可算得各情景下单位建筑面积对应的新建建筑结构建造碳排放限值 $I_{crN0}$ ，对应于图4左侧纵轴。由于本案例中 $r_M$ 不随分析年变化，单位建筑面积对应的既有结构维护年均碳排放限值 $I_{crE0}$ 与 $I_{crN0}$ 成正比， $I_{crE0}$ 取值对应图4右侧纵轴。结果表明：

（1）当大规模建设热潮持续、建筑结构总量保持快速上升时（BAU），“双碳”目标对社会碳排放总量的控制将使得建筑结构允许的隐含碳排放限值持续降低，尤其在碳达峰目标达成后呈现快速下降态势，为结构减碳目标的实现带来巨大挑战。

（2）随着城镇化持续推进，城镇建筑量日趋饱和，有望使建筑总量增速放缓，并在约2040年后出现总量降低<sup>[23]</sup>，这为我国建筑结构隐含碳排放总量在社会碳排放中的占比降至合理水平提供了机遇（S1）。在2027年前的碳达峰阶段，上述占比降低不改变建筑结构碳排放限值可逐年略微放宽的趋势。

（3）当前我国建筑结构平均寿命远小于发达地区平均水平<sup>[20]</sup>与常规结构设计使用年限50年，通过加强拆除限制可提升结构平均寿命。此时，既有结构的充分利用可有效减小结构新建需求量（S2）（见图3），从而赋予单位面积结构建造与维护更充裕的碳排放限值（见图4），这同时也可作为结构耐久

表1 建筑结构全寿命期建造与维护碳排放调研

$i$	$I_{Ni}^*$	$I_{Mi}^*$	$T/a$	参考文献
1	8680	1179	50	[21]
2	6026	592	50	[21]
3	467	66	50	[22]

注：\*当 $i=1,2$ 时，单位为 $t \text{ CO}_2 \text{ e}^{[21]}$ ；当 $i=3$ 时，单位为 $\text{kg CO}_2 \text{ e}/\text{m}^2^{[22]}$

表2 建筑结构建设行业发展的预估情景

情景	编号	建筑结构隐含碳排放与社会总碳排放之比	建筑面积需求净增量	结构使用寿命状况	新建结构建筑面积量与预估新建需求量之比 <sup>e</sup>
维持现状	BAU	与上一年度一致	与上一年度一致	与上一年度一致	与上一年度一致
常规预估	S1	线性降至10% <sup>a</sup> （2030年）后保持稳定	预测的基准情景 <sup>[23] c</sup>	与上一年度一致	与上一年度一致
拆除限制	S2	与S1一致	与S1一致	均值逐年递增0.2年 <sup>d</sup>	线性降至1.05（2050年）后保持稳定 <sup>f</sup>
减量预估	S3	线性降至7.5% <sup>b</sup> （2030年）后保持稳定	建议的中等调控情景 <sup>[23] c</sup>	与S2一致	与S2一致

注：<sup>a</sup>：当前全球建筑结构隐含碳排放约占人类碳排放总量的10%<sup>[14]</sup>；<sup>b</sup>：我国碳排放总量约占全球总量的27%<sup>[24]</sup>，依据我国和全球建筑结构隐含碳排放在社会碳排放总量中占比分别为15%和10%可估测，除我国外的全球其余地区建筑结构隐含碳排放占社会总量比例的常规水平约为8.15%，而7.5%的目标低于这一水平；<sup>c</sup>：Gong等<sup>[23]</sup>基于人口数、城镇化率、GDP、产业结构、建筑存量等构建情景，预测了不同调控强度下的未来我国的建筑面积总量变化趋势；<sup>d</sup>：依据上一年度相同状况预估的拟退役建筑结构中，约20%在分析年得到保留并继续服役（假设结构使用寿命分布模型与标准差保持不变）；<sup>e</sup>：以2021年为分析年，依据Gong等<sup>[23]</sup>预测的基准情景下2021年建筑面积需求净增量，采用式（2）、（3）计算 $A_l$ 和 $A_R$ ，并与2021年实际建筑竣工面积<sup>[19]</sup>对比，算得 $\eta_N$ 的现状值约为1.34；<sup>f</sup>：结构延寿有望减少超出采用公式（2）、（3）预测结果的结构建设量。

表3 各类情景下的可调节参数取值

情景	$\eta_b$	$\eta_N$	$\mu_{T_N}/a$
BAU	1	1.34	35.2
S1	$1-0.037Y^*$	1.34	35.2
S2	$1-0.037Y^*$	$1.34-0.01Y^{**}$	$35.2+0.2Y$
S3	$1-0.051Y^*$	$1.34-0.01Y^{**}$	$35.2+0.2Y$

注:  $Y$ 为分析年的年份数相较于2021年的增量,例如分析年为2022年时,  $Y=1$ ; \*为仅适用于 $Y \leq 9$  (2030年及以前)的情形,当 $Y > 9$  (2030年以后),对应参数采用 $Y=9$ 时的取值; \*\*为仅适用于 $Y \leq 29$  (2050年及以前)的情形,当 $Y > 29$  (2050年以后),对应参数采用 $Y=29$ 时的取值。

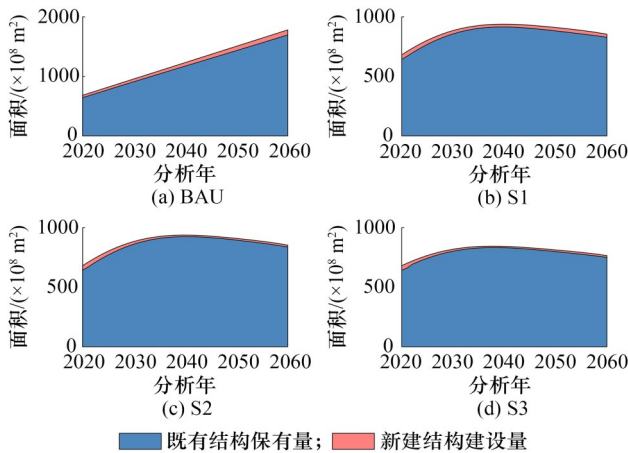


图3 不同情景下既有结构保有量与新建结构建设量

提升与再利用设计提供更大的设计空间,推动结构长寿命的良性循环。

(4) 当更加严格地调控建筑结构总量时,每年建筑结构需求量的进一步降低(S3)可使结构新建量显著减少(见图3),从而有效放宽结构建设相关碳排放限值。在建筑结构隐含碳排放总量占社会碳

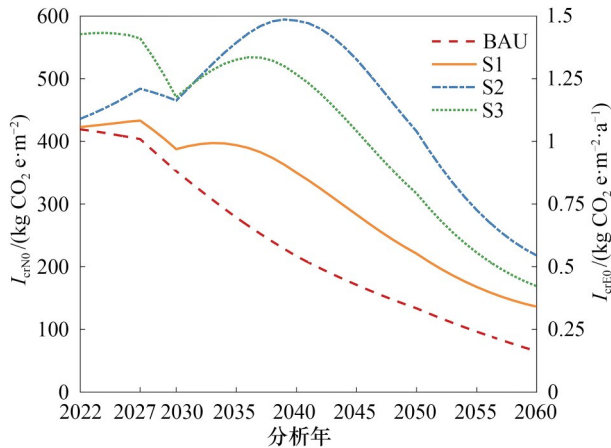


图4 新建结构建造与既有结构维护碳排放限值

排放比例降至低于当前发达地区常规水平的路径中(2030年以前),建筑结构隐含碳排放限值均可保持在较宽松水平,在维持建筑结构减碳目标实现较好可行性的同时,降低了建筑结构建设行业的碳排放占比,具备更好的社会效益。但由于上述占比的降低,在2030年后,S3情景的碳排放限值相较于S2情景更为严格,而建设总量的严格约束仍可使S3情景对应限值比S1情景更为宽松。

采用公式(11)可计算在各分析年设计的预期使用年限为50年的新建建筑结构维护阶段碳排放限值 $I_{crM0}$ (见图5)。在所分析年份区间内,S2、S3、S1、BAU情景对应的 $I_{crM0}$ 依次更为严格,这也进一步表明对既有结构拆除的管控还可为未来结构维护期提供更宽松的碳排放限值,有望辅助更灵活的结构维护计划制定与更丰富的维护技术应用,促进未来结构延寿优化。

依据公式(12)可算得在各分析年设计服役年限为50年的新建结构全寿命期隐含碳排放限值 $I_{crT0}$ (见图6)。以2022年为分析年时,各情景下 $I_{crT0}$ 结果变化区间为442.6~616.0  $kg CO_2e \cdot m^{-2}$ ,对于2023年而言, $I_{crT0}$ 变化区间为439.2~616.5  $kg CO_2e \cdot m^{-2}$ ;而基于当前建造技术水平的建筑结构生命期评价表明,设计服役年限为50年的建筑结构全寿命期隐含碳排放量级约为179.4~1050  $kg CO_2e \cdot m^{-2}$ [25]。因此,文中提出的建筑结构碳排放限值预设方法与建议限值,能够合理促进当前可行的建筑结构设计方案低碳优化。

受“双碳”目标驱动,若建筑结构建设行业仍维持现状(BAU),在2060年新建结构全寿命期隐含碳排放限值将低至72.8  $kg CO_2e \cdot m^{-2}$ ,可能严重制

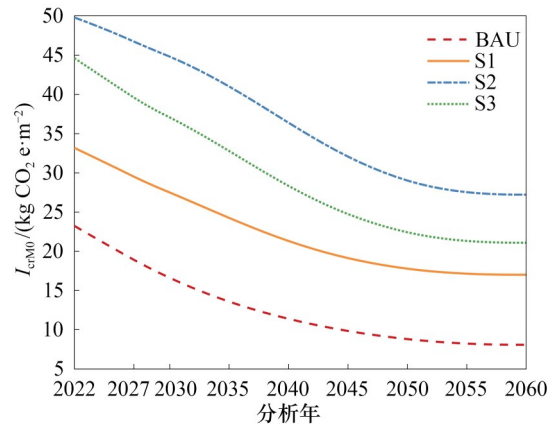


图5 新建结构未来维护阶段碳排放限值

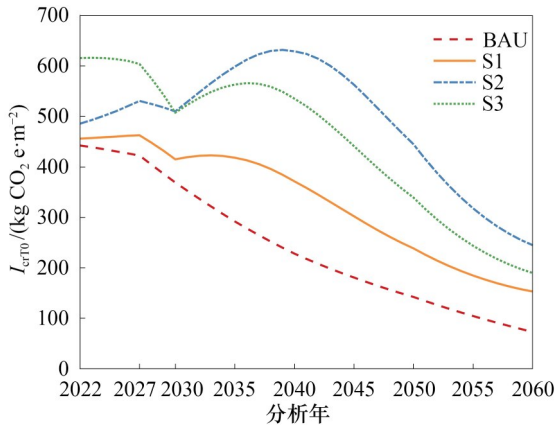


图6 新建结构全寿命期隐含碳排放总量限值

约新建结构建设的开展，也将阻碍满足结构安全性需求的设计实现；而其余3类情景的相应限值为153.1~245.0 kg CO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>，超过BAU情景对应限值的2倍，在碳中和所需减碳目标达成的同时仍可为建筑结构提供较充足的设计空间。因此，通过调控建筑结构总量减小空置率、倡导结构安全前提下的使用寿命延长、制约大拆大建等行业管理措施，可有效提升建筑结构减碳目标实现的科学性和可行性。

#### 四、讨论与建议

##### (一) 碳排放量的不确定性与实现概率控制

在建筑结构设计阶段的碳排放核算中，结构材料用量、施工过程和特征化因子的不确定性均使得结构隐含碳排放量化结果具有较为显著的随机性；上述量值受多随机变量叠加影响，可近似认为服从正态分布<sup>[26]</sup>。

在新建结构单体设计中，当考虑建筑结构隐含碳排放的随机性时，建议采用碳排放均值进行校核：

$$I_{dT0} = \mu_{I_T} / A_0 \quad (14)$$

式(14)中， $\mu_{I_T}$ 为 $I_T$ 的均值。此时，可保障减碳目标的实现概率不低于50%。由于结构单体建设碳排放略超限值的后果较小，调控重点为将建筑结构建设行业的平均碳排放水平控制在目标限值以下，因而采用均值校核可实现这一目的。

当需更严格（或更宽松）的措施保障减碳目标实现时，可结合对建筑结构隐含碳排放随机特征的更充分认知（仍假定碳排放量服从正态分布），采

用以下方式计算建筑结构隐含碳排放设计值：

$$I_{dT0} = (\mu_{I_T} + \Phi^{-1}(p_{lim}) \cdot \sigma_{I_T}) / A_0 \quad (15)$$

式(15)中， $\sigma_{I_T}$ 为 $I_T$ 的标准差； $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数的反函数； $p_{lim}$ 为碳排放超限概率限值。

以上给出建筑结构设计中，隐含碳排放定值化验算的基本思路；当考虑公式(10)中既有结构维护碳排放的随机性时，也可采用类似方法计算维护碳排放设计值。此外，本文预设的碳排放限值也可应用于更精细的概率化可持续性验算<sup>[26]</sup>。

##### (二) 碳排放限值的区域性差异

上述案例设定了我国建筑结构碳排放平均限值，然而不同地区人口规模、用地状况、经济发展、调控政策、技术水平等方面的差别，导致建筑结构建设行业碳排放呈现较为显著的区域性差异<sup>[27]</sup>。为公平调控各地区建筑结构建设的碳排放量级，建议采用平等碳排放权原则，依据地区人口和建设规模，调整建筑结构碳排放限值，即将既有结构单次维护作业碳排放验算（公式(10)）与新建结构设计隐含碳排放验算（公式(12)）分别调整为：

$$I_{dE} \leq \eta_D \times I_{crE0} \times A_E \times T_M \quad (16)$$

$$I_{dT0} \leq \eta_D \times I_{crT0} \quad (17)$$

式(16)、(17)中， $\eta_D$ 为碳排放限值的地区调节系数。建议采用如下方式计算：

$$\eta_D = A_T \times \frac{P_D}{P_T} \times \frac{1}{A_{TD}} = \frac{m_T}{m_D} \quad (18)$$

式(18)中， $A_{TD}$ 为分析年的分析地区建筑面积需求量； $P_T$ 和 $P_D$ 分别为分析年的中国总人口数和所分析地区人口数； $m_T$ 和 $m_D$ 分别为分析年的中国人均建筑面积和所分析地区人均建筑面积。

以上海地区为例，至2021年年底人均建筑面积达37.4 m<sup>2</sup>/人<sup>[28]</sup>；2021年全国人口数为14.13亿<sup>[19]</sup>，对应于表2中S1和S2情景采用的全国建筑面积总量可预估2021年全国人均建筑面积约为49.6 m<sup>2</sup>/人。由此，2021年的 $\eta_D$ 取值约为1.33，即大型城市建筑结构的集约化与减量化可赋予结构建设更宽裕的碳排放限值。当分析年变更时， $\eta_D$ 取值可依据相应分析年的城市规划与建设计划适当调整。

##### (三) 设计使用年限对碳排放限值的影响

建筑结构设计使用年限对其所允许碳排放限值



的影响体现在两个方面：设计使用年限决定预期需开展维护作业量，设计使用年限的变化影响未来建造活动的碳排放需求。为此，对设计使用年限有异于常规取值的新建结构，提出以下碳排放限值修正：

$$I_{\text{crT0}} = \begin{cases} I_{\text{crN0}} + \sum_{i=1}^{T_d} [I_{\text{crE0}}]_i - \sum_{j=1}^{T_{\text{db}}-T_d} \frac{1}{T_{\text{db}}} [I_{\text{crN0}}]_{T_d+j}, & T_{\text{db}} > T_d \\ I_{\text{crN0}} + \sum_{i=1}^{T_d} [I_{\text{crE0}}]_i + \sum_{j=1}^{T_d-T_{\text{db}}} \frac{1}{T_{\text{db}}} [I_{\text{crN0}}]_{T_d+j}, & T_{\text{db}} < T_d \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中， $T_{\text{db}}$ 为新建结构设计使用年限的常规取值； $T_d$ 为所分析新建结构的设计使用年限； $[I_{\text{crN0}}]_x$ 为新建结构建成后第 $x$ 年的单位建筑面积新建结构建造碳排放限值。

以本文前述案例为例，假定 $I_{\text{crN0}}$ 取值在2060年后保持稳定、 $T_{\text{db}}$ 取值为50年时，不同行业预估发展情景下，2022年新建结构隐含碳排放限值随结构设计使用年限的变化如图7所示。由此可见，上述的碳排放限值修正处理可赋予长寿命结构更宽松的碳排放限值，表征其预期削减结构新建量的效益，促进长寿命结构的建设。但应用中，与不同行业发展预估情景下，与建筑结构平均使用寿命预期变化相对应的 $T_{\text{db}}$ 取值还有待进一步研究确定。

#### (四) 碳排放限值实现可行性

由于当前混凝土结构建设的单位建筑面积碳排放通常高于钢结构、木结构或砌体结构<sup>[25]</sup>，上述评估方式将对混凝土结构方案的低碳优化提出更高的要求。此外，对中国典型混凝土建筑结构建造

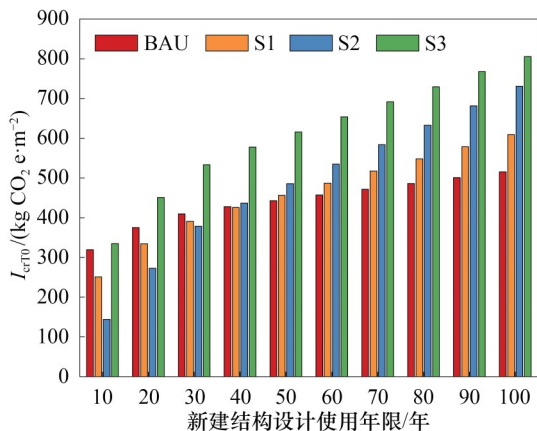


图7 新建结构隐含碳排放限值随设计使用年限变化

阶段的碳排放核算结果表明<sup>[29]</sup>，当前常规混凝土框架结构、剪力墙结构建造的碳排放水平约为400~531 kg CO<sub>2</sub>e·m<sup>-2</sup>，因而混凝土结构也可通过常规设计优化实现本文预设的2022年结构减碳目标；同时得益于碳排放限值校核强调碳排放量值的约束而非最小化优化，混凝土结构不至于在低碳设计中丧失竞争力，且有望加快资源化循环利用、低碳材料研发、新型减量化结构体系等低碳理论与技术在混凝土结构设计中的应用。

在既有结构低碳维护中，维护方案的决策参量包括：结构维护时间间隔，单次维护对应的碳排放。结构耐久性提升技术与便捷高效的修复加固技术可分别通过降低上述两类参数，促进既有结构维护的减碳目标实现。

此外，在“双碳”目标驱动下，其他行业的低碳转型成果还可进一步推动建筑结构减碳。建筑结构隐含碳排放主要来源于能源消耗与建材生产化学反应排碳。因此，能源结构调整与低碳转型、低碳/负碳建材研发、建材生产工艺优化与碳捕捉等都有望为未来建筑结构隐含碳排放的显著降低与减碳目标达成提供良好的可行性。

#### (五) 研究展望

由于不同类型建筑（例如公共建筑、住宅建筑）的可容纳人数和人均使用时长均存在很大差异，难以基于可服役人数统一设定碳排放限值；且结构设计中，服役人数取值的准确界定困难。因此，本文建议采用单位建筑面积碳排放限值的形式约束建筑结构碳排放。相应地，未来研究需进一步探索通过设定建筑容积率、建筑密度、使用年限等配套规划管理手段，限制大面积超标建筑的建设，促进碳排放权公平。

公式(4)中，采用系数 $\eta_N$ 抵偿结构新建量的预测偏差，但由于这一偏差形成复杂，不同分析年的准确取值存在困难，将影响结构碳排放限值计算结果的准确性。为进一步优化采用本文方法预设限值结果的准确性，仍有待不同社会发展情景下建筑结构需求相关参数及建筑结构保有量与组成等数据的完善，通过数据驱动分析开展进一步研判。在未来钢结构、木结构、组合结构等多类型结构推广背景下，建筑结构类型占比的变化及其对 $\eta_M$ 取值的影响也有待进一步研究。

由于未来建设涉及超高层、大型建筑结构的拆除,巨大拆除体量预期将造成与结构新建相当的碳排放量级,为促进拆除工程的低碳化演进<sup>[30]</sup>,建议在未来建筑结构建设的低碳设计中,进一步剖析拆除工程的碳排放特点,将拆除过程作为独立的校核对象开展分析与优化。

本文提出的预设方法填补了建筑结构基于碳排放设计的关键参数缺失,有望为今后相关建筑碳排放计算、分析与校核相关的技术标准提供科学依据。

## 五、结论

(1) 碳中和目标确定了逐年降低的社会碳减排定量要求,建筑结构隐含碳排放限值是保障建筑结构碳排放满足减碳需求的关键参数;建筑结构单体隐含碳排放在其全寿命期内呈现多离散峰值特点,为与社会减碳的连续路径匹配,建议从既有结构维护与新建结构建造并存的行业碳排放实际出发,将社会年度碳排放限值分解至建筑结构单体设计中。

(2) 依据社会发展对建筑结构总面积需求量的变化特点,预设建筑结构隐含碳排放总量占比状况,将社会碳排放限值分解至建筑结构隐含碳排放总量限值;通过预设建筑结构平均寿命变化趋势,基于历年建筑竣工面积记录,预估分析年所需新建结构建筑面积占当年社会建筑面积总量需求的比例,并将行业碳排放限值分解至结构维护与建造阶段,形成建筑结构碳排放限值的预设依据。

(3) 通过调研我国建筑结构建设行业发展特点,面向“双碳”目标的减碳需求构建行业发展情景,得出我国建筑结构碳排放限值的建议取值;以2022年为例,维持现状、常规预估、拆除限制、减量预估4类情景对应的设计使用年限为50年的新建结构隐含碳排放限值分别为 $442.6 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $456.2 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $485.9 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $616.0 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}$ ,既有结构维护年均碳排放限值分别为 $1.0 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $1.1 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $1.1 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $1.4 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ;在2022—2060年,上述4类情景对应的设计使用年限为50年的新建结构全寿命期隐含碳排放限值预期变化范围为 $72.8\sim 442.6 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $153.1\sim 462.8 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $245.0\sim 632.2 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $189.8\sim 616.5 \text{ kg CO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(4) 不同情景对应的碳排放限值差异表明,建筑结构建设维持现状的发展模式将使其减碳目标难以实现,并制约结构安全设计的开展。新建结构总量控制、既有结构延寿等行业管理措施均可有效放宽建筑结构单体设计中的碳排放限值,并降低建筑结构隐含碳排放总量在社会宏观碳排放中的占比,在为建筑结构提供更为充裕选择空间的同时,也可缓解结构建设及其他行业减碳压力,为“双碳”目标达成提供更优保障。

(5) 考虑隐含碳排放随机特征时,提出与碳排放超限概率限值匹配的碳排放量设计值计算与校核方案;考虑结构建设碳排放水平的区域性差异时,建议基于所分析地区与全国人均建筑面积比值进行碳排放限值调整;当建筑结构使用年限改变时,提出碳排放限值修正方案;相较于钢结构、木结构和砌体结构而言,混凝土结构面临更严峻的减碳挑战,亟待资源化循环利用、低碳混凝土材料研发、新型减量化结构体系等的研发与推广;而数据驱动的建筑结构保有量构成与新建需求量预估优化、约束大型建筑建设的减碳配套措施等仍有待进一步研究。

### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** February 15, 2022; **Revised date:** February 28, 2023

**Corresponding author:** Xiao Jianzhuang is a professor from the College of Civil Engineering of Tongji University. His major research fields include recycled concrete materials and structural foundation theory. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on Green Construction Development Strategy” (2022-XZ-21) and “Research on the Digital Development Strategy of the Construction Industry” (2022-XY-80)

### 参考文献

- [1] IPCC AR5. Climate change 2014: Synthesis report: Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [2] UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement [R]. Paris: United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015.
- [3] 中国建筑节能协会. 2021 中国建筑能耗与碳排放研究报告: 省级建筑碳达峰形势评估 [R]. 北京: 中国建筑节能协会, 2021. China Association of Building Energy and Emissions. 2021 China building energy consumption and carbon emissions research report: Evaluation of provincial building carbon peaking situation [R].

- Beijing: China Association of Building Energy and Emissions, 2021.
- [4] Dixit M K, Fernández-Solís J L, Lavy S, et al. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(6): 3730–3743.
- [5] Cao X Y, Li X D, Zhu Y M, et al. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 109: 131–143.
- [6] Akbarnezhad A, Xiao J. Estimation and minimization of embodied carbon of buildings: A review [J]. *Buildings*, 2017, 7(4): 5.
- [7] Ibn-Mohammed T, Greenough R, Taylor S, et al. Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 66: 232–245.
- [8] International Organization for Standardization. *Environmental management—Life cycle assessment principles and framework (ISO 14040)* [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
- [9] Kohler N, Lützkendorf T. Integrated life-cycle analysis [J]. *Building Research & Information*, 2010, 30(5): 338–348.
- [10] 肖建庄, 夏冰, 肖绪文, 等. 混凝土结构低碳设计理论前瞻 [J]. *科学通报*, 2022, 67: 3425–3438.
- Xiao J Z, Xia B, Xiao X W, et al. Prospects for low-carbon design theory of concrete structures [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67: 3425–3438
- [11] Hollberg A, Lützkendorf T, Habert G. Top-down or bottom-up?—How environmental benchmarks can support the design process [J]. *Building and Environment*, 2019, 153: 148–157.
- [12] Chandrakumar C, McLaren S J, Dowdell D, et al. A science-based approach to setting climate targets for buildings: The case of a New Zealand detached house [J]. *Building and Environment*, 2020, 169: 106560.
- [13] Hoxha E, Jusselme T, Brambilla A, et al. *Impact targets as guidelines towards low carbon buildings: Preliminary concept* [R]. Los Angeles: Passive and Low Energy Architecture, 2016.
- [14] United Nations Environment Programme. *2021 Global status report for buildings and construction: Towards a zero emission, efficient and resilient buildings and construction sector* [R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2021.
- [15] Xia B, Ding T, Xiao J Z. Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study [J]. *Waste Management*, 2020, 105: 268–278.
- [16] International Energy Agency. *Global energy review: CO<sub>2</sub> emissions in 2021* [R]. Paris: International Energy Agency, 2022.
- [17] 中国工程院. 我国碳达峰碳中和战略及路径 [R]. 北京: 中国工程院, 2022.
- Chinese Academy of Engineering. *China's carbon peaking, neutrality strategies and pathways* [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2022.
- [18] Liu Z, Deng Z, He G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 3(2): 141–155.
- [19] 国家统计局. 2021 年中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- National Bureau of Statistics. *China statistical yearbook 2021* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [20] Xi F M, Davis S J, Ciaia P, et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(12): 880–883.
- [21] Zhang X C, Liu K H, Zhang Z H. Life cycle carbon emissions of two residential buildings in China: Comparison and uncertainty analysis of different assessment methods [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 266: 122037.
- [22] Tae S, Baek C, Shin S. Life cycle CO<sub>2</sub> evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2011, 31(3): 253–260.
- [23] Gong T D, Zhang W J, Liang J H, et al. Forecast and analysis of the total amount of civil buildings in china in the future based on population driven [J]. *Sustainability*, 2021, 13(24): 14051.
- [24] World Bank Group. *China county climate and development report* [R]. Washington DC: The World Bank Group, 2022.
- [25] Chastas P, Theodosiou T, Kontoleon K J, et al. Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO<sub>2</sub> emissions of residential buildings [J]. *Building and Environment*, 2018, 130: 212–226.
- [26] Xia B, Xiao J Z, Ding T, et al. Probabilistic sustainability design of structural concrete components under climate change [J]. *Structural Safety*, 2021, 92: 102103.
- [27] Li H M, Qiu P, Wu T. The regional disparity of per-capita CO<sub>2</sub> emissions in China's building sector: An analysis of macroeconomic drivers and policy implications [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 244: 111011.
- [28] 上海市统计局, 国家统计局上海调查总队. 2021 年上海统计年鉴 [M]. 上海: 中国统计出版社, 2021.
- Shanghai Municipal Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics Shanghai Survey Team. *2021 Shanghai statistical yearbook* [M]. Shanghai: China Statistics Press, 2021.
- [29] Zhang X C, Wang F L. Assessment of embodied carbon emissions for building construction in China: Comparative case studies using alternative methods [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 130: 330–340.
- [30] 肖建庄, 曾亮, 夏冰, 等. 拆解工程学理论架构与基本方法 [J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(2): 197–206.
- Xiao J Z, Zeng L, Xia B, et al. Theoretical framework and fundamental method for deconstruction engineering [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(2): 197–206.