

# 超高层建筑的绿色低碳融合设计策略研究

李 婧

华东建筑设计研究院有限公司, 上海

收稿日期: 2023年3月26日; 录用日期: 2023年4月22日; 发布日期: 2023年4月29日

## 摘 要

在双碳的大背景下, 超高层建筑作为高耗能建筑, 需要在绿色低碳和经济效益中找到平衡点。本文提出了超高层建筑的低碳设计理念, 结合相关标准提出了超高层低碳技术框架和实施路径, 结合案例分析了技术路径中低碳技术的适用性, 最后以珠江城项目为例分析了低碳技术的具体应用情况。本文总结的技术路线和适应性技术可直接指导超高层建筑绿色低碳技术的选用, 为超高层建筑朝着绿色低碳方向发展提供有益的借鉴。

## 关键词

超高层建筑, 标准分析, 案例调研, 技术路径, 技术适应性

# Research on Green and Low Carbon Integrated Design Strategy for Super High Rise Buildings

Jing Li

East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai

Received: Mar. 26<sup>th</sup>, 2023; accepted: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2023; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In the context of dual carbon, super high-rise buildings, as high energy consuming buildings, need to find a balance between green, low-carbon and economic benefits. This paper puts forward the low-carbon design concept of super high-rise buildings, proposes the low-carbon technology framework and implementation path of super high-rise buildings in combination with relevant standards, analyzes the applicability of low-carbon technology in the technology path with cases, and finally analyzes the specific application of low-carbon technology with the Pearl River City project as

**an example. The technical routes and adaptive technologies summarized in this article can directly guide the selection of green and low-carbon technologies for ultra high-rise buildings, providing useful reference for the development of ultra high-rise buildings towards green and low-carbon direction.**

## Keywords

Super High-Rise Buildings, Standard Analysis, Case Study, Technical Path, Technical Adaptability

Copyright © 2023 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

2020年,中国向世界提出“力争于2030年前碳达峰,努力争取2060年前实现碳中和”。《中国建筑能耗研究报告(2021)》指出,2019年时我国建筑全过程碳排放占全国碳排放的50.6%。在建筑领域中,超高层建筑能耗高于一般大型公共建筑。研究表明,我国一般公共建筑能耗水平大约为20~60 kWh/m<sup>2</sup>,而超高层办公楼的能耗水平可高达约200 kWh/m<sup>2</sup>,是一般公共建筑的3~10倍[1],因而研究超高层建筑的低碳设计策略对于实现双碳目标具有重要意义。

目前国内外对于超高层建筑的绿色设计策略研究较多。国外发达国家对超高层建筑绿色设计的相关研究和工程实践起步较早,如SOM公司、福斯特公司、杨经文等设计建造了一大批超高层绿色建筑。国内的工程实践后来居上,目前全球已建成的300 M以上超高层建筑中,中国占近三分之一,其中较多都以中国绿建作为建设目标。

然而国内外对于超高层建筑的低碳设计策略研究却较为欠缺。CNKI数据库中收录的与“超高层建筑”、“绿色”相关的论文共计349篇,与“超高层建筑”、“低碳”相关的论文却仅有5篇。此外,虽然有较多关于超高层绿色建筑设计策略的论文,但这些研究多是总结工程实践中采用的绿色技术,缺少对绿色建筑和低碳建筑的关联性研究,且只有极少量的论文对技术之间进行了横向对比[2],难以直接指导工程实践选择适宜的技术。本文聚焦于超高层的低碳技术措施,通过标准和案例的研究分析了技术的适用性,以期超高层建筑低碳设计提供直接的参考和借鉴。

## 2. 绿色建筑与低碳建筑指标对比

绿色建筑在我国发展已久,2006年我国就颁布了第一部绿色建筑评价标准。目前我国超高层建筑可采用的绿色建筑评价体系包括:《绿色建筑评价标准》GB/T 50378-2019和《绿色超高层建筑评价标准》T/CECS 727-2020。后者相比于前者更加契合超高层建筑的特点。

当前我国低碳建筑评价体系还处于发展初期,目前国内已发布的碳排放相关标准主要有2部:《碳中和建筑评价导则》(第一版)和《建筑碳排放计算标准》GB/T 51366-2019。国标《零碳建筑评价标准》正在编制中,预示着低碳建筑评价体系在近年还将得到进一步的政策重视和发展完善。

本文以已发布的《绿色超高层建筑评价标准》T/CECS 727-2020 [3]和《碳中和建筑评价导则》(第一版) [4]为研究基准,尝试对比同类指标,见表1。绿色建筑有明确的推荐技术措施以指导建筑的设计、施工和运营,并以相应技术措施的选用情况作为评判依据。而低碳建筑不强调某一具体技术的选用,而是以建筑全生命周期的碳排放量作为评判原则。

**Table 1.** Comparison of indicators in Assessment Standard for Green Super High-Rise Building T/CECS 727-2020 and Assessment Guideline for Carbon-Neutral Building (First Edition)**表 1.** 《绿色超高层建筑评价标准》T/CECS 727-2020 和《碳中和建筑评价导则》(第一版)指标对比

| 《碳中和建筑评价导则》(第一版)                                      |   | 《绿色超高层建筑评价标准》T/CECS 727-2020 |  |
|---|---|------------------------------|--|
| 建筑性能要求(铂金)  | 具体措施  | 同类评分项指标                      | 绿建中建筑性能最高要求  |
| 建筑节能: 能耗强度比现行国家建筑节能标准要求降低 30%以上, 建筑负荷调节能力 $\geq 40\%$ | 4.1.2. 围护结构                                   | 5.2.12~5.2.14, 6.2.4         | 围护结构热工性能比现行国家建筑节能标准提高幅度达到 10%, 建筑供暖通风空调和照明系统能耗相比国家现行有关建筑节能标准降低 $\geq 15\%$                 |
|   | 4.1.3. 机电系统                                   | 6.2.5~6.2.9                  |  |
|   | 4.1.4. 能耗监测系统                                 | 9.1.1                        |  |
|   | 4.1.5. 分布式能源                                  | 8.2.1~8.2.7                  |  |
| 可再生能源电力替代率 $\geq 15\%$                                | 4.2.1. 太阳能光热、太阳能光伏、地源热泵、水源热泵、空气源热泵、生物质能以及风力发电 | 6.2.10~6.2.11                | 可再生能源提供的生活用热水比例 $\geq 15\%$ , 提供的空调用冷量和热量比例 $\geq 10\%$ , 等效太阳能光电板面积占建筑基地面积的比例 $\geq 20\%$ |
|   | 4.2.3. 运行管理系统                                 | 9.2.7                        |  |
| 绿色建材应用比例 $\geq 70\%$                                  | 4.3.1. 主体结构、围护墙和内隔墙、装修及其他                     | 4.2.8~4.2.11, 6.2.16~6.2.22  | 绿色建材应用比例 $\geq 50\%$   |
| 绿容率 $\geq 1.0$  | 4.3.2. 乔木、灌木、草地等                              | 7.2.8, 7.2.15                | 绿地率 $\geq 25\%$ , 裙房屋顶绿化率 $\geq 40\%$ , 裙房垂直绿化率 $\geq 10\%$ , 室内绿化率 $\geq 2\%$             |
| 碳排放抵消   | 6.1. 外部可再生能源使用                                | /                            | /  |
|   | 6.2. 碳信用与绿证                                   | /                            | /  |

从表 1 中可以看出,《绿色超高层建筑评价标准》T/CECS 727-2020 除了未提出购买外部可再生能源、碳信用和绿证外,能够基本涵盖《碳中和建筑评价导则》(第一版)中对应的建筑性能要求,两个标准具有明显的相似度。但在具体的指标要求上,《碳中和建筑评价导则》(第一版)的部分条款要求更高,如绿色建材的应用比例比绿建最高指标还高出 20%。《绿色超高层建筑评价标准》T/CECS 727-2020 的内容设定更为详细全面,还有较多与碳排放无关、但能提高规划设计和健康安全的条款。

表 1 为本文的超高层建筑绿色低碳设计策略提供了基础研究框架。低碳建筑以建筑全生命周期的碳排放量作为评判原则,在具体低碳技术定性选用上仍可继续参考绿色建筑的成熟技术。但在定量计算碳排放量时需要依据《碳中和建筑评价导则》(第一版) [4]和《建筑碳排放计算标准》GB/T 51366-2019 [5]的公式。此外,本文聚焦低碳设计策略,购买外部可再生能源、碳信用与绿证来抵消碳排放量的措施不在本文探讨范围内。

### 3. 超高层低碳建筑技术路径

超高层综合体对于可持续性来说既有有利因素又有不利因素。有利因素包括节约用地,减少交通需求,可进行功能复合和设施共用,在提升城市形象、拉动社会经济发展等方面发挥着重要的作用。不利因素包括形成“热岛效应”、光污染和高层风,需要大量的能耗来维持良好的室内空间环境和设备运行。

根据《碳中和建筑评价导则》(下文简称“碳中和导则”),建筑领域碳排放包括建材生产及运输、建造及拆除、运行等建筑全生命期内各个阶段的碳排放总量,其中运行阶段碳排放建筑全生命周期中占比最大,其次是建材生产及运输阶段的碳排放[6]。结合表 1 总结的技术路径,本文探讨超高层建筑在建材生产运输和运行两个阶段的低碳设计策略。

### 3.1. 建材生产运输阶段的低碳设计策略

建材生产运输阶段的碳排放包含建材原材料获取和上游生产、原材料运输至建材加工生产地及建材加工制造过程消耗能源所释放的二氧化碳。“碳中和导则”提供了具体的碳排放量计算公式[4]。

$$C_{JC} = \sum_i C_{jc,i} \quad (1)$$

$$C_{jc,i} = \sum_j C_{rm,j} + \sum_j M_{rm,j} D_j T_j + \sum_j E_{jc,j} EF_j \quad (2)$$

其中,  $C_{JC}$ 代表建材在生产阶段的碳排放量,  $C_{jc,i}$ 和  $C_{rm,j}$ 分别代表第  $i$  中建材的产品碳排放量和第  $j$  种原材料的产品碳排放量,  $M_{jc,j}$ 代表第  $i$  种建材生产用第  $j$  种原材料的重量,  $D_j$ 代表第  $i$  种建材生产用第  $j$  种原材料的平均运输距离,  $T_j$ 代表第  $i$  种建材生产用第  $j$  种原材料的平均运输距离,  $E_{jc,j}$ 代表第  $i$  种建材生产用第  $j$  种原材料的平均运输距离,  $EF_j$ 代表第  $i$  种建材生产制造过程使用的第  $j$  种能源的碳排放因子。

结合公式(1)和(2), 为了降低建材生产运输阶段的碳排放, 超高层建筑应从“节材”和“本地化”两方面实现低碳设计。参考绿色建筑设计措施, “节材”可包括: 结构优化节材, 材料循环利用, 土建装修一体化, 大空间设计, 采用高性能建材和具有 EPD 环境产品声明的绿色建材等, 最终目的是减少建材用量。“本地化”指优先采用本地化建材, 从而减少建材的运输距离。

### 3.2. 建筑运行阶段的低碳设计策略

建筑运行阶段碳排放计算范围应为建设工程规划许可证范围内能源消耗产生的碳排放量和可再生能源及碳汇系统的减碳量, 具体包括暖通空调、生活热水、照明及电梯、可再生能源、建筑碳汇系统等[5]。本文依据《建筑碳排放计算标准》GB/T 51366-2019 分析运行阶段碳排放, 包含可再生能源和碳汇系统的减碳量。建筑运行阶段的碳排放计算公式为[5]:

$$C_M = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (E_i EF_i) - C_p \right] y}{A} \quad (3)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - ER_{i,j}) \quad (4)$$

其中:  $C_M$ 代表建筑运行阶段单位建筑面积碳排放量,  $E_i$ 代表建筑第  $i$  类能源年消耗量,  $EF_i$ 代表第  $i$  类能源的碳排放因子,  $E_{i,j}$ 代表  $j$  类系统的第  $i$  类能源消耗量,  $ER_{i,j}$ 代表  $j$  类系统消耗由可再生能源系统提供的第  $i$  类能源量,  $C_p$ 代表建筑绿地碳汇系统年减碳量,  $A$ 代表建筑面积。

结合公式(3)和(4), 为了降低运行阶段碳排放, 超高层建筑应从“减荷”、“提效”和“碳抵消”三方面实现低碳设计。“减荷”指的是被动式设计节能, 包括微环境设计、建筑本体设计、围护结构节能和热桥气密性处理, 约可实现节能 15%的目标。“提效”指的是采用高性能机电设备、节能照明和电梯等措施, 约可实现节能 20%的目标。“碳抵消”指的是可再生能源和碳汇抵消, 并通过能耗监测和运行管理系统实现节能 15%~30%的目标。欧洲部分零能耗和零碳建筑就是靠被动式技术和可再生能源实现的。

## 4. 绿色低碳适用性技术分析

前文分别阐述了超高层建筑低碳设计的基础框架和技术路径, 本节从实际项目出发, 汇总分析了共 15 个已建成的 200 米以上超高层建筑项目案例。案例均以“绿色”、“可持续”等作为搜索关键词, 包括了 10 个国外案例, 5 个国内案例。为了体现对低碳技术实用性的分析, 案例均为已建成案例。

如第 2 节所述, 超高层建筑的低碳设计技术路线共归纳出 5 大类, 包括节材、本地化、减荷、提效和碳抵消。在进行案例分析的时候, 将对应技术分别归入相应大类中, 并统计每种技术的应用比例, 见

表 2。从表中可以发现节材、围护结构节能、设备提效是应用最为广泛的低碳技术措施。需要说明的是，随着新技术的不断推广运用，可再生能源的虽然在这些案例中总体应用比例不高，但是新建成的案例基本均采用了可再生能源利用。

**Table 2.** Application statistics of low carbon technical measures for super high rise buildings

**表 2.** 超高层建筑的低碳建筑技术措施应用统计

| 减碳阶段     | 类别 | 低碳技术措施                   | 应用比例    |        |
|----------|----|--------------------------|---------|--------|
| 建材生产运输阶段 | 节材 | 体型结构优化                   | 100%    |        |
|          |    | 土建装修一体化                  | 53.30%  |        |
|          |    | 工业化部品(轻质隔墙等)             | 100%    |        |
|          |    | 可再利用可再循环材料               | 100%    |        |
|          |    | 高性能材料等                   | 100%    |        |
| 运行阶段     | 减荷 | 海绵城市                     | 6.67%   |        |
|          |    | 围护结构节能<br>(保温、隔热、遮阳、气密性) | 100.00% |        |
|          |    | 自然采光                     | 40.00%  |        |
|          | 提效 | 自然通风                     | 20.00%  |        |
|          |    | 高性能机电设备                  | 100.00% |        |
|          |    | 节能照明                     | 100.00% |        |
|          |    | 电梯                       | 100.00% |        |
|          |    | 立体绿化                     | 33.33%  |        |
|          |    | 碳抵消                      | 风能      | 26.67% |
|          |    |                          | 太阳能     | 26.67% |
|          |    | 地热能                      | 13.33%  |        |

注：由于本地化材料的数据不全，无法统计。

#### 4.1. 建材生产运输阶段的适应性低碳技术

表 2 中统计的案例均考虑了“节材”措施，其中使用最多的技术包括：结构优化、工业化部品、可再利用可再循环材料和高性能材料。由于超高层建筑耗材巨大，在设计中通常都需要进行结构优化，可节省结构用材，如上海中心大厦通过结构优化将建筑最终外型设计成螺旋上升的圆形外立面型式，有效地将风荷载对结构的影响降低了 30%左右[7]，节约了大量结构材料。超高层建筑应尽量采用土建装修一体化和大空间设计，能够有效减少建筑施工过程中的材料浪费，降低建筑成本。要尽量使用可循环利用的建筑材料，例如，玻璃、铝合金、钢等。可以使用利废建材，充分发挥可循环建筑材料的经济效益，如纽约时报大厦回收使用的结构用钢超过了 95%。

#### 4.2. 建筑运行阶段的适应性低碳技术

表 2 中统计的案例全部采用了“减荷”措施，其中使用最多的技术为围护结构性能提升。超高层建筑立面面积可达建筑表面积的 90%以上，提高围护结构的热工性能可有效降低运行阶段能耗。

表 3 以夏热冬冷地区为例, 对其围护结构的节能可行性进行了分析。表格中的参数在《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB 55015 基础上提升 20%, 满足绿建三星要求。通过表 2 总结的案例特点可以看出提升墙体和屋面的热工性能较容易实现, 最难的是提升玻璃幕墙的热工性能, 这主要是由造价决定的。提高玻璃幕墙的热工性能对于降低建筑全寿命周期的碳排放具有显著作用, 但该措施对技术、成本要求较高。

**Table 3.** Comparison of energy saving technologies for enclosure structures [8]

**表 3.** 围护结构节能技术比选[8]

| 序号 | 节能技术 | 参数要求   | 其他技术措施                     | 难易程度 |
|----|------|--|----------------------------|------|
| 1  | 玻璃幕墙 | 传热系数 $K \leq 1.44 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ | 采用双层幕墙、空调温感器等              | 难    |
| 2  | 墙体   | 传热系数 $K \leq 0.64 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ | 采用气凝胶材料等                   | 容易   |
| 3  | 屋顶   | 传热系数 $K \leq 0.32 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ | 屋顶采用高反射涂料                  | 容易   |
| 4  | 遮阳   | SHGC $\leq 0.16$   | 与方案结合的固定外遮阳, 中置遮阳, 热致调光玻璃等 | 较难   |
| 5  | 自然采光 | 内区采光系数满足采光要求的面积比例达到 60%                                  | 设置采光中庭、边庭、控制房间进深等          | 较难   |
| 6  | 自然通风 | 过渡季典型工况下主要功能房间平均自然通风换气次数不小于 2 次/h 的面积比例达到 70%            | 采用幕墙通风器、呼吸式可开启幕墙、低层开窗      | 难    |

表 2 可以看出超高层建筑全部采用了高效机电设备。在超高层建筑中, 供暖空调、照明和电梯的能耗巨大, 特别是空调系统能耗可达建筑总能耗的 35%。表 4 结合表 1 中的绿建技术措施总结了超高层建筑中适宜的空调系统节能技术。

**Table 4.** Comparison of energy saving technologies for air conditioning systems

**表 4.** 空调系统节能技术比选

| 序号 | 节能技术                  | 应用要求          | 难易程度           |
|----|-----------------------|---------------|----------------|
| 1  | 较高能效的供暖空调系统冷、热源机组     | 选择高效设备        | 技术容易, 但受增量成本影响 |
| 2  | 降低供暖空调系统的末端系统及输配系统的能耗 | 选择高效设备        | 技术容易, 但受增量成本影响 |
| 3  | 全空气系统具有可变新风比功能        | 对管道、取风口等提出要求  | 较难, 受土建条件限制    |
| 4  | 采用节能型设备及节能控制措施        | 选择高效设备        | 技术容易, 但受增量成本影响 |
| 5  | 采用能量回收、蓄冷蓄热、余热废热利用技术  | 取决于地理条件、电价特点等 | 难, 受项目区位影响     |

不同地区的可再生能源利用条件不同, 设计方案应遵循因地制宜的原则, 优选出符合本项目的能源利用方式。超高层建筑顶部风压较大, 可利用通过风洞的高层风进行风力发电, 如迪拜 10 MW 大厦充分考虑当地特点, 借助于 5 兆瓦风力涡轮机和 3 兆瓦的太阳能收集系统, 这栋 50 层高的建筑的发电量是其实际需要的十倍[9]。可再生能源系统十分复杂, 超高层建筑应设置运行管理系统, 并需要专业团队进行

运行调试。考虑到超高层综合体项目规模巨大，设计、施工到投入使用再到完全运转使用的周期往往较一般项目更长，因此要求在进行低碳设计时要具有一定的前瞻性。

## 5. 案例分析

珠江城大厦位于广州珠江新城，由美国 SOM 设计，见图 1。该项目用地面积约 1.06 万  $\text{m}^2$ ，建筑面积约 22 万  $\text{m}^2$ ，包括 309.4 m 高 71 层的塔楼和 3 层裙楼。项目充分利用广州地区气候特点，以“零能耗”作为最高设计目标，在建成之初就被称为“世界最节能环保的摩天大厦”。与第 3 节提出的低碳技术措施一致，珠江城大厦主要通过节材、围护结构节能、设备提效和可再生能源利用实现低碳超高层建筑，与同等规模的其他建筑相比，珠江城大厦的总能耗可以减少 58% [10]。



Figure 1. Picture of Pearl River Tower in Guangzhou

图 1. 广州珠江城大厦实景图

### 1) 体型结构优化

项目进行了体型和结构优化。珠江城大厦体态呈流线型。大厦外立面在设备层 24 层与 50 层各设置一对贯穿南北的风洞，风洞的设计减缓了风力对建筑的横向冲击，从而降低了建筑对钢材与混凝土的用量，相应的也较少了建材生产运输阶段的碳排放量。

### 2) 围护结构节能技术

广州地处夏热冬暖地区，夏季炎热，建筑遮阳技术是该地区节能技术的重要组成部分。为了起到降低运行阶段碳排放的目的，珠江城项目南、北立面采用内呼吸双层玻璃幕墙、中空 Low-E 玻璃、电动遮阳百叶等，提升围护结构热工性能。双层玻璃幕墙同时也具有自然采光和自然通风效果好等特点，如项目可根据气候与天气条件的变化统一智能控制空腔内遮阳百叶，将自然光引入办公室。

### 3) 高效机电设备

珠江城项目使用了辐射制冷带置换通风系统，充分应用了先进的革新技术，包括：冷却盘管冷凝水回收、热冷回收以及高效加热和制冷机房等，可以在整体节能率上达到 46%左右[11]。冷辐射吊顶使用范围为 9~58 层的标准层，面积共 35,000  $\text{m}^2$ 。由于温差不同，在空调的冷负计算上可以节省 25%的能耗。冷辐射吊顶不仅节能，还可以节省材料，吊顶系统可以使层高降低，增加了室内空间的利用率。

#### 4) 建筑光伏一体化

广州地区在 6 至 10 月的太阳辐射充足, 适合利用太阳能。珠江城大厦采用了建筑光伏遮阳一体化设计, 见图 2。太阳能光伏发电系统设在珠江城东西两个侧面的 31~70 层所有遮阳百叶的上半部分以及屋顶玻璃位置。东西两侧系统采用“5 mm 超白钢化玻璃 + PVB 膜 + 硅电池片 + 5 mm 普通钢化玻璃”组成的光伏组件, 用以取代位于建筑东西两侧水平机翼型遮阳板的上半部分[12]。在采光顶位置采用光伏组件替代原有建筑材料, 既能利用太阳能电池片达到遮阳效果, 又不会对室内及室外产生眩光影响。这种立面做法适应广州地区东西向时段太阳高度角较低的气候特点, 保证了视线通畅, 遮挡了大量太阳辐射, 确保电池板有充足的受光时间, 从电池板面积与发电时间上保障了建筑整体的太阳能发电效率。在经济效益方面, 整个光伏系统总功率为 24 KWp, 系统输出电量为 20164.4 KWh/年。按照 25 年的使用期限可累计发电约  $50.41 \times 10^4$  KWh, 比传统的发电模式节约电费 50 万元[11]。



Figure 2. Solar shading BIPV facade in east and west facades [12]  
图 2. 东西立面中的太阳能遮阳 BIPV 立面[12]

#### 5) 屋面风能一体化

珠江城项目在设备层 24 层与 50 层的风洞内安装了 4 个垂直轴风涡轮发电机, 见图 3。垂直轴风机可以适应广州不同的季候风风向, 其最低启动发电机风力仅需 2.7 m/s, 设备运行噪声较小, 对上下楼层影响低, 维护方便。据测算, 4 台风机每年可产电 20 多万度, 节约电费约 17 万元, 节能 20% [12]。



Figure 3. Wind power generation technology and architectural integration design  
图 3. 风力发电技术与建筑一体化设计

## 6. 结语

超高层建筑能耗巨大,但其又适应了城市发展需要。在当前国家双碳发展的整体格局下,更要在绿色低碳和经济效益中找到平衡点。本文以《绿色超高层建筑评价标准》T/CECS 727-2020、《碳中和建筑评价导则》(第一版)和《建筑碳排放计算标准》GB/T 51366-2019 为基准确定了研究基础框架和低碳技术路线,通过案例调研总结分析了低碳技术的适应性,指出在具体低碳技术选用上仍可继续参考绿色建筑的成熟技术,具体包括5大类21种技术措施,并对具体技术的选用提出了指导建议,最后通过具体案例分析了低碳技术的应用情况。这五大类技术中,节材、围护结构节能、设备提效、可再生能源利用是超高层建筑主要采用的较为成熟的低碳技术措施。本文总结的技术路线和适应性技术可直接指导超高层建筑绿色低碳技术的选用,为超高层建筑朝着绿色低碳方向发展提供有益的借鉴。

## 参考文献

- [1] 韩继红, 范宏武, 孙桦. 中国超高层建筑的绿色低碳之路——思考与实践[C]//中国城市科学研究会. 第六届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集. 2010: 263-268.
- [2] 郑凯竞. 超高层城市综合体绿色建筑技术与设计研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国建筑设计研究院, 2014.
- [3] 中国工程建设标准化协会. 绿色超高层建筑评价标准 T/CECS 727-2020 [EB/OL]. <http://www.cecs.org.cn/xhbz/fbgg/11249.html>, 2023-04-20.
- [4] 中国城市科学研究会. 碳中和建筑评价导则(第一版) [EB/OL]. <http://www.chinasus.org/index.php?c=content&a=show&id=997>, 2023-04-20.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
- [6] 刘剑. 基于案例分析的低碳建筑特征及其实施策略研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(2): 39-42+57.
- [7] 韩继红, 范宏武, 方舟, 孙桦. 对中国超高层建筑实现绿色低碳发展的思考 and 实践[J]. 建筑, 2010(10): 17-19.
- [8] 孙大明, 田慧峰, 周志仁. 绿色超高层建筑设计的重点与难点探讨[C]//中国城市科学研究会, 中国建筑节能协会. 城市发展研究——第7届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集. 2011: 40-44.
- [9] 陈桐. 超高层建筑发展趋势研究初探[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国建筑设计研究院, 2017.
- [10] 刘蕾. 超高层建筑的绿色设计策略研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [11] 朱锵鸣. 珠江城超高层建筑项目低碳节能技术的探讨[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [12] 邓孟仁. 岭南超高层建筑生态设计策略研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2017.