

低碳、近零碳、零碳公共建筑碳排放控制指标研究

张时聪^{1,2}, 王珂^{1,2}, 徐伟^{1,2}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 建科环能科技有限公司, 北京 100013)

[摘 要] 公共建筑功能类型复杂, 碳排放强度受能源结构、气候区、建筑类型等多种因素影响, 其碳排放量差别较大, 如何科学设定不同气候区不同类型建筑的低碳、近零碳、零碳排放控制指标是引导公共建筑减碳的重要基础性工作。本文首先系统分析了 GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》、GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》、GB/T 51350—2019《近零能耗建筑技术标准》之间相对节能比例、运行参数、能耗限值的联系, 在此基础上分别研究了提升建筑能效和提升可再生能源应用对公共建筑减碳的量化影响, 并提出了低碳、近零碳、零碳公共建筑分级控制指标约束方法与数值建议。结果表明: 提升建筑能效至超低能耗建筑能效水平可使得各气候区、各类公共建筑碳排放强度较基准建筑下降 30%~40% 以上; 若在建筑达到近零能耗建筑能效指标的基础上进一步增加建筑可再生能源应用, 相对于基准建筑的减碳率可再增加 15%; 以 GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》中各类公共建筑全口径碳排放强度为基准值, 以实现零碳排放为目标值, 将公共建筑碳排放分为低碳、近零碳、零碳三级进行引导, 采用相对减碳率或碳排放强度绝对值进行约束, 则不同气候区低碳建筑相对减碳率建议为 30%~40%, 近零碳建筑相对减碳率建议为 45%~55%, 并从建筑类型、气候区、太阳能资源分区分别提出碳排放强度绝对值建议。

[关键词] 低碳建筑; 近零碳建筑; 零碳建筑; 公共建筑; 控制指标

[中图分类号] TU831 **[文献标识码]** A

Research on Carbon Emission Control Index of Low-carbon, Nearly Zero-carbon and Zero-carbon Public Buildings

ZHANG Shicong^{1,2}, WANG Ke^{1,2}, XU Wei^{1,2}

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. Jianke EET Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: The functional types of public buildings are complex, and their carbon emission intensity is affected by a variety of factors such as energy structure, climate zone, and building type, leading to large differences in their carbon emissions. How to scientifically set the low-carbon, nearly zero-carbon, zero-carbon control index of different types of buildings in different climate zones is an important fundamental work to guide the carbon reduction of public buildings. This paper analyzed the relationship between the relative energy saving ratio, operating parameters, and energy consumption limits among GB 50189—2015 “Design Standard for Energy Efficiency of Public Buildings”, GB 55015—2021 “General Code for Energy Efficiency and Renewable Energy Application in Buildings”, and GB/T 51350—2019 “Technical Standard for Nearly Zero Energy Buildings”. It further studied the quantitative impact of improving building energy efficiency and increasing the proportion of renewable energy on the carbon reduction of public buildings, and proposed the constraint method and numerical suggestions for the classification control index of low-carbon, nearly zero-carbon and zero-carbon public buildings. The results show that the improvement of building energy efficiency to ultra-low energy consumption can reduce the carbon emission intensity of public buildings in each climate zone and all types of public buildings by more than 30%~40% compared with the benchmark buildings. If the renewable energy application of the building is strengthened on the basis of reaching the nearly zero-energy building index, the carbon reduction rate of the benchmark building can be

[收稿日期] 2022-11-28 **[修回日期]** 2022-12-15

[基金项目] 国家重点研发计划项目“零碳建筑控制指标及关键技术研究与应用”(编号:2022YFC3803300);住房和城乡建设部研究开发项目“零碳建筑定义与指标体系研究”(编号:K20221910);中国建筑科学研究院有限公司基金“居住建筑和公共建筑低碳、碳中和设计方法与关键技术研究”(20220109330730005)

[作者简介] 张时聪(1981-),男,博士,研究员

[联系方式] zhangshicong01@126.com

[编辑部收稿邮箱] bjb365@126.com;bjb365@vip.126.com

further increased by 15%. The full-diameter carbon emission intensity of various public buildings under the GB 55015—2021 “General Code for Energy Efficiency and Renewable Energy Application in Buildings” is taken as the base value, and the carbon emission of public buildings is divided into three levels: low-carbon, nearly zero-carbon and zero-carbon for target guidance, and the relative carbon reduction rate or absolute carbon emission intensity is used for constraint. The relative carbon reduction rate of low-carbon buildings should be 30% ~ 40% in different climate zones, and the carbon reduction rate of nearly zero-carbon buildings should be 45% ~ 55%. The absolute carbon emission intensity recommendations were given respectively from building types, climate zones, and solar energy resource zones.

Keywords: low-carbon building, nearly zero-carbon building, zero-carbon building, public building, control index

0 引言

我国城镇公共建筑的面积规模和单位面积能耗随着城镇化率的提升而大幅增加。2021 年,公共建筑面积为 140 亿 m^2 , 占全国建筑面积总量 20%, 而建筑能耗占全国建筑运行能耗的 37%, 碳排放占全国建筑运行碳排放 35%^[1]。推动低碳公共建筑规模化发展是城乡建设领域尽早实现达峰目标的重点内容。我国《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》^[2]、《2030 年前碳达峰行动方案》^[3]、《城乡建设领域碳达峰实施方案》^[4] 提出推动低碳建筑规模化发展, 鼓励建设零碳建筑, 制定完善零碳建筑标准。

2021 年, 住房和城乡建设部立项国家标准《零碳建筑技术标准》(后文统称为《标准》), 通过《标准》确定公共建筑碳排放的分级控制指标是推动低碳建筑健康发展的重要技术工作, 但公共建筑功能类型复杂, 其能耗强度受建筑面积、建筑类型、运行方式等多种因素影响^[5], 不同类型、气候分区下的建筑终端能耗组成比例存在差别, 导致公共建筑碳排放强度差别巨大, 难以通过单一控制指标进行约束, 因此需要结合各地的气候条件、建筑用能特点, 提出与气候相适应的低碳技术路径与碳排放控制指标。

本文针对公共建筑碳排放指标研究存在空白、零碳建筑指标体系缺失等问题, 提出了以强制性工程建设规范 GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》为基准的低碳、近零碳、零碳建筑碳排放分级控制指标确定方法, 首先明确了建筑碳排放与建筑节能标准中能耗计算边界的差异, 系统研究了节能与减碳率之间的等效转换关系与关键影响因素, 量化分析了建筑节能与可再生能源应用的

综合影响与潜力, 最终提出适用于各气候区和太阳能资源分区、各建筑类型的碳排放控制指标建议。

1 公共建筑碳排放控制指标重点问题分析

1.1 碳排放计算边界

建筑运行阶段由能源消耗引起的碳排放包括供暖、通风、空调、照明、生活热水、电梯、插座和炊事用能引起的全部直接和间接排放^[6]。强制性公共建筑节能标准是以 20 世纪 80 年代建造的建筑能耗水平作为基准的节能率评价方法, 计算边界包括供暖、通风、空调和照明能耗(后文统称“基础计算边界”)^[5]。2019 年颁布的引领性建筑节能标准 GB/T 51350—2019《近零能耗建筑技术标准》^[7]增加了生活热水与电梯用能(后文统称“扩展计算边界”)。炊事与插座用能(后文统称“用户型计算边界”)虽然是各类建筑终端能耗的重要组成部分, 而由于炊事、插座能耗与用户使用习惯相关度较大, 因此强制与引领性节能标准均未将此部分计入。对于零碳建筑, 计算边界应与《城乡建设领域碳达峰实施方案》^[4]的核算范围保持一致, 在 GB/T 51350—2019《近零能耗建筑技术标准》基础上将常规性炊事与插座用能纳入, 并引导用户选用更高能效等级的电器设备。需要说明的是, 本文的建筑碳排放指运行阶段的全口径碳排放。

1.2 建筑节能标准的减碳关系

表 1 列出了各类建筑节能标准之间的能耗与碳排放相对关系, 其中 GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》较 GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》的基础计算边界能效提升 20%, 其他部分未计入节能贡献。GB/T 51350—2019《近零能耗建筑技术标准》较 GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》的基准计算边界与扩展

计算边界能效提升 50%~60%。超低、近零能耗建筑作为极高能效的建筑,因一次能源消耗大幅下降,等效碳排放强度显著降低,可将各标准之间的节能

减碳关系作为碳排放分级控制指标制定的数值依据。

表1 公共建筑建筑节能标准的节能减碳关系

标准	计算指标	符号	全口径能耗/碳排放关系
GB 50189—2015 《公共建筑节能设计标准》	GB 50189 全口径能耗	E_{50189}	$E_{A,50189} + E_{B,50189} + E_{C,50189}$ (1)
GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》	GB 55015 全口径能耗	E_{55015}	$E_{A,55015} + E_{B,55015} + E_{C,55015} =$ $(1 - 20\%)E_{A,50189} + E_{B,50189} + E_{C,50189}$ (2)
	GB/T 51350 全口径能耗	E_{51350}	$E_{A,51350} + E_{B,51350} + E_{C,51350} = (1 - 50\%)$ $E_{(A+B),50189} + E_{C,50189}$ (3)
GB/T 51350—2019 《近零能耗建筑技术标准》	GB/T 51350 相对于 GB 55015 节能率	η_E	$1 - \frac{E_{51350}}{E_{55015}}$ $= 1 - \frac{(1 - 50\%)E_{(A+B),50189} + E_{C,50189}}{(1 - 20\%)E_{A,50189} + E_{B,50189} + E_{C,50189}}$ (4)
	GB/T 51350 相对于 GB 55015 减碳率	η_C	$1 - \frac{C_{51350}}{C_{55015}}$ (5)

1.3 控制指标制定依据

能效提升与用能结构调整是降低建筑碳排放最重要的两条技术路径。国际上通常认为充分利用建筑场地内及周边可再生能源和碳汇,结合碳抵消机制,使得碳排放总量小于等于零即可称为零碳。英国建筑研究院环境评估方法 (Building Research Establishment Environmental Assessment Method, BREEAM) 建筑评估体系在能源部分对建筑碳排放提出要求^[8],美国绿色建筑委员会推出的 LEED Zero Carbon 认证体系,要求建筑通过可再生能源替代建筑剩余能源需求,加拿大绿色建筑委员会对零碳建筑本体的能源需求做出限值规定^[9],英国要求建筑应尽可能的减少能源需求和消耗并优先考虑现场可再生能源。美国“Architecture 2030”出台的 Zero Code 2.0^[10]中要求建筑自身为高能效的建筑,并就地产生或者购买足够的无碳可再生能源。

国际相关零碳标准与评价体系均认为零碳建筑应充分发挥建筑节能与可再生能源利用的减碳潜力,并未对零碳建筑进行分级认证。而我国各类公共建筑能效等级提升与可再生能源应用的减碳潜力尚未有量化研究,且由于同时发挥建筑节能与可再生能源产能替代的实现难度较大,不利于零碳建筑的大规模推广。若结我国国情,将公共建筑碳排放分为低碳、近零碳、零碳三级进行目标引导,在技术可行的前提下对不同等级目标的实现难度进行划

分,则可以逐步推动建筑领域的绿色低碳发展。指标制定依据如图1所示。

1) 确定减碳计算基准。2022年实施的 GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》作为现行全文强制性建筑节能标准,对零碳建筑分级目标引导具有重要意义,因此可将 GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》作为比较基准。

2) 全口径碳排放计算。以现行国家标准为依据,计算各类建筑包含供暖、通风、空调、照明、生活热水、电梯、插座和炊事用能引起的全部碳排放,其中供暖、通风、空调、照明能耗数据取自国家标准,其能效指标均根据标准编制过程中的能耗模拟数据所得,因此本文不再详细赘述。

3) 不同建筑能效提升与可再生能源应用下的公共建筑碳排放水平研究。超低、近零能耗建筑代表节能技术集成后的能效最优解,在此基础上提升建筑终端用能中的可再生能源比例,从而得出公共建筑通过技术手段可实现的最低排放水平,作为建筑碳排放分级控制指标的制定依据。

4) 低碳、近零碳、零碳建筑分级控制指标确定。在计算得出各类建筑的基准与最大减碳潜力后,如何确定分级控制指标的约束方式与取值是提升《标准》适用性的重点内容。

综上所述,本文通过计算各类公共建筑的最大

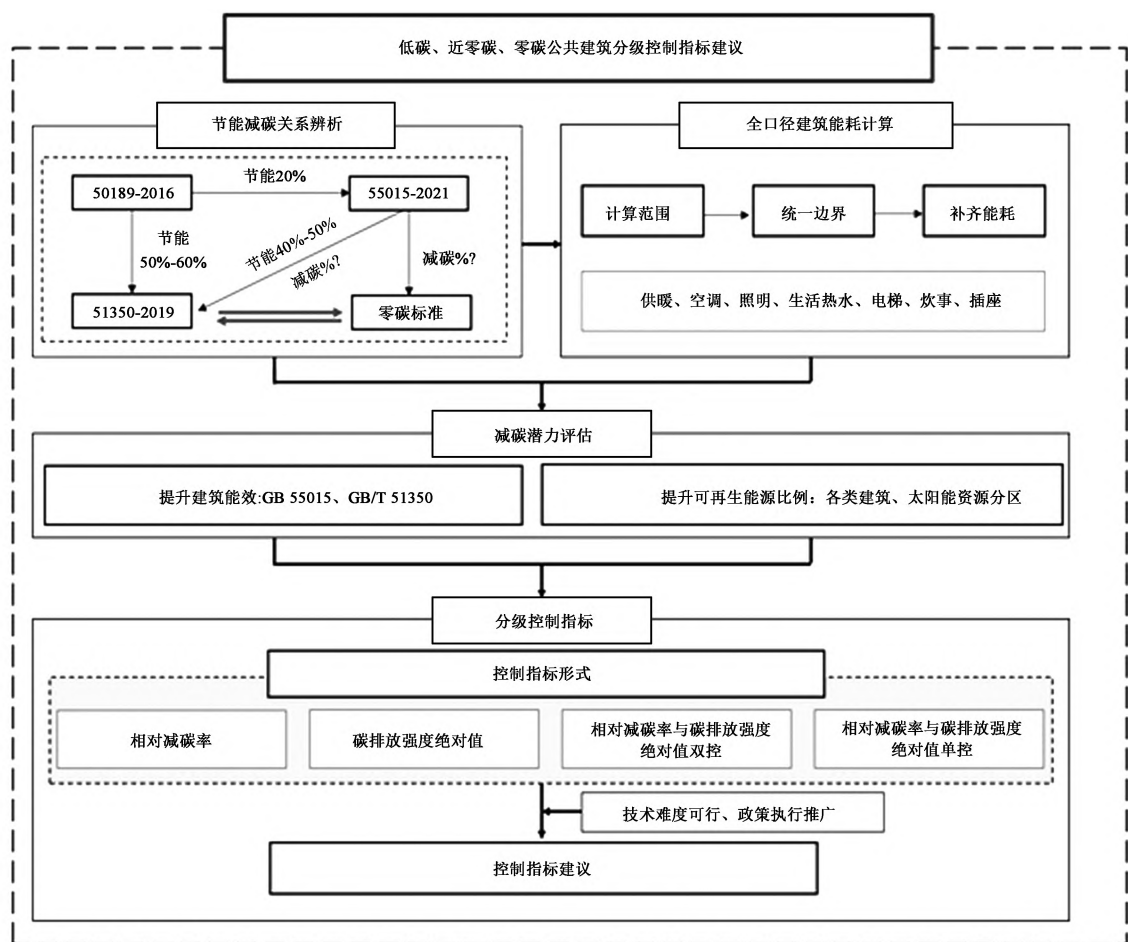


图 1 公共建筑碳排放控制指标确定方法与依据

减碳潜力,并针对指标形式的可行性与适用性进行分析,提出具体控制指标数值建议。

1.4 控制指标形式

控制指标形式可采用相对减碳率或碳排放强度绝对值指标进行约束,两种形式各有优势与操作层面的阻碍。相对指标则沿用建筑节能体系的评价方式,以设计建筑相对于基准建筑的减碳率作为控制指标,绝对值指标则给出分气候区、分建筑类型的建筑碳排放强度。若仅采用碳排放强度绝对值对低碳、近零碳建筑进行判定,较难覆盖类型复杂的全部公共建筑,需要对建筑类型进行细化,且不可避免的会出现部分建筑实施各类低碳技术措施后仍无法满足控制指标的情况。相对减碳率虽能避免指标过于复杂的问题,但不能直观体现建筑实际排放水平。而相对减碳率与碳排放强度绝对值结合可同时体现建筑自身排放水平与减碳潜力。

表 2 低碳、近零碳、零碳建筑碳排放分级

控制指标约束方式

约束指标	可操作性	障碍分析
相对减碳率	避免约束指标过于复杂	较宽松,行业缺乏各类建筑碳排放水平参考值
碳排放强度绝对值	直观体现建筑排放水平	覆盖全部建筑类型,则指标制定过细
相对减碳率与碳排放强度双控	全面约束建筑排放水平	为提高指标适用性,绝对与指标均较宽松,建筑减碳约束性降低
综合减碳率与碳排放强度单控	提高指标适用性和有效性	

2 公共建筑碳排放控制指标计算

2.1 基础数据分析与碳排放计算

公共建筑的能源需求包括冷、热、电与直接化石能源,冷需求通常由电力驱动实现,热源形式包括燃煤、燃气锅炉、热电联产、工业余热、可再生能源等多

种形式,直接化石能源消耗则主要用于建筑的生活热水与炊事用能。表3列出了各项终端用能的能耗数值来源与计算方法,并列出了相应的能源系统形式。基准建筑的能源使用类型根据 GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》的运行方式进行确定,对于供暖热源,严寒和寒冷地区公共建筑采用燃煤锅炉系统,其他气候区采用燃气锅炉;生活热水热源均设定为燃气锅炉;炊事则采用以

燃气为主的用能方式。

超低、近零能耗建筑因建筑本体能效的大幅提升,除严寒地区外均可不采用集中供暖方式,因此严寒地区超低、近零能耗建筑采暖形式设定为燃气锅炉,其他气候区热源设定为热泵供暖;炊事电气化因接受程度较低,且在当前电网清洁化水平下大规模推广炊事电气化无法形成减碳效果,因此仍设定以燃气为主的炊事方式。

表3 建筑能耗数据取值来源与建筑用能形式设定

	能耗指标		用能形式	
	基准建筑	超低/近零能耗建筑	基准建筑	超低/近零能耗建筑
供暖	GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》表 A.0.2 各类新建公共建筑平均能耗指标	GB 50189、CGB 55015、GB 51350 节能率等效转换	严寒寒冷地区:燃煤其他地区:燃气	严寒地区:燃气其他地区:热泵
空调			电力	电力 [11]
照明			电力	电力
生活热水	GB 50015—2019《建筑给水排水设计标准》GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》	与基准建筑一致	燃气	热泵 [11, 12]
电梯	GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》		电力	电力 [13]
插座	GB 55015、GB/T 51350 设备功率密度与运行时长		电力	电力 [11, 7]
炊事	《全国民用建筑工程设计技术措施暖通空调动力》DB11/T 1413—2017《民用建筑能耗标准》	与基准建筑一致	燃气	燃气 [14, 15]

根据建筑能源使用结构,建筑运行阶段碳排放计算公式如下:

$$C_{55015, \text{severe cold and cold}} = \sum_i E_i \cdot F = E_{A1} \cdot F_1 + (E_{B1} + E_{C2}) \cdot F_2 + (E_{A2} + E_{A3} + E_{B2} + E_{C1}) \cdot F_3 \quad (6)$$

$$C_{55015, \text{other}} = \sum_i E_i \cdot F = (E_{A1} + E_{B1} + E_{C2}) \cdot F_2 + (E_{A2} + E_{A3} + E_{B2} + E_{C1}) \cdot F_3 \quad (7)$$

$$C_{51350, \text{severe cold}} = \sum_i E_i \cdot F = (E_{A1} + E_{C2}) \cdot F_2 + (E_{A2} + E_{A3} + E_{B1} + E_{B2} + E_{C1}) \cdot F_3 \quad (8)$$

$$C_{51350, \text{other}} = \sum_i E_i \cdot F = E_{C2} \cdot F_2 + (E_{A1} + E_{A2} + E_{A3} + E_{B1} + E_{B2} + E_{C1}) \cdot F_3 \quad (9)$$

式中: C 为全口径建筑碳排放, $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; F 为能源排放因子,其中电力排放因子取值为 $0.5 \text{ kgCO}_2/\text{kW} \cdot \text{h}$; i 为终端用能项, $i = A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2$ 。

2.2 不同能效等级建筑能源消耗与碳排放

图2为基准建筑与超低能耗建筑的全口径能源

消耗总量。图2a代表 GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》下的各类公共建筑全口径平均能耗水平,各类建筑自左向右依次为严寒A、B区、严寒C区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区、温和地区与各气候区平均水平。可以看出:1)从建筑类型来看,各类建筑能耗强度相差较大,医院建筑能耗强度在 $126 \sim 221 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间,其次为商业和旅馆建筑,办公建筑的能耗强度显著低于上述建筑类型;2)从气候区划来看,严寒与夏热冬暖地区能耗强度最高,温和地区能耗强度最低,其中办公和医院建筑表现为严寒地区高于夏热冬暖地区,而旅馆和商业建筑则表现为夏热冬暖地区较高;3)对于建筑终端用能比例,各类建筑基础计算边界能耗在全口径建筑能耗中占比较大,其中医院建筑占比最高,为 77.6% ,其次为商业建筑,占比为 72.3% ,办公建筑与旅馆建筑占比为 $60\% \sim 67\%$,且由北向南各类建筑基础计算边界的能耗比例逐渐降低,各类建筑在不同气候区的生活热水与

电梯能耗占比均在15%以下,插座与炊事能耗占比在15%~30%之间,其中商业建筑与旅馆建筑炊事能耗相对较高。

图2b代表超低能耗建筑能效水平下各类公共建筑全口径平均能耗强度,由于超低能耗建筑是以基础计算边界与扩展计算边界的综合能耗值进行优化,不做能耗分项约束,因此仅区分为基础计算边界与用能型计算边界能耗。从图2b中可以看出:1)全口径建筑用能下,各气候区超低能耗建筑相对于基准建筑能耗强度平均下降32.4%;2)从建筑类型来看,基准建筑的供暖、空调、照明、生活热水与电梯能耗占比为75.2%~92.1%,而超低能耗建筑的此部分能耗显著下降后降至56.8%~87.2%,终端能耗构成发生显著变化,可见超低能耗建筑通过提升建筑自身能效使得终端能源需求显著降低。需要说明的是,近零能耗建筑增加了可再生能源的应用,但建筑本体能效水平与超低能耗建筑相近,因此未单独列出结果。

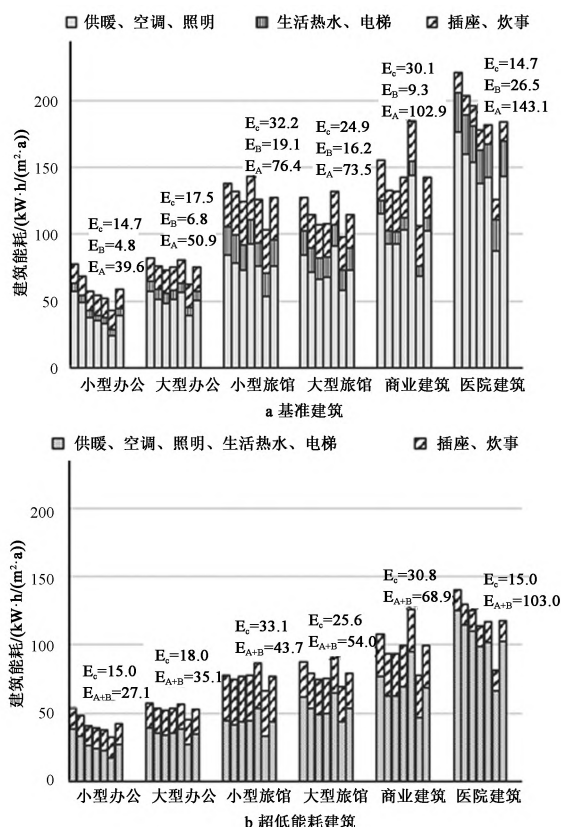


图2 建筑运行阶段全口径能耗(等效耗电量)

图3为基准建筑、超低能耗建筑与近零能耗建筑的等效碳排放强度,各箱型图分别包含严寒A、B

区、严寒C区、寒冷、夏热冬冷、夏热冬暖、温和地区这6个气候区的建筑排放水平,代表了同类建筑在不同气候分区下的碳排放强度离散度。可以看出:1)不同类型建筑碳排放强度差别较大,医院建筑的碳排放强度最高,不同气候区为64~145 kgCO₂/(m²·a),而小型办公建筑仅为25~50 kgCO₂/(m²·a)。2)同一类型建筑在不同气候区离散度较大,严寒地区与温和地区相差超过50%。

当建筑达到超低能耗建筑能效水平时,公共建筑碳排放强度与建筑类型强相关,而与气候区弱相关。整体来看,严寒地区碳排放强度较基准建筑下降39%~46%以上,寒冷地区下降37~45%以上,其他地区可降低27%~38%以上。严寒与寒冷地区相对基准建筑的减碳率较节能率高,其他气候区减碳率与节能率基本相近,主要因为严寒寒冷地区取消传统集中式燃煤供暖使得建筑减碳潜力中突出了能源结构转型的贡献。近零能耗建筑能效碳排放较超低能耗建筑等效碳排放进一步降低,相对于基准建筑的减碳率可再增加约5%以上。

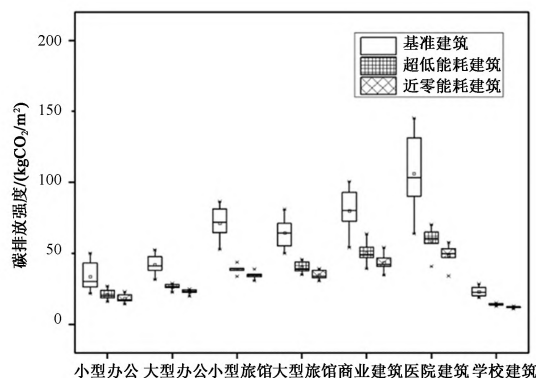


图3 各气候区、各类建筑能效提升减碳潜力

2.3 提升可再生能源应用下的建筑碳排放

超低、近零能耗建筑是较现有节能水平大幅度提升的建筑,其中近零能耗建筑的负荷及能耗强度为现有技术集成后的最低值,因此需要更加强调可再生能源建筑应用,从而进一步降低建筑碳排放。近零能耗建筑增加了10%可再生能源利用率的最低要求(以建筑运行阶段的全口径能耗计算,则占比约为5%~7%),而公共建筑屋顶保留必要的设备安装与人员通行检修空间后可利用面积通常达到60%~70%,且在公共建筑屋顶铺设光伏的可操作性较强^[16],因此应充分发挥建筑屋顶可再生能源替代潜力。

单位建筑面积的光伏替代潜力与建筑所在太阳能资源分区、建筑体形系数紧密相关。GB/T 31155—2014《太阳能资源等级总辐射》^[17]将太阳能年辐照量等级划分为最丰富、很丰富、丰富和一般4个等级,由于太阳能资源分区与气候区划并不重合,因此本节将各气候区下的太阳能资源分区分别展开进行研究。建筑体形系数决定了可再生能源在建筑能耗中的应用比例,本文根据建筑节能标准中的典型建筑模型设定建筑楼层数以约束该指标,以此代表相同类型建筑光伏替代潜力的平均水平,各项参数设定见表4。

表4 公共建筑屋顶光伏利用参数设定

	建筑层数		屋面铺设面积比例
	小型办公建筑	大型办公建筑	
建筑参数	小型办公建筑	10	60%
	大型办公建筑	15	60%
	小型旅馆建筑	6	60%
	大型旅馆建筑	12	60%
	商业建筑	7	60%
	医院建筑	6	60%
光伏资源	辐照量等级		光伏系统效率
	严寒、寒冷	最丰富、很丰富、丰富	
	夏热冬冷	丰富、一般	
	夏热冬暖	很丰富、丰富	
	温和	很丰富、丰富、一般	

图4为在近零能耗建筑等效碳排放上加大可再生能源应用后的建筑碳排放强度,可以看出:

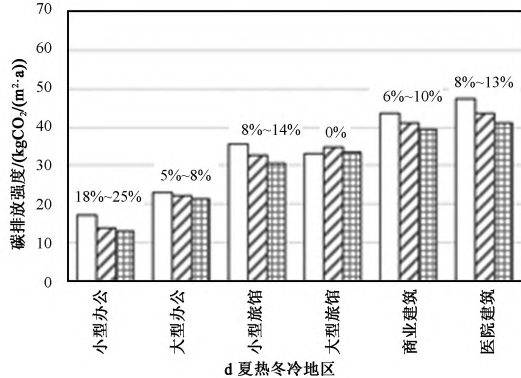
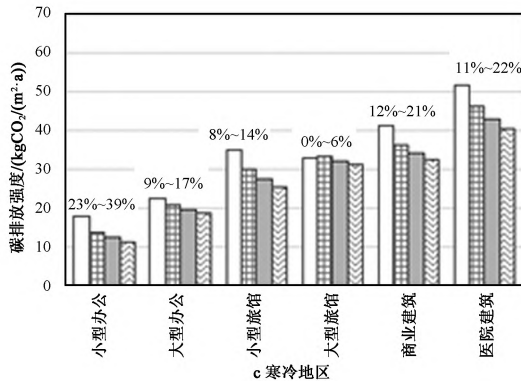
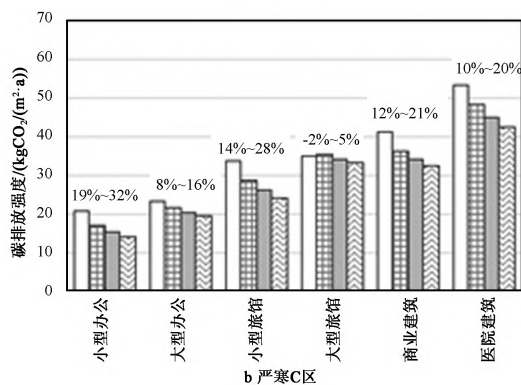
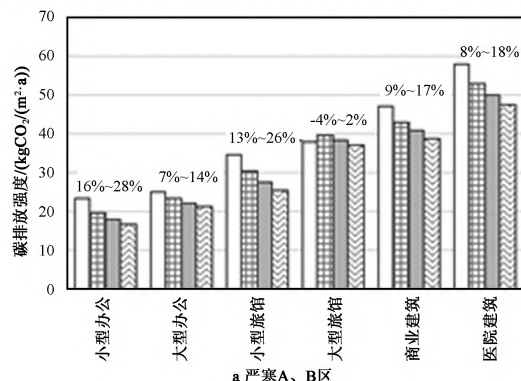
1)当增加近零能耗建筑的光伏应用比例,各气候区建筑的碳排放相对近零能耗建筑等效碳排放有所下降,其中寒冷地区下降比例最高可达39%,各类建筑平均下降16.9%;严寒地区最大可下降32%,平均下降14.2%;温和地区因能耗强度小,太阳能资源丰富,最大下降37%,平均下降12.8%;夏热冬冷与夏热冬暖地区因太阳能资源相对较低,平均下降比例分别为9.1%和9.0%,且太阳能资源分区对该气候区影响较小。

2)从建筑类型来看,小型办公、小型旅馆、商业、医院建筑通常低于10层,光伏替代潜力较大,其中小型办公建筑在各气候区平均下降25.9%,其次为小型旅馆平均下降18.7%,商业与医院建筑因本体能耗强度较高,平均下降11.8%和13.4%;大型旅馆建筑因能耗强度高、体形系数小,屋面铺设60%建筑光伏也较难进一步提升减碳潜力。

3)整体来看,各气候区、各太阳辐照分区内各

类建筑提升可再生能源利用比例后,相对于近零能耗建筑等效碳排放平均下降约15%;相对于基准建筑的减碳率较近零能耗建筑增加约10%。

□ 近零能耗等效碳排放 ▨ 一般 ■ 丰富 ■ 很丰富 ■ 最丰富



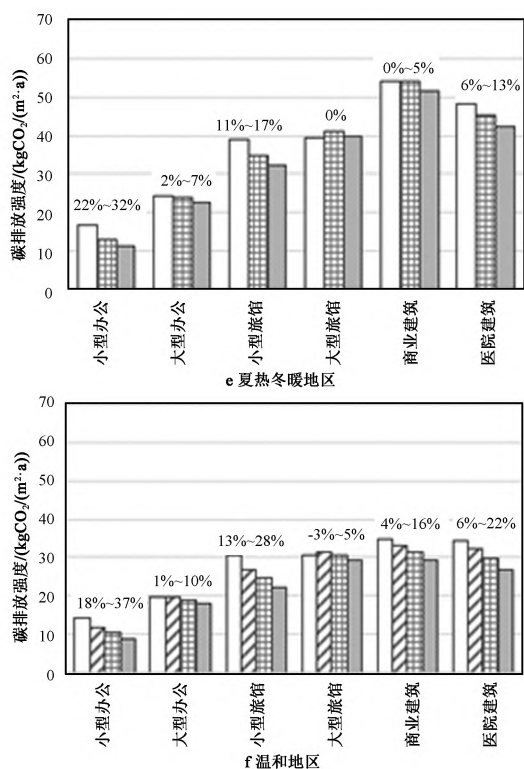


图 4 各气候区不同类型公共建筑在不同太阳能资源分区下的碳排放强度

3 公共建筑碳排放控制指标取值研究

低碳、近零碳、零碳建筑控制指标的实现难度应逐级递增,表 5 列出了各级指标的制定原则,以 GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》全口径转换后的碳排放为基准,以零碳建筑为最高技术难度,划分低碳、近零碳建筑碳排放控制指标。将建筑能效最优解与光伏应铺尽铺作为零碳建筑的技术路径,充分发挥技术减碳贡献,当建筑达到本体能效最优且光伏应铺尽铺的情况下,减碳率可达到 60%~70%,剩余碳排放可由碳交易、购买绿色电力等方式实现。将建筑能效最优解与建筑屋面 60%利用率作为近零碳建筑的控制指标,引导建筑实现更高的减碳目标,体形系数较小的建筑可通过增大建筑屋面利用比例或提升系统效率的方式补偿。低碳建筑则以具备大规模推广条件为原则,《城乡建设领域碳达峰实施方案》中提出 2030 年前规模化推广低碳建筑,因此从政策实施与技术难度可行的角度,可将超低能耗建筑等效碳排放作为低碳建筑碳排放控制指标,但对建筑的技术路径不做

要求,设计建筑可在满足强制性建筑节能标准的基础上进一步提升建筑能效或铺设光伏达到碳排放控制指标,即可推动超低能耗建筑与低碳建筑的同步推广,也有助于建立起节能减碳相互递进的标准体系。

表 5 低碳、近零碳、零碳建筑碳排放分级控制

指标 分级	指标确定原则		建筑强制性性能要求	
	建筑 能效	用能结构 调整	建筑能效 基准来源	用能结构 调整
零碳 建筑	建筑能效 最优解	光伏应铺 尽铺	GB 55015— 2021《建筑节能 与可再生能源 利用通用规范》	—
近零 碳建筑	建筑能效 最优解	屋面 60% 光伏		—
低碳 建筑	超低能耗 能效水平	—		—

3.1 相对减碳率控制

图 5 给出分别按气候区和建筑类型划分的相对减碳率,以气候区进行划分时,箱型图为同一气候区 6 种建筑类型的相对减碳率,以建筑类型进行划分时,则为同一建筑类型在 6 个气候区的相对减碳率。由图 5 可以看出建筑减碳率与气候区相关度较强,严寒地区与温和地区的平均减碳率相差为 18%。与建筑类型相关度较弱,同一气候区各类建筑的综合减碳率相差约为 7%~8%。若以相对减碳率作为低碳、近零碳建筑的约束指标,宜根据气候区进行分别约束,而不再对各气候区内各类建筑综合减碳率进行细分,从而提升指标的适用性和有效性。因此,如采用相对减碳率作为低碳、近零碳建筑指标,则指标以目标为导向,选取各气候区最小减碳率,保证各类建筑均具有实现减碳目标的条件,其中严寒地区低碳建筑相对减碳率为 40%、寒冷地区为 35%,其他气候区为 30%。

3.2 碳排放强度绝对值控制

低碳、近零碳建筑指标的制定应使得所有建筑都具有实现的条件,因此,若仅采用碳排放强度指标进行约束,为避免少数高用能强度建筑采取各项减碳措施后仍较难达标的情况,应对计算结果增加一定的冗余系数,对于超大特异型建筑则采取专家论证的方式进行评定。如图 6 所示,低碳建筑的碳排放强度绝对值指标可在超低能耗建筑等效碳排放基础上放宽 10%,结果仍明显低于基准建筑碳排放。

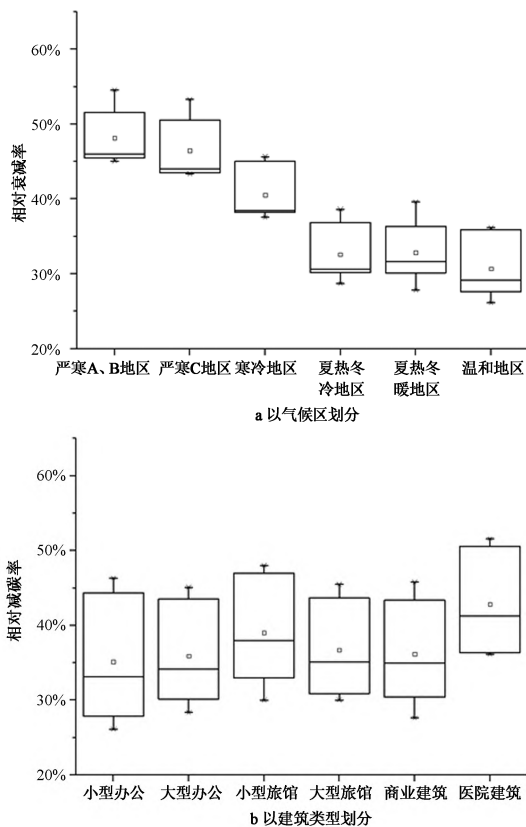


图5 低碳建筑相对减碳率

但若采用此类方法,则会产生“为满足指标覆盖所有建筑,而使得绝大多数建筑的技术难度降低”的情况。

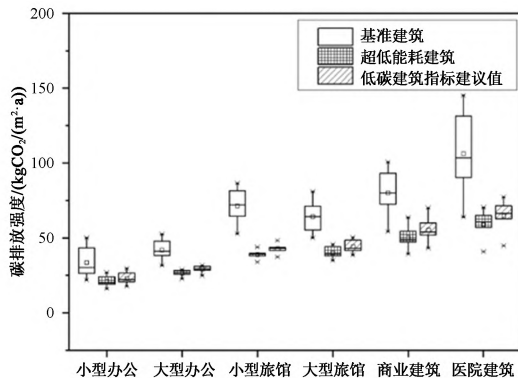


图6 低碳建筑碳排放强度绝对值

3.3 相对减碳率与碳排放强度绝对值双控

如将“满足减碳率且同时满足碳排放强度绝对值”作为建筑碳排放约束条件,对设计建筑来说约束较严,且碳排放强度绝对值成为必须满足的条件,与仅采用碳排放强度绝对值控制指标的局限性一

致,同样面临指标难以覆盖所有建筑类型的问题。因此,若要提高“满足减碳率且同时满足绝对值”指标形式的适用性,相对减碳率与碳排放强度均需采用较宽松的数值。然而,同时满足绝对与相对值的约束方式更为复杂,但却未达到细化指标、充分挖掘各类建筑减碳潜力的目的,最终反而使得减碳约束性降低。

3.4 相对减碳率与碳排放强度绝对值单控

若以“满足相对减碳率或满足碳排放强度绝对值”作为约束条件,既可直观体现典型建筑类型的低碳排放水平,又能避免绝对值过于复杂的问题。其中相对减碳率引导建筑完成减碳目标,碳排放强度绝对值约束建筑实现低碳排放并为行业提供参考,满足任一指标均可认定为低碳、近零碳建筑。相对减碳率以减碳目标为导向,因此同一气候区无论何种建筑类型、太阳能资源禀赋、建筑自身光伏可铺设潜力的差异,均以相同减碳率作为约束指标。碳排放强度绝对值则可以取值相对严格,提升少部分用能强度较低建筑的低碳技术使用率,而对于用能强度大的建筑,则可通过满足综合减碳率的方式判定。

3.5 分级控制指标建议

综上所述,表6给出了各气候区低碳、近零碳建筑相对减碳率控制指标建议,以气候区进行划分,低碳建筑相对减碳率在不同气候区为30%~40%,近零碳建筑为45%~55%。需要说明的是,本研究结论建议是计算了基于提升建筑能效性能带来的减碳潜力,未将插座电器效率提升带来的减碳贡献计入,2022年11月,发改委等部门发布了《重点用能产品设备能效先进水平、节能水平和准入水平》^[18],鼓励消费者扩大绿色产品消费,因此,对于实现近零碳建筑难度较大的建筑,也可在判定时将电器、炊事设备效率提升计入减碳率。

表6 低碳、近零碳建筑相对值控制形式与数值建议

	低碳建筑	近零碳建筑
严寒地区	40%	55%
寒冷地区	35%	50%
其他地区	30%	45%

在绝对值与相对值指标二者满足其一的判定方式下,绝对值指标应更加强调建筑低碳技术的使用,指标制定应相对严格。本文所计算建筑碳排放强度

绝对值指标均采用建筑节能标准中的“典型工况”计算得到,“典型工况”的设计为权衡判断及建筑标准平均节能率计算,因此以 100% 运行工况进行计算时,与旅馆建筑等与人流量相关的建筑能耗之间存在一定偏差。GB 51350—2019《近零能耗建筑技术标准》中将单体建筑能耗作为节能指标的判定值,对与人流量相关的建筑运行工况进行修正。低碳、近零碳建筑碳排放强度绝对值同样需要对旅馆类与人流量相关的建筑进行修正,降低碳排放强度绝对值。

在碳排放绝对值从严要求的原则下,可对太阳能资源进行划分,分别给出不同气候区、不同太阳能资源分区下各类建筑的碳排放强度。以小型办公建筑为例,严寒地区近零碳建筑从太阳能资源丰富到最丰富地区相对于基准建筑的综合减碳率为 55%~59%,仅相差 5%,而绝对值为 14~17 kgCO₂/(m²·a),二者相差 17%。因此,按照碳排放绝对值指标从严要求的原则,可从建筑类型、气候区、太阳能资源分区进行分别赋值。如表 7 给出了低碳、近零碳、零碳办公建筑碳排放绝对值控制指标建议。

表 7 低碳、近零碳建筑绝对值控制指标形式与数值建议(以小型办公建筑为例)

太阳能资源等级	严寒	寒冷	夏热冬冷	夏热冬暖	温和
低碳建筑/ (kgCO ₂ /(m ² ·a))	22	21	21	22	18
一般	—	—	17	17	14
近零碳建筑/ (kgCO ₂ /(m ² ·a))	17	15	16	15	13
丰富	16	14	—	—	11
很丰富	14	13	—	—	—
最丰富	碳排放量为 0,且碳交易比例不大于基准建筑碳排放的 30%或 40%				
零碳建筑/ (kgCO ₂ /(m ² ·a))					

4 结论与建议

本文以支撑《零碳建筑技术标准》的编制与顺利实施为目标,系统梳理了建筑节能与减碳标准体系的关系,提出了能碳双控导向下的低碳、近零碳、零碳公共建筑分级控制指标建议。文章主要结论与建议如下:

1) 以 GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》中相关要求,对建筑能耗进行全口径计算并转换为碳排放量作为基准建筑的碳排放,公共建筑的碳排放强度与建筑类型和气候区均呈现

强相关的趋势,当建筑能效提升至超低能耗建筑水平时,相对于基准建筑的减碳率为 30%~40% 以上,且同一类型建筑碳排放强度在不同气候区之间离散度显著降低,近零能耗建筑等效碳排放较基准建筑的减碳率可较超低能耗建筑再增加 5% 以上。

2) 通过提升建筑可再生能源应用比例,各气候区、各太阳辐照分区内各类建筑碳排放强度显著下降,与近零能耗建筑等效碳排放强度相比,平均下降 15%;相对于基准建筑的减碳率较近零能耗增加 10% 左右。

3) 为了引导建筑逐步实现低碳、近零碳、零碳目标,考虑到公共建筑的复杂性,建议采用满足“满足相对减碳率或满足碳排放强度绝对值”的“二选一”碳排放控制指标方式。其中,碳排放强度绝对值以建筑类型、气候区、太阳能资源分区进行分别约束;相对减碳率建议为:严寒地区低碳建筑较基准建筑碳排放强度下降 40% 以上,近零碳建筑下降 55% 以上;寒冷地区低碳建筑较基准建筑碳排放强度下降 35% 以上,近零碳建筑下降 50% 以上;其他地区低碳建筑较基准建筑碳排放强度下降 30% 以上,近零碳建筑下降 45% 以上。

附表—缩写列表

缩写	含义
E	全口径建筑能耗
C	全口径建筑碳排放
η_E	节能率
η_C	减碳率
E_{50189}	GB 50189 全口径建筑能耗
E_{55015}	GB 55015 全口径建筑能耗
E_{51350}	GB 51350 全口径建筑能耗
$E_{A,50189}$	GB 50189 供暖、空调与照明能耗
$E_{B,50189}$	GB 50189 生活热水与电梯能耗
$E_{C,50189}$	GB 50189 插座与炊事能耗
$E_{(A+B),50189}$	GB 50189 供暖、空调、照明、生活热水与电梯能耗
E_{A1}	供暖能耗
E_{A2}	空调能耗
E_{A3}	照明能耗
E_{B1}	生活热水能耗
E_{B2}	电梯能耗
E_{C1}	插座能耗
E_{C2}	炊事能耗
F	能源排放因子
F_1	燃煤排放因子
F_2	天然气排放因子
F_3	电力排放因子

(下转第 35 页)

- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 完整居住社区建设指南[EB/OL]. (2021-12-17) [2022-03-20]. <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/12/5667815/files/a84ca3d812e54074a43e332f3cc18eca.pdf>
- [21] 王梓晨, 朱隆斌. 零碳社区概念辨析[J]. 城市建筑, 2017, (14): 21-24
- [22] U.S. green building council. Leed zero carbon[EB/OL]. (2018-9-10) [2022-07-25]. <http://leed.usgbc.org/leed.html>
- [23] 中国建筑科学研究院有限公司. GB/T 51366—2019 建筑碳排放计算标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019
- [24] City of Vancouver. Greenest City 2020 Plan Action [R]. Vancouver; City of Vancouver, 2015
- [25] 全国工商联房地产协会. 中国绿色低碳住区减碳技术评估框架体系讨论稿节选[J]. 动感: 生态城市与绿色建筑, 2010 (1): 4
- [26] 中国建筑科学研究院. GB 55015—2021 建筑节能与可再生能源利用通用规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021
- [27] 中华人民共和国中央人民政府. 截至 2021 年底全国新能源汽车保有量达 784 万辆[EB/OL]. (2022-01-12) [2022-07-25]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/12/content_5667734.htm
- [28] 中国电力发展促进会. 加快垃圾发电市场发展的政策和保障机制研究[R]. 北京: 能源基金会, 2014
- [29] 中国建筑设计研究院. GB 50555—2010 民用建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 6
- [30] 中国建筑科学研究院. CJJ 45—2015 城市道路照明设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 28
- [31] 中国建筑科学研究院. GB/T 51350—2019 近零能耗建筑技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 7
- [32] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委等部门关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见[EB/OL]. (2022-01-10) [2022-07-25]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669780.htm

(上接第 10 页)

[参考文献]

- [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[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022
- [2] 中共中央 国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. (2021-10-24). [2021-10-24] http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm
- [3] 国务院. 国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》[EB/OL]. (2021-10-26) [2021-10-26]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/26/content_5645001.htm
- [4] 住房和城乡建设部. 城乡建设领域碳达峰实施方案[EB/OL]. (2022-06-03) [2022-06-03]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/13/content_5700752.htm
- [5] 徐伟, 邹瑜, 张婧, 等. GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》标准解读[J]. 建筑科学, 2022, 38 (2): 1-6
- [6] 彭琛, 江亿, 秦佑国. 低碳建筑和低碳城市[M]. 北京: 中国环境出版社, 2018
- [7] 中国建筑科学研究院. GB/T 51350—2019 近零能耗建筑技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019
- [8] BREEAM. UK New Construction buildings technical manual[R]. 英国: 2018(BREEAM, 2018)
- [9] CANADA GREEN BUILDING COUNCIL. Zero Carbon Building Design Standard Version 2 [R]. 加拿大: 2021 (CANADA GREEN BUILDING COUNCIL, 2021)
- [10] THE ZERO CODE 2.0 [EB/OL]. <http://zero-code.org/wp-content/uploads/2020/11/ZERO-Code-2.0.pdf>
- [11] 中国建筑科学研究院有限公司. GB 55015—2021 建筑节能与可再生能源利用通用规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 60-61
- [12] 华东建筑集团股份有限公司. GB 50015—2019 建筑给水排水设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 104
- [13] 中国建筑科学研究院有限公司. GB/T 51366—2019 建筑碳排放计算标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 60
- [14] 住房和城乡建设部工程质量安全监管司. 全国民用建筑工程设计技术措施_暖通空调 动力[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009
- [15] 北京节能环保中心. DN11/T 1413—2017 民用建筑能耗标准[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2017: 5-8
- [16] 梁俊强. 建筑领域碳达峰碳中和实施路径研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021
- [17] 国家气候中心. GB/T 31155—2014 太阳能资源等级 总辐射[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 2
- [18] 国家发展改革委. 重点用能产品设备能效先进水平、节能水平和准入水平(2022 年版)[EB/OL]. (2022-11-18) [2022-11-18]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-11/18/content_5727735.htm