

建筑行业碳排放特征及减排潜力预测分析

常莎莎,冯国会,崔航,张磊,李奇岩

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 预测中国建筑行业碳达峰年限和减排潜力,明确超低或近零能耗建筑在推动建筑行业节能降碳方面的贡献,助力我国实现双碳目标。方法 通过文献查阅和实地调研,获得不同建筑类型全生命周期碳排放特征;基于建筑面积和不同能效等级建筑碳排放强度自下而上建立建筑行业运行过程碳排放计算模型,并根据不同建筑类型未来发展情况设置4种情景,预测建筑行业未来40年建筑碳排放情况。结果 随着建筑能效等级提升,建材生产阶段二氧化碳排放占全生命周期二氧化碳排放比例越来越大,而运行阶段占比相反;绿色建筑全生命周期二氧化碳排放量比普通建筑减少了20.0%左右,超低和近零能耗建筑全生命周期二氧化碳排放量相比普通建筑约减少了56.0%。随着绿色建筑和超低或近零能耗建筑发展时间提前,占比越来越大,建筑行业的达峰年限逐渐提前,峰值也逐渐降低;中速情景下建筑行业2030年达峰,二氧化碳排放峰值为26.44亿t;预测到2060年,低速、中速和高速情景下二氧化碳排放量分别比基准情景降低23.2%、29.7%和45.1%左右。结论 大力发展超低+近零能耗建筑对于推动建筑行业节能降碳具有重要作用。

关键词 建筑行业;建筑碳排放;碳达峰;潜力预测

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Research on Carbon Emission Characteristics and Emission Reduction Potential Prediction of Construction Industry

CHANG Shasha, FENG Guohui, CUI Hang, ZHANG Lei, LI Qiyan

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Green and low-carbon development is an important gripper for construction industry, which will help to achieve dual-carbon goals in China. Literature and field research were carried out, obtaining the building carbon emission characteristics and intensity. The calculation model is established on the carbon emission in operation process of construction industry. According to the

收稿日期:2022-06-17

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2019YFE0100300);辽宁省教育厅面上项目(LJKZ0577);沈阳市科技计划项目(21-108-9-03)

作者简介:常莎莎(1987—),女,博士研究生,主要从事建筑节能等方面研究。

buildings development, carbon emissions over the next four decades are calculated under four scenarios. The research shows that with the advancement of building energy efficiency level, the proportion of carbon dioxide emission increases in building materials production stage, while in operation stage decreases. The carbon dioxide emission of green buildings is about 20.0% lower than that of ordinary buildings, and the ultra-low energy buildings is about 56.0% lower. As high energy-efficient buildings move ahead, the peak life of the construction industry gradually advanced and the peak decreased. In the medium-speed scenario, the construction industry will peak in 2030, the peak of 2.644 billion tons of CO_2 . By 2060, low-speed, medium-speed and high-speed scenarios are projected to decrease carbon dioxide emissions by 23.2%, 29.7% and 45.1% than the baseline scenario respectively. It is crucial to increase the scale of ultra-low or near-zero high-energy-efficient buildings in the future.

Key words: construction industry; building carbon emission; carbon peak; potential prediction

全球变暖和能源短缺的危机是人类社会面临的严峻挑战。我国提出2030年碳达峰、2060年碳中和目标,对各行各业提出了新的要求。建筑行业是能源消费的三大领域(工业、交通、建筑)之一,也是造成直接和间接碳排放的主要责任领域之一^[1-2]。城镇化进程的快速推进和人民生活水平不断提升的要求,导致我国建筑碳排放和能耗仍将保持增长趋势,对我国实现双碳目标构成巨大挑战。因此,建筑绿色低碳发展已成为推进建筑行业节能减碳、落实双碳目标的重要举措。

目前围绕我国建筑行业碳排放核算、节能减排潜力预测以及节能减排政策技术对建筑行业的影响等已开展相关研究。胡姗等^[3]建立了中国建筑能耗和排放模型,并计算得到2018年我国化石能源消耗导致的建筑运行二氧化碳排放为21亿t,民用建筑建造产生的二氧化碳排放约为18亿t。中国建筑节能协会^[4]基于投入产出表与过程法计算得到2005年中国建材生产阶段碳排放和运行阶段碳排放(CO_2)分别为10.95亿t、10.91亿t,2018年碳排放(CO_2)分别达到27.24亿t和21.1亿t。张时聪等^[5]构建了基于LEAP模型的建筑运行碳排放长期预测模型,通过清洁能源使用及提升建筑节能规范等措施,预测建筑部门可在2030年达到峰值,二氧化碳排放峰值为27~28亿t。Zhou Nan等^[6]利用LEAP模型,基于不同服务的

饱和度和强度以及未来中国技术水平,预测得到在高能源需求情景下建筑碳排放将在2045年达到峰值,技术经济潜力情景下2030年达到峰值。Yang Tao等^[7]基于中国建筑能源法规的制定和超低能耗建筑等示范项目的实施情况提出了六种情景,预测了2025年到2050年中国建筑能耗发展情况,结果表明,当超低能耗建筑和近零能耗建筑面积占总建筑面积的50%以上时,建筑能耗会出现明显下降,明确了零能耗建筑对我国中长期建筑能耗的贡献。Tan Xianchun等^[8]建立了一个CAS自下而上的减排潜力模型,来评估低碳建筑政策和排放因子的综合减排潜力,结果表明绿色建筑、可再生能源建筑对建筑行业减排具有重大影响。

上述研究主要是基于宏观统计数据,结合未来节能减排技术或政策发展情况预测建筑行业碳排放量,进而从宏观层面上给出建筑行业节能减排技术、政策相关建议。建筑是政策和技术实施的直观表现形式,不同使用功能、不同能效等级的建筑具有不同的碳排放强度特征,随着建筑能源结构的改变,建筑碳排放强度也在发生变化。赵玉清等^[9]对建筑开展全生命周期碳排放计算得出,与节能65%办公楼相比,近零能耗建筑全生命周期碳排放量减少了40.72%。C. Panagiotis等^[10]研究发现,被动式建筑隐含碳(即建材生产运输阶段碳排放)占比为32%~38%,

传统建筑隐含碳占比 9% ~ 22%, 低能耗建筑隐含碳占比在 21% ~ 57%。

基于上述分析,笔者通过文献阅读和实地调研,分析不同能效等级建筑全生命周期碳排放特征,并基于建筑面积和不同能效等级建筑运行过程碳排放强度建立建筑行业碳排放计算模型;根据不同建筑类型未来发展情况设置 4 种情景,预测中国建筑行业碳达峰年限和减排潜力。研究表明:大力发展超低+近零能耗建筑对推动建筑行业节能降碳具有重要作用,有助于早日实现建筑行业碳达峰碳中和的目标。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

为了详细全面地了解我国建筑全生命周期碳排放情况,通过在 CNKI(中国知网)数据库进行文献查阅,搜索到 87 篇开展建筑能耗或碳排放量核算的相关文献,共收集了 140 个建筑案例,并对建筑类型、能效等级、建筑热工分区、建筑面积、系统形式、寿命期等因素进行统计,同时对建筑案例全生命周期各阶段的能耗和碳排放量进行了数据收集。由于目前我国超低、近零能耗建筑正在发展的初期阶段,开展碳排放核算研究的案例较少,笔者对沈阳建筑大学被动式超低能耗居住建筑研究中心、中德节能示范中心等建筑开展了实地调研,获得了上述建筑的实际工程用量清单和运行能耗数据,进一步根据李兵^[11]提出的碳排放系数法对以上建筑开展了全生命周期碳排放量核算,得到了超低能耗建筑案例的碳排放特征。

根据不同建筑类型的定义,将样本库中的建筑案例按照能耗等级标准划分为普通建筑、绿色建筑、超低+近零以及零能耗建筑。建材生产阶段和运行阶段是建筑二氧化碳排放主要来源,占比 90% 以上^[12],因此首先选取建筑建材生产和建筑运行两个阶段碳排放数据齐全的建筑案例,排除极大极小数据对

整体案例的影响,最终通过筛选获得了 122 个建筑案例建立样本库开展研究,包括 82 个普通建筑案例、26 个绿色建筑案例和 14 个超低+近零能耗建筑案例。其中,普通建筑案例中又包含 29 个城镇居住建筑、34 个公共建筑案例以及 19 个农村住宅案例。样本中的建筑范围仅指民用建筑,不包含工业建筑,且建筑案例在全国各个热工分区均有分布,具有普适性。最后通过对样本库中的建筑案例进行统计分析,获得了不同能效等级以及不同功能类型建筑全生命周期各阶段二氧化碳排放情况。

1.2 建筑运行碳排放计算模型

建筑行业碳排放来源主要由建筑运行维护导致的碳排放与建材生产运输产生的碳排放组成。由于建材生产过程中的碳排放主要取决于每年竣工的建筑面积,施工以及翻修过程中的各种建材使用量,不易估算,且通常在水泥、钢铁、玻璃等建材生产行业进行碳排放核算,因此笔者只针对建筑行业运行过程产生的碳排放进行计算和预测。根据清单法,建筑业碳排放量由活动水平数据乘以碳排放因子计算得到。核算方法主要包括“自上而下”和“自下而上”两种:前者依据宏观的统计数据,基于建筑运行、建造相关的行业终端能源消费和能源平衡来计算碳排放。后者是以不同建筑类型、建筑碳排放强度指标为基础核算碳排放。

笔者使用“自下而上”的核算模型,考虑建筑类型、建筑碳排放强度等因素,对不同建筑类型和整体建筑行业运行过程碳排放进行核算,公式如下:

$$TC = C_{\text{general}} \times F_{\text{general}} + C_{\text{green}} \times F_{\text{green}} + C_{\text{ultra-low}} \times F_{\text{ultra-low}} \quad (1)$$

式中:TC 为整个建筑行业运行过程中二氧化碳排放量,kg; C_{general} , C_{green} , $C_{\text{ultra-low}}$ 分别为普通建筑、绿色建筑、超低+近零能耗建筑运行维护阶段的碳(CO₂)排放强度,kg/m²; F_{general} , F_{green} , $F_{\text{ultra-low}}$ 分别为普通建筑面积、绿

色建筑面积、超低+近零能耗建筑面积,m²。

1.2.1 不同建筑类型碳排放强度

通过对样本库建筑案例进行加权平均,获得了不同建筑类型建材生产运输阶段和运行维护阶段的碳排放强度,如表1所示。

表1 不同类型建筑碳排放强度指标

Table 1 The carbon emission intensities of buildings

建筑类型	碳(CO ₂)排放强度/(kg·m ⁻²)	
	建材生产 运输阶段	建筑运行 阶段
普通建筑	392.61	40.76
绿色建筑	517.11	33.36
超低+近零能耗建筑	667.48	17.69

由于目前我国净零、近零、超低能耗建筑比例较低,案例较少,因此将上述三种类型划分为一个建筑类型。对于建材生产运输阶段二氧化碳排放,普通建筑最低,近零或超低能耗建筑最高,绿色建筑与超低或近零能耗建筑差别不大;对于建筑运行阶段二氧化碳排

放,趋势恰恰相反。这主要是由于绿色建筑、近零或超低能耗建筑在设计中为保证具有较低的能耗,采用了保温材料、保温门窗等高性能围护结构,导致建材使用产生的碳排放量增加;而太阳能、地热能、生物质能等清洁能源的使用又减少了建筑运行碳排放。

1.2.2 建筑面积预测

建筑面积是关于人口、城市化率以及人均面积的函数。基于联合国“世界人口展望(World Population Prospect)”中的人口预测数据、李善同^[13]预测的未来城市化率以及戚仁广^[14]对人均建筑面积的研究数据,假设从2020年起,城镇人均公共建筑、居住建筑和农村人均居住面积呈线性增长,以此对中国未来40年的建筑面积发展情况进行预测。根据《2020年城乡建设统计年鉴》和《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》,计算得出:到2020年,我国建筑面积总量约为632亿m²,具体数据如表2所示。

表2 中国未来四十年建筑面积预测

Table 2 The predictions of floor area in the next 40 years

年份	人口/亿	城市化率/%	城镇人均居住 面积/m ²	城镇人均公共 建筑面积/m ²	农村人均居 住面积/m ²	建筑面积/ 10 ⁸ m ²
2020	14.39	61.4	33.0	9.1	44.4	632.00
2025	14.58	66.5	34.5	10.2	45.1	653.68
2030	14.64	70.6	36.0	11.3	45.8	686.02
2035	14.61	73.9	37.5	12.4	46.5	716.07
2040	14.49	76.4	39.0	13.6	47.2	743.71
2045	14.29	78.3	40.5	14.7	47.9	766.17
2050	14.02	80.0	42.0	15.8	48.6	784.56
2055	13.70	81.7	43.5	16.9	49.3	799.71
2060	13.33	83.5	45.0	18.0	50.0	811.22

1.3 减排潜力预测方法

1.3.1 情景分析法

情景分析法是以逻辑推理过程为手段,对未来可能出现的情况进行综合评估影响的预测方法^[15]。情景分析法用于多种情景比较,全面且更具说服力,而传统预测方法仅基于单一因素进行趋势预测,结果比较单一。

1.3.2 预测情景设置

笔者根据不同建筑类型未来发展情况设置了四种预测情景,分别预测了建筑行业不同情景下未来四十年碳排放发展趋势。基准情景以发展普通建筑为主,不发展任何其他绿色、低能耗建筑;低速情景下绿色建筑、超低和近零能耗建筑发展均比较缓慢;中速情景下优先以当前速度发展绿色建筑,后期再

发展超低或近零能耗建筑;高速情景下既发展绿色建筑,同时又大力发展近零或超低能耗建筑。

《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》指出,“十三五”期间,我国累计完成超低、近零能耗建筑面积近 0.1 亿 m²,截至 2020 年底累计建成绿色建筑面积超过 66 亿 m²。

表 3 四种情景下不同能效等级建筑类型占比

Table 3 The proportion of different building types in four scenarios %												
年份	基准情景			低速情景			中速情景			高速情景		
	普通建筑	绿色建筑	超低+近零能耗建筑	普通建筑	绿色建筑	超低+近零能耗建筑	普通建筑	绿色建筑	超低+近零能耗建筑	普通建筑	绿色建筑	超低+近零能耗建筑
2020	100	0	0	90	10	0	90	10	0	90	10	0
2025	100	0	0	85	15	0	80	20	0	80	20	0
2030	100	0	0	80	20	0	70	30	0	65	25	10
2035	100	0	0	75	25	0	55	40	5	50	30	20
2040	100	0	0	65	30	5	40	50	10	35	35	30
2045	100	0	0	55	35	10	25	60	15	20	40	40
2050	100	0	0	45	40	15	10	70	20	5	45	50
2055	100	0	0	35	45	20	0	75	25	0	40	60
2060	100	0	0	25	50	25	0	70	30	0	30	70

2 结果与讨论

2.1 不同建筑类型碳排放对比

对样本库案例中普通建筑、绿色建筑、超低+近零能耗建筑全生命周期二氧化碳排放情况进行了对比分析,如图 1 所示。结果表明,普通建筑全生命周期二氧化碳排放量平均值为 3089.7 kg/m²;绿色建筑全生命周期

二氧化碳排放量为 2 469.4 kg/m²,较普通建筑约减少了 20.0%;低能耗建筑二氧化碳排放量为 1 356.7 kg/m²,比普通建筑减少了 56.0%左右。因此,大力发展超低和近零等高效能建筑,对降低建筑行业碳排放具有重要意义。

图 2 为不同能效等级建筑各阶段二氧化碳碳排放占比情况。整体来看,建材生产运输和建筑运行两个阶段二氧化碳排放合计占比达到 95.0% 以上,建筑施工和拆除清理阶段二氧化碳排放占比较小。普通建筑、绿色建筑和超低+近零能耗建筑建材生产运输阶段的二氧化碳排放占全生命周期二氧化碳排放的比例逐渐增大,分别为 14.2%、21.2% 和 55.8%;而运行阶段二氧化碳排放占比越来越小,分别为 82.2%、74.3% 和 41.1%。对于零能耗建筑,由于建筑运行过程中可利用清洁能源产能,抵消了部分或全部建筑运行能耗,建材生产阶段成为建筑主要二氧化碳排放来源。

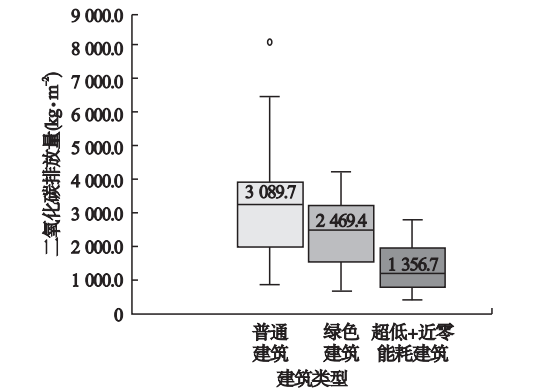


图 1 不同能效等级建筑案例全生命周期碳排放
Fig. 1 Carbon emissions of building cases with different energy efficiency levels

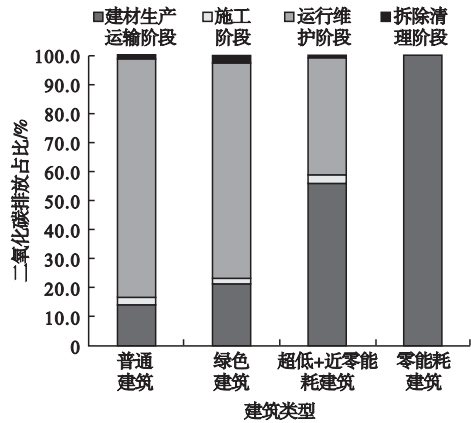


图2 不同能效等级建筑各阶段二氧化碳排放占比

Fig. 2 Carbon dioxide emission ratio of different energy efficiency buildings at different stages

表4为样本库中公共建筑和居住建筑碳排放量对比分析。建材生产阶段,公共建筑二氧化碳排放低于居住建筑,主要是由于公共建筑一般相对体积大,且内部空间多为宽敞高大的空间,导致建材使用量减少,从而减少由于建材生产带来的碳排放。同时对于居住建筑,由于能效标准要高于公共建筑,在设计初期,往往采用更高性能的围护结构设计,导致建材生产过程二氧化碳排放高于普通建筑。而建筑运行阶段,公共建筑二氧化碳排放大于居住建筑,这是因为写字楼、体育馆等大体量公共建筑人口相对密集,建筑气密性一般,高大的空间又增加了空调、新风负荷等。此外,为了美观,一些公共建筑通常采用玻璃幕墙等围护结构,并未考虑寒冷和炎热地区的气候特征,也增加了建筑运行能耗和碳排放。

表4 公共建筑和居住建筑碳(CO₂)排放强度

Table 4 The carbon emission intensities of public buildings and residential buildings

建筑类型	碳(CO ₂)排放强度/(kg·m ⁻²)	
	建材生产运输阶段	建筑运行阶段
公共建筑	380.49	62.59
居住建筑	467.03	37.96

2.2 建筑行业碳减排潜力预测

图3为建筑行业未来四十年在四种预测情景下的运行过程二氧化碳排放量。除基准情景下,建筑行业二氧化碳排放量整体呈现

先增长后降低的趋势。基准情景下,不发展任何其他绿色建筑或超低能耗建筑,随着建筑面积的增加,建筑行业碳排放将持续增长。低速情景下,从2020年开始低速发展绿色建筑,2040年开始发展超低和近零能耗建筑,建筑行业可在2035年达到峰值,二氧化碳排放峰值约为27.86亿t。中速情景下,自2020年开始大力发展绿色建筑,2035年辅助发展超低和近零能耗建筑,建筑行业可在2030年达到峰值,二氧化碳排放峰值约为26.44亿t。高速情景下,以大力发展近零和超低能耗建筑为主,辅助发展绿色建筑,建筑行业在2025年达到峰值,二氧化碳排放峰值为25.68亿t。与低速情景相比,高速情景下建筑行业的达峰年限由2035年提前到2025年,二氧化碳排放峰值由27.86亿t降低为25.68亿t。

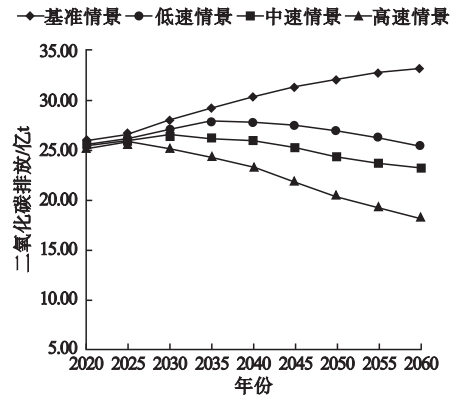


图3 不同情景下建筑运行过程二氧化碳排放量
Fig. 3 The carbon dioxide emissions under different scenarios

图4为不同情景下建筑行业的碳减排潜力。基准情景下,在不采取任何措施的情况下,预测到2060年建筑行业二氧化碳排放量将达到33.07亿t。与基准情景相比,预测到2060年,低速情景下可减排二氧化碳7.68亿t,碳排放量降低23.2%;中速情景下可减排二氧化碳9.82亿吨,碳排放量降低29.7%;高速情景下可减排二氧化碳14.90亿t,碳排放量降低45.1%左右。随着绿色建筑、近零和超低能耗建筑类型占比越来越大,减排潜力逐渐增大。

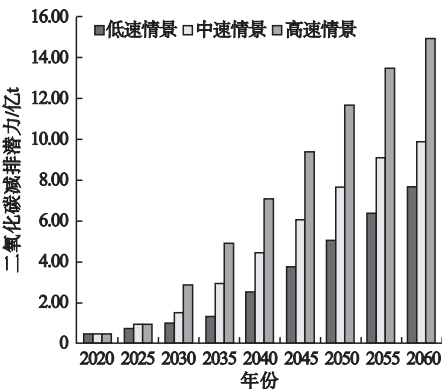


图 4 不同情景下二氧化碳减排潜力

Fig. 4 The reduction potential of carbon dioxide emission under different scenarios

图 5 为不同预测情景下不同类型建筑面积发展趋势。到 2060 年,低速情景下,普通建筑面积占比为 25%,绿色建筑面积占比为 50%,超低或近零能耗建筑面积占比为 25%;中速情景下,普通建筑、绿色建筑、超低或近零能耗建筑面积占比分别为 0%,70% 和 30%;高速情景下,普通建筑、绿色建筑、超低 + 近零能耗建筑面积占比分别为 0%,30% 和 70%。在中速和高速情景下,预计到 2055 年普通建筑均能转为高能效建筑。

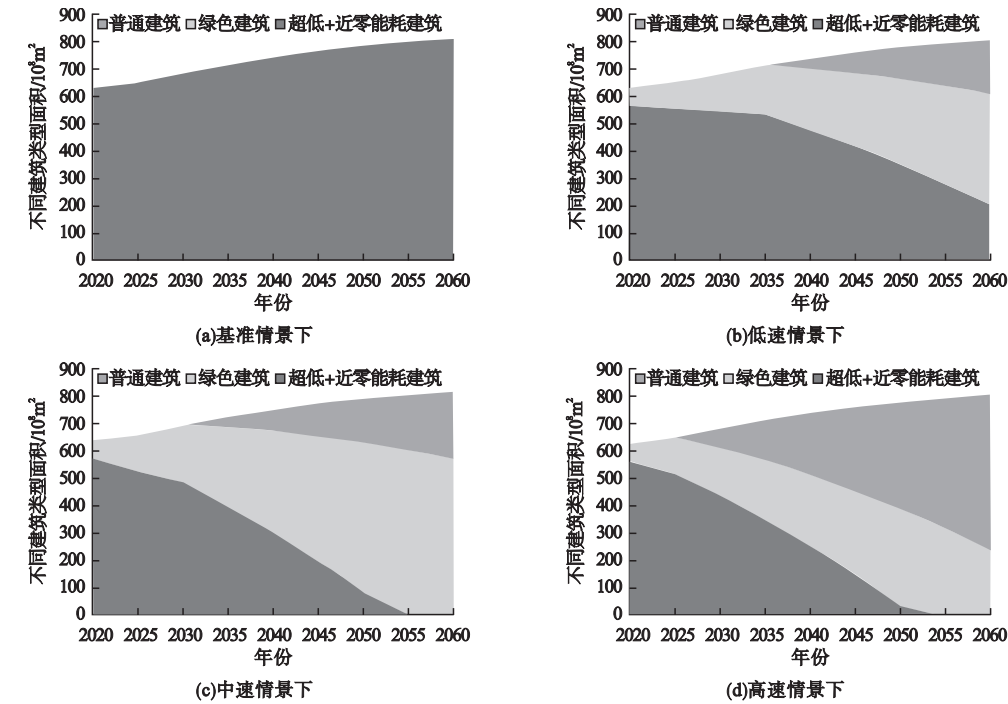


图 5 不同情景下建筑面积发展趋势

Fig. 5 The development of floor area under different scenarios

3 结 论

(1) 随着建筑节能标准要求越来越严格,建材生产阶段二氧化碳排放占全生命周期二氧化碳排放比例增大,而运行阶段占比减小;从全生命周期角度来看,绿色建筑二氧化碳排放量相比普通建筑减少了 20.0% 左右,超低 + 近零能耗建筑二氧化碳排放量相

比普通建筑减少了 56.0% 左右。
(2) 随着绿色建筑和超低 + 近零能耗建筑发展时间提前,占比越来越大,建筑行业的达峰年限逐渐提前,峰值也逐渐降低。中速情景下,建筑行业 2030 年,二氧化碳排放达到峰值,为 26.44 亿 t;预测到 2060 年,低速情景、中速情景和高速情景下二氧化碳排放量分别比基准情景降低 23.2%、29.7% 和

45.1%左右。

(3)建筑面积和碳排放强度是影响建筑行业碳排放的关键因素,严格控制建筑总量,合理制定不同类型建筑的发展规模,是实现未来建筑碳达峰、碳中和的基础。

(4)笔者建议加强建筑设计、建筑材料生产运输、施工、运行维护以及拆除清理等全生命周期零碳化发展;提高可再生能源在建筑领域的应用比例;稳步提升城镇新建建筑节能强制性标准能效,大力推动既有建筑节能降碳改造;大力发展超低、近零、零能耗等高效建筑,助力建筑行业双碳目标的实现。

参考文献

- [1] 江亿,胡姗.中国建筑部门实现碳中和的路径[J].暖通空调,2021,51(5):1-13.
(JIANG Yi,HU Shan.Paths to carbon neutrality in China's building sector[J].Heating ventilating & air conditioning,2021,51(5):1-13.)
- [2] 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2021(城镇住宅专题)[M].北京:中国建筑工业出版社,2022.
(Building Energy Conservation Research Center of Tsinghua University. China building energy efficiency annual development research report 2021(urban housing topics)[M].Beijing: China Construction Industry Press,2022.)
- [3] 胡姗,张洋,燕达,等.中国建筑领域能耗与碳排放的界定与核算[J].建筑科学,2020,36:288-294.
(HU Shan,ZHANG Yang,YAN Da,et al. Definition and modelling of energy consumption and carbon emissions in China's building sector[J].Building science,2020,36:288-294.)
- [4] 中国建筑节能协会.中国建筑能耗研究报告2020[J].建筑节能(中英文),2021,49(360):1-6.
(China Association of Building Energy Efficiency. China building energy consumption annual report 2020[J].Building energy efficiency (Chinese and English),2021,49(360):1-6.)
- [5] 张时聪,王珂,杨芯岩,等.建筑部门碳达峰碳中和排放控制目标研究[J].建筑科学,2021,37(8):189-198.
(ZHANG Shicong,WANG Ke,YANG Xinyan,et al. Research on emission goal of carbon peak and carbon neutral in building sector[J].Building science,2021,37(8):189-198.)
- [6] ZHOU N,KHANNA N,FENG W,et al. Scenarios of energy efficiency and CO₂ emissions reduction potential in the buildings sector in China to year 2050[J].Nature energy,2018(3):978-984.
- [7] YANG T,PAN Y Q,YANG Y K,et al. CO₂ emissions in China's building sector through 2050:a scenario analysis based on a bottom-up model[J].Energy,2017(128):208-223.
- [8] TAN X C,LAI H P,GU B H,et al. Carbon emission and abatement potential outlook in China's building sector through 2050[J].Energy policy,2018,118:429-439.
- [9] 赵玉清,侯向阳,唐胜世,等.基于全寿命期的近零能耗建筑经济性与碳排放量分析[J].建筑节能,2020,48(354):126-130.
(ZHAO Yuqing,HOU Xiangyang,TANG Shengshi,et al. Economic analysis and carbon emissions of near-zero energy buildings based on lifetime[J].Building energy efficiency,2020,48(354):126-130.)
- [10] PANAGIOTIS C,THEODOSIOU T,KONTOLEON K J,et al. Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: a review on the embodied CO₂ emissions of residential buildings[J].Building and environment,2018(130):212-226.
- [11] 李兵.低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
(LI Bing. Research on the technology system and the calculation method of carbon emission of low-carbon building[D].Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2012.)
- [12] 李金璐.寒冷地区城市住宅全生命周期碳排放测算及减碳策略研究[D].西安:西安建筑科技大学,2019.
(LI Jinlu. Study on carbon emissions calculation and carbon reduction strategy of urban residential life cycle in cold areas[D].Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2019.)
- [13] 李善同,吴三忙,高春亮.中国城市化速度预测分析[J].发展研究,2017(17):19-22.
(LI Shantong,WU Sanmang,GAO Chunliang. Prediction and analysis of China's urbanization speed[J].Development research,2017(17):19-22.)
- [14] 戚仁广,凡培红,丁洪涛.碳中和背景下我国建筑面积预测[J].建设科技,2021,6(431):14-18.
(QI Renguang,FAN Peihong,DING Hongtao. Forecast of China's building area under background of carbon neutrality[J].Construction science and technology,2021,6(431):14-18.)
- [15] 曾忠禄,张冬梅.不确定环境下解读未来的方法:情景分析法[J].情报杂志,2005,24(5):14-16.
(ZENG Zhonglu,ZHANG Dongmei. An approach to reading the future in uncertain environments: scenario analysis[J].Journal of the China society for scientific and technical information,2005,24(5):14-16.)
- [16] ZHANG S C,YANG X Y,XU W,et al. Contribution of nearly-zero energy buildings standards enforcement to achieve carbon neutral in urban area by 2060[J].Advances in climate change research,2021,12(5):734-743.

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)