

建筑运行阶段碳排放因素分解及情景预测

孙艳丽,郑凌慧,路林翰

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:建筑的长生命周期特点使得其运行阶段的碳排放量占全生命周期总排放量的一半以上。基于2000—2021年的数据,构建STIRPAT模型,分析了公共建筑、城镇居住建筑及农村居住建筑运行阶段碳排放的主要影响因素,同时基于多情景分析,预测了2022—2030年各类建筑的运行阶段的碳排放趋势。研究发现:人口数量是各类建筑运行阶段碳排放最主要的驱动因素,其影响系数分别为3.263,2.284和2.660;能源结构在公共建筑和农村居住建筑中能起到显著的抑制作用,其影响系数分别为1.465和1.235;建筑面积、居民可支配收入、第三产业增值及制冷度日数均属于主要驱动因素。最后,基于定性与定量的分析,提出了未来碳减排的对策与建议。

关键词:碳排放核算;STIRPAT模型;情景分析;公共建筑;居住建筑

中图分类号:X799.1 **文献标志码:**A

引用格式:孙艳丽,郑凌慧,路林翰.建筑运行阶段碳排放因素分解及情景预测[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2024,26(4):371-376.

在中国,建筑物的CO₂排放量约占社会总排放量的40%^[1]。根据《建筑能耗数据分类及表示方法(JG/T 358—2012)》,建筑运行阶段的能源消耗涵盖供暖、通风、空调、照明、办公和炊事等活动。由于建筑物具有较长的生命周期,其运行阶段的CO₂排放量占全生命周期总排放量的60%~80%^[2]。因此,针对建筑运行阶段的节能减排研究具有重要的环境改善价值。

已有学者对建筑领域的碳排放因素进行了研究。李心萍等^[3]基于STIRPAT拓展模型,利用岭回归分析法得出了“人口规模和产业结构是影响福建省碳排放的最主要的两个因素”这一结论;韩楠等^[4]通过系统动力学模型结合情景分析,认为产业结构调整、能源政策、环境规制及科技投入对碳减排效果

显著;胡文发等^[5]专注于居住建筑使用阶段的研究,发现居民消费水平和电能主导的能源消费结构促进了碳排放,人口密度则起到了主要的抑制作用。通过对相关文献的研究和梳理发现,现有研究多聚焦于整个建筑生命周期或特定建筑阶段,往往忽略了城乡差异和气候条件对建筑碳排放的影响。基于此,本研究综合考虑了公共建筑、城镇居住建筑及农村居住建筑,并将气候因素纳入考量,利用STIRPAT模型对不同类型建筑的运行阶段碳排放进行定量分析,并结合情景分析结果为建筑节能减排措施的制定提供依据和参考。

一、数据的来源与处理

本研究所使用的数据主要来源于

2000—2022年的《中国统计年鉴》,并结合相关数据库和文献资料进行了适当的转化和计算。其中,各类建筑运行阶段的碳排放量计算参照了学者赵敏等^[6]提出的方法,即将各部门和分能源种类的活动数据乘以相应的碳排放系数和碳氧化率,最后进行加总以得到总排放量;能源使用情况相关数据同时参考了相关年份的《中国统计年鉴》和中国碳核算数据库(CEADs);能源排放系数采用世界资源研究所(World Resources Institute)提供的数据;能源碳氧化率根据联合国政府间气候变化专门委员会发布的标准数据进行计算;公共建筑面积通过年末实有房屋建筑面积减去上一年度实有住宅建筑面积来得出;城镇和农村居住建筑面积分别通过人均住宅建筑面积乘以对应的人口数计算得出;采暖和制冷度日数的数据来源于文献^[7]及《建筑节能气象参数标准(JGJ/T 346—2014)》;能源结构通过煤炭在总能源消费中的比例来表示;第三产业增加值、人口数及居民可支配收入的数据直接从相关年份的《中国统计年鉴》获取。

二、STIRPAT模型的构建

1. 建筑碳排放影响因素的选取

民用建筑按使用功能可分为居住建筑和公共建筑两大类,考虑到中国显著的城乡差异,本研究进一步将居住建筑细分为城镇居住建筑和农村居住建筑。据此,本研究分别为这3种建筑类型的运行阶段构建了STIRPAT模型,以分析其碳排放影响因素。

为减少变量选择不足对模型造成的偏差,基于Huo T F等^[8]的研究认为人口、经济与空间环境对建筑碳排放有较强影响,同时将技术层面和环境层面的因素纳入考量,最终选取以下因素进行模型构建。

(1)人口数量。人口增长将对建筑能源需求和土地资源利用方式产生影响,由此可能增加公共建筑和居住建筑的数量,同时人口的流动也可能使建筑在运行阶段所产生的CO₂排放量发生变化。

(2)经济因素。本研究中的经济因素包括第三产业增加值和居民可支配收入。就公共建筑而言,第三产业能耗是其能耗的主要组成部分。随着第三产业的不断发展,人们的工作和休闲场所会逐渐向公共建筑中转移,故对公共建筑运行阶段的采暖、通风及照明需求会相应增加,其碳排放量也将受到影响。杜森贝利相对收入理论认为消费者的消费需求与收入的相对水平有关,因此就居住建筑而言,随着居民可支配收入水平的提高,居民对煤、天然气及电的消费需求也将增加,由此增加居住建筑运行阶段的碳排放量。

(3)建筑面积。建筑面积能反映出人们对住房和公共设施的需求,更大的建筑面积可能导致建筑运行阶段的碳排放量增加。

(4)能源结构。本研究中的能源结构特以煤炭消费占比来表示,反映了能源使用效率和清洁能源使用比例。能源结构值越大,意味着煤炭在建筑运行阶段的使用量更高,消耗不可再生能源的比例越高,所产生的碳排放量也越多。

(5)环境气候因素。本研究中的环境气候因素包括采暖度日数和制冷度日数^[9]。度日数是一个反映温度对特定过程影响的参数,可以通过计算日平均温度与基准温度之差的代数和来得到;采暖度日数和制冷度日数都是反映某地区气候炎热或寒冷程度的指标,数值越大,意味着各类建筑在采暖、制冷及通风等的需求程度越高,建筑运行阶段的碳排放量也越高。

2. 构建STIRPAT模型

STIRPAT模型是IPAT模型的扩展形式,IPAT模型的基础表达形式为

$$I = \gamma P^a A^b T^c \varepsilon \quad (1)$$

式中: I 为环境压力; γ 为方程系数; a 、 b 、 c 分别为各变量的弹性系数; ε 为系统误差。

在实际应用中,通过对模型变量进行对数转换,可以得到更适合实证分析的线性形式。基于此,对式(1)等式两边同时取对数得到对数形式的STIRPAT模型。

在构建模型的过程中,由于各影响因素之间、影响因素与碳排放量之间都存在不确定关系,通过线性回归结果的显著性水平可以发现并非所有试拟合因素都与建筑运行阶段的碳排放量存在良好的拟合效果,因此在不断调试和筛选影响因素(剔除了采暖度日数)的基础上,通过回归分析法,总结出三大类建筑拟合程度较好的 STIRPAT 模型,其计算式如下

$$\ln C_g = \ln \delta_0 + \delta_1 \ln P + \delta_2 \ln G_g + \delta_3 \ln T_g + \delta_4 \ln M_g \tag{2}$$

$$\ln C_{z1} = \ln \alpha_0 + \alpha_1 \ln P + \alpha_2 \ln G_{z1} + \alpha_3 \ln CDD + \delta_4 \ln M_{z1} \tag{3}$$

$$\ln C_{z2} = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln P + \beta_2 \ln G_{z2} + \beta_3 \ln T_{z2} + \beta_4 \ln M_{z2} \tag{4}$$

式中: C_g 为公共建筑运行阶段的碳排放量; C_{z1} 为城镇居住建筑运行阶段的碳排放量; C_{z2} 为农村居住建筑运行阶段的碳排放量; P 为人口数量; G_g 为第三产业增加值; T_g 为公共建筑中煤炭消费比例; M_g 为公共建筑面积; G_{z1} 为城镇居民可支配收入; CDD 为制冷度日数; M_{z1} 为城镇居住建筑面积; G_{z2} 为农村居民可支配收入; T_{z2} 为农村居住建筑中煤炭消费比例; M_{z2} 为农村居住建筑面积; δ_0 、 α_0 、 β_0 分别为常数项; δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 分别为公共建筑各影响因素的弹性系数; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分别为城镇居住建筑各影响因素的弹性系数; β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 分别为农村居住建筑各影响因素的弹性系数。

3. 模型的拟合及有效性检验

为深入了解三大类型建筑运行阶段的碳排放机制并制定更为精确和有效的碳减排政策,需要对模型进行拟合及有效性检验。

SPSS 软件的分析结果显示,模型存在多重共线性问题,因此采用岭回归方法进行校正。通过 SPSS 软件进行岭回归分析,为确保模型的客观性,本研究采用方差膨胀因子^[10]来选择合适的 K 值。公共建筑、城镇居住建筑和农村居住建筑运行阶段的岭回归结果如表 1 ~ 表 3 所示。最终回归结果显示,所有变量均通过了显著性检验(见表 4),证

明了模型的合理性。

表 1 公共建筑的岭回归结果($K=0.175$)

变量	弹性系数	标准误差	T 检验值	显著性水平
$\ln P$	3.263	0.345	9.445	0.000 ***
$\ln G_g$	0.151	0.017	8.951	0.000 ***
$\ln T_g$	1.465	0.272	5.382	0.000 ***
$\ln M_g$	0.459	0.120	3.822	0.001 ***
常数项	-41.311	4.661	-8.863	0.000 ***

注:*** 代表 1% 的显著性水平。

表 2 城镇居住建筑的岭回归结果($K=0.207$)

变量	弹性系数	标准误差	T 检验值	显著性水平
$\ln P$	2.284	0.25	9.133	0.000 ***
$\ln G_{z1}$	0.121	0.013	9.540	0.000 ***
$\ln CDD$	0.401	0.131	3.071	0.007 ***
$\ln M_{z1}$	0.143	0.026	5.568	0.000 ***
常数项	-22.266	2.934	-7.590	0.000 ***

注:*** 代表 1% 的显著性水平。

表 3 农村居住建筑的岭回归结果($K=0.178$)

变量	弹性系数	标准误差	T 检验值	显著性水平
$\ln P$	2.660	0.575	4.625	0.000 ***
$\ln G_{z2}$	0.077	0.034	2.257	0.037 **
$\ln T_{z2}$	1.235	0.448	2.754	0.014 **
$\ln M_{z2}$	1.084	0.362	2.994	0.008 ***
常数项	-38.717	8.219	-4.711	0.000 ***

注:***、** 代表 1%、5% 的显著性水平。

表 4 三大类建筑 STIRPAT 模型的拟合检验值

建筑类型	可决系数	调整可决系数	F 检验值
公共建筑	0.906	0.883	40.724(0.000 ***)
城镇居住建筑	0.917	0.898	47.189(0.000 ***)
农村居住建筑	0.659	0.579	8.215(0.001 ***)

注:*** 代表 1% 的显著性水平。

基于上述结果,分别得到公共建筑、城镇居住建筑及农村居住建筑运行阶段的碳排放量回归模型为

$$\ln C_g = -41.311 + 3.263 \ln P + 0.151 \ln G_g + 1.465 \ln T_g + 0.459 \ln M_g \tag{5}$$

$$\ln C_{z1} = -22.266 + 2.284 \ln P + 0.121 \ln G_{z1} + 0.401 \ln CDD + 0.143 \ln M_{z1} \tag{6}$$

$$\ln C_{z2} = -38.717 + 2.660 \ln P + 0.077 \ln G_{z2} + 1.235 \ln T_{z2} + 1.084 \ln M_{z2} \tag{7}$$

三、情景分析

情景预测根据各因素的历史变化趋势和未来政策变动预期,划分为两种类型:低碳情景和基准情景。低碳情景考虑采取积极的政

策以优化建筑碳排放,基准情景则是基于当前政策持续发展的预测。

1. 影响因素分析及参数设置

(1)常住人口。中国人口发展与研究中心预测,到 2027 年达到 14.17 亿的高峰后,中国人口将进入负增长,2035 年预计人口自然增长率为 $-2.18‰$ ^[11]。本研究假设基准情景下的 2022—2026 年人口自然增长率为 $0.35‰$,2027—2030 年人口自然增长率为 $-0.19‰$,低碳情景在基准情景的基础上两个时间段的变化率分别为 $-0.02‰$ 和 $-0.04‰$ 。

(2)第三产业增加值。尹伟华^[12]认为,随着中国服务业的发展,第三产业比例将持续增长,预计在 2025 年达到 58.0%。学者胡鞍钢等^[13]也预测,到 2030 年第三产业增加值占比将从 2020 年的 55% 增至 62.4%。本研究假设基准情景下的参数设定符合以上预测,低碳情景在此基础上数据变化率为 $-0.05%$ 。

(3)公共建筑面积。2000—2021 年的数据显示,中国公共建筑面积持续增加,公共建筑面积年均增长速度为 2.37%。若未来公共建筑面积持续增长且速度不变,则 2030 年将达到约 31 000 km²。本研究假设基准情景下的参数设定符合以上预测,低碳情景的参数设定同基准情景一致。

(4)城镇居住面积。综合 2000—2021 年的历史数据,城镇居住面积年均增长率为 6.37%,本研究假设至 2030 年城镇居住面积将继续扩张,且基准情景与低碳情景都能保

持这一增速。
(5)农村居住面积。综合 2000—2021 年的历史数据,农村居住面积年均增长率为 0.9%,且在 2021 年达到了 48.9m²/人,本研究假设至 2030 年农村居住面积将继续扩张,且基准情景与低碳情景都能保持这一增速。

(6)能源结构。参考历史数据发现,煤炭在能源结构中的占比持续下降,从 2015 年的 63.8% 降至 2020 年的 56.8%,年均下降速度达 2.48%。本研究假设基准情景下的煤炭占比年均降速仍为 2.28%,低碳情景在此基础上数据变化率为 $-0.4%$ 。

(7)居民可支配收入。随着服务业规模的扩大和经济的增长,居民收入水平预计将继续增长,本研究假设基准情景下的城镇和农村居民可支配收入的年增长率分别按照 9.16% 和 9.54% (参考指标历史的平均增速)计算,低碳情景下在此基础上的变化率分别为 $-0.1%$ 和 $-0.33%$ 。

(8)制冷度日数。根据联合国政府间气候变化专门委员会的预测(暖季会更长,冷季会更短),预计制冷需求将因全球变暖而增加,制冷度日数将持续上升。本研究假设至 2030 年基准情景下的制冷度日数将保持历史增速(2000—2021 年),低碳情景下的增速较慢,将其设定为 0.45%。

考虑到人口数量在 2027 年将出现负增长,将研究时段分为两段(2022—2026 年和 2027—2030 年),各参数在两种情景下的设置情况如表 5 所示。

表 5 2022—2030 年参数情景设置

情景类型	年份	$P/10^4t$	$G_g/10^4元$	M_g/km^2	M_{z1}/km^2	M_{z2}/km^2	$G_{z1}/元$	$G_{z2}/元$	$T_g/%$	$T_{z2}/%$	$CDD/(^{\circ}C \cdot d^{-1})$
低碳	2022—2026	0.03	1.07	2.37	6.37	0.90	9.06	9.21	-2.68	-2.68	0.45
	2027—2030	-0.02	1.07	2.37	6.37	0.90	9.06	9.21	-2.68	-2.68	0.45
基准	2022—2026	0.04	1.22	2.37	6.37	0.90	9.16	9.54	-2.28	-2.28	0.50
	2027—2030	-0.02	1.22	2.37	6.37	0.90	9.16	9.54	-2.28	-2.28	0.50

2. 两种情形下的碳排放分析

首先对三大类建筑在 2000—2021 年的历史碳排放量作深入分析(见图 1),其次基于以上参数设定,进行两种情景下的碳排放

量预测,进一步分析 2022—2030 年三大类建筑的碳排放量趋势(见图 2)。通过数据对比可以看出:积极的政策介入可以显著抑制三大建筑类型运行阶段的碳排放。

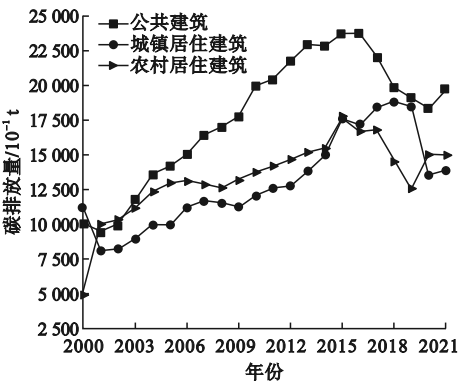


图 1 2000—2021 年三大类建筑运行阶段的碳排放情况

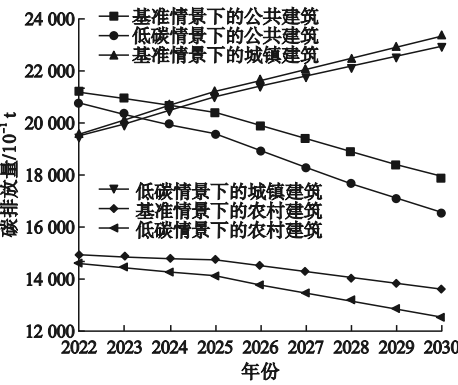


图 2 2022—2030 年两种情形下的三大类建筑运行阶段碳排放模拟

首先分析 2000—2021 年三大类建筑运行阶段碳排放量的历史趋势。从各类建筑的碳排放增量来看,公共建筑、城镇居住建筑及农村居住建筑的增量贡献率分别为 35%、32% 和 33%。其中,公共建筑运行阶段碳排放量增长了 9 681.67 万 t,其碳排放总量呈现出先增后减趋势;城镇居住建筑运行阶段碳排放量增长了 8 899.48 万 t,其碳排放总量呈现出不规则的波动趋势;农村居住建筑运行阶段碳排放量增长了 9 008.57 万 t,其碳排放总量呈现出先增后减趋势。

其次分析两种情形下的 2022—2030 年三大类建筑运行阶段的碳排放趋势。两种情景下的公共建筑和农村居住建筑碳排放量都呈现出显著下降趋势,但城镇居住建筑呈现出缓慢增长趋势。公共建筑在基准情景下预计将减碳 3 288.32 万 t,降幅约为 16%;低碳措施预计将减碳 4 223.14 万 t,降幅约为 20%。农村居住建筑在基准情景下预计将减

碳 1 316.50 万 t,降幅约为 9%;在低碳情景下预计将减碳 2 050.72 万 t,降幅约为 14%。另外,城镇居住建筑在基准情景下的碳排放量降幅约为 19%,低碳情景下的降幅约为 18%,这表明对城镇居住建筑采取低碳措施虽有一定成效但效果较为有限。

通过以上分析可以看出,未来建筑行业碳排放将受到人口变动、经济增长、建筑面积扩张、能源结构调整和气候变化等多种因素的影响。这些因素在不同的情景下展现出不同的影响趋势,从而对建筑碳排放造成显著的影响。因此,采取相应的政策措施,尤其是在能源结构优化和建筑效率提升方面,将是实现碳减排目标的关键。

四、结论与建议

1. 结 论

(1)影响因素分析。人口数量对公共建筑、城镇居住建筑和农村居住建筑运行阶段的碳排放量影响程度最大,影响系数分别为 3.263,2.284,2.660;建筑面积也是三大建筑类型运行阶段碳排放量的主要影响因素;能源结构作为三大建筑类型运行阶段碳排放的减缓因素,对于公共建筑和农村居住建筑的影响尤其显著,其影响系数分别为 1.465 和 1.235。

(2)碳排放预测。2022—2030 年,在低碳情形下,预计中国公共建筑运行阶段碳排放量将呈现递减趋势,减排潜力达 1 104.45 万 t,减排比例为 6.25%,这意味着实施减碳行为将取得显著成效。城镇居住建筑运行阶段碳排放量呈现缓慢递增趋势,减排潜力为 207.06 万 t,减排比例为 0.87%,这意味着低碳措施的成效较为有限。农村居住建筑运行阶段碳排放量也将递减,减排潜力为 659.14 万 t,减排比例为 5.31%,这意味着实施减碳行为将取得较大成效。

2. 建 议

(1)促进低碳生活。人口数量不仅是碳排放模型中最关键的因素,也是与其他因素关联较强的因素。考虑到人口因素的关键性,为进一步落实碳减排工作,应从改变人们的日常生活习惯入手,如节能宣传、推广低能

耗电器和控制高能耗设备使用等,可有效降低居民生活碳排放。

(2)能源结构优化。通过减少不可再生能源如煤炭的使用,将其替换为可再生能源如太阳能、风能等,特别是在公共建筑和农村地区推广太阳能板安装,改变以电能为主的能源消费结构;在北方地区减少煤炭使用,提高可再生能源的使用比例。

(3)建筑节能改造。推广建筑外墙保温、窗户玻璃改造等节能技术,安装LED灯具,并在公共及大型建筑中推广智能控制系统,实现建筑能源的动态优化管理,从技术层面提高能效,降低碳排放。

参考文献:

- [1] 蔡向荣,王敏权,傅柏权.住宅建筑的碳排放量分析与节能减排措施[J].防灾减灾工程学报,2010,30(S1):428-431.
- [2] 靳俊淑.基于碳排放的居住建筑节能研究[D].西安:长安大学,2010.
- [3] 李心萍,苏时鹏,张雅珊,等.福建省碳排放预测与碳达峰路径分析[J].资源开发与市场,2023,39(2):139-147.
- [4] 韩楠,罗新宇.多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力[J].自然资源学报,2022,37(5):1277-1288.
- [5] 胡文发,郭淑婷.中国住宅建筑使用阶段碳排放的因素分解实证[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(6):960-964.
- [6] 赵敏,胡静,戴洁,等.基于能源平衡表的CO₂排放核算研究[J].生态经济,2012,260(11):30-32.
- [7] 赵国松,周欣萌,李元征,等.18°N以北中国制冷与采暖度日数数据集(1981—2020)[J].全球变化数据学报(中英文),2022,6(3):459-466.
- [8] HUO T F, LI X H, CAI W G, et al. Exploring the impact of urbanization on urban building carbon emissions in China: evidence from a provincial panel data model[J]. Sustainable cities and society, 2020, 56(1):102068.
- [9] 李晓辉.中国城镇化对建筑碳排放的影响效应研究[D].重庆:重庆大学,2019.
- [10] 孙艳丽,和秀.基于STIRPAT模型的河南省建筑业碳排放研究[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2023,25(3):257-263.
- [11] 李月,张许颖.我国“十四五”时期及中长期人口发展态势分析[J].人口与健康,2020(8):41-47.
- [12] 尹伟华.“十四五”时期我国产业结构变动特征及趋势展望[J].中国物价,2021(9):3-6.
- [13] 胡鞍钢,刘生龙.中国实现现代化经济社会结构的展望[J].山东大学学报(哲学社会科学版),2018(2):1-8.

The Influencing Factors Analysis and Situation Prediction of Carbon Emissions in the Operation Stage of Buildings

SUN Yanli, ZHENG Linghui, LU Linhan

(School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The long life cycle of the building itself determines that the carbon emissions in the operation stage account for more than half of the carbon emissions of the whole process. Using the data from 2000 to 2021, the STAPAT model was constructed to analyze the main influencing factors of carbon emissions in the operation stage of public buildings, urban residential buildings and rural residential buildings. This paper concluded that population was the most important driving factor affecting the carbon emissions of the operation of the three major building types, with impact factors of 3.263, 2.284 and 2.660, respectively, and energy structure was an important inhibitor of public buildings and rural residential buildings. The impact factors were 1.465 and 1.235, respectively, followed by construction area, disposable income of residents, the added value of the tertiary industry and the number of cooling degree days. Based on qualitative and quantitative analysis, countermeasures and suggestions are put forward for future carbon emission reduction.

Key words: carbon emission accounting; STIRPAT model; scenario analysis; public buildings; residential buildings

(责任编辑:徐聿聪 英文审校:林昊)