

文章编号:1673-9469(2024)02-0078-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.02.011

## 河北省建筑运行碳排放分析及影响因素研究

王桦<sup>1</sup>, 杨卫华<sup>1\*</sup>, 杨光<sup>2</sup>

(1. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 俄亥俄州立大学 物理系, 美国 俄亥俄州 哥伦布 43210)

**摘要:** 为了研究建筑运行阶段的碳排放问题, 首先, 在碳排放因子法的基础上, 根据能源平衡表拆分法建立建筑运行碳排放计算模型, 通过 2005—2020 年河北省建筑运行碳排放数据分析其碳排放变化特征。其次, 运用 STIRPAT 模型对建筑运行碳排放影响因素进行了实证分析。结果表明, 研究期间河北省建筑运行阶段碳排放增长了 1.24 倍, 间接碳排放的运行阶段碳排放中占据主导地位, 而居民生活在建筑运行碳排放行业结构中占比最大, 常住人口数量是河北省建筑运行碳排放的最主要驱动因素。

**关键词:** 建筑运行碳排放; 能源平衡表拆分法; 间接碳排放; STIRPAT 模型

中图分类号: X322

文献标识码: A

## Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors of Building Operations in Hebei Province

WANG Hua<sup>1</sup>, YANG Weihua<sup>1\*</sup>, YANG Guang<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. The Department of Physics, the Ohio State University, Columbus, Ohio 43210, the United State of America)

**Abstract:** In order to study the carbon emissions during the operation phase of buildings, this article establishes a carbon emission calculation model for building operations based on the energy balance table splitting method on the basis of the carbon emission factor method, and analyzes the characteristics of carbon emission changes through the carbon emission data of building operation in Hebei Province from 2005 to 2020. Secondly, the STIRPAT model is introduced to empirically analyze the factors affecting carbon emissions from building operations. The results show that during the research period, carbon emissions during the operation phase of buildings in Hebei Province increases by 1.24 times, with indirect carbon emissions dominating the operation phase. Residents accounts for the largest proportion of carbon emissions in the construction operation industry structure, and the number of permanent residents is the main driving factor for carbon emissions during construction operations in Hebei Province.

**Key words:** carbon emissions from building operations; energy balance sheet splitting method; indirect carbon emissions; STIRPAT model

如今气候变化问题已成为全球面临的一项巨大挑战, 而碳排放被认为是引起气候变化的主要原因。建筑行业作为碳排放的主要贡献者之一, 产生的能源消耗占终端能源使用的 36%, 产生的

碳排放占全球碳排放的 38%<sup>[1]</sup>。鉴于建筑物的长寿命特性, 相较于其他阶段, 建筑运行阶段的碳排在建筑全生命周期中显得尤为关键, 有效控制建筑运行阶段的碳排放对于推进国家节能减排工

收稿日期: 2023-07-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401701); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展基金资助项目(2019490911)

作者简介: 王桦(1998-), 女, 山西朔州人, 硕士研究生, 研究方向为温室气体减排及节能评估。

\* 通信作者: 杨卫华(1973-), 男, 河北承德人, 博士, 教授, 研究方向为低碳能源技术开发与评估。

作和实现“双碳”目标具有重要意义。

国内外学者对建筑运行阶段碳排放的核算、时空特征、驱动因素、脱钩效应展开了一系列研究。Wang 等<sup>[2]</sup>通过编制建筑运行碳排放清单,运用碳排放系数法分行业量化北京建筑运行碳排放。Chen 等<sup>[3]</sup>根据建筑运行阶段的地理差异,构建了建筑运行阶段的碳排放影响因素和驱动机制研究框架,对运行阶段建筑碳排放的时空变化和驱动因素进行了实证研究。Dabous 等<sup>[4]</sup>通过开发碳排放评估模型和构建时空框架分析建筑运行相关的碳排放。Timmons 等<sup>[5]</sup>利用美国住宅能耗调查数据,量化人口密度对美国住宅建筑碳排放的直接和间接影响。黄振华<sup>[6]</sup>应用 STIRPAT 模型研究重庆市 2005—2014 年期间的建筑运行碳排放影响因素。Chen 等<sup>[7]</sup>通过库兹涅茨曲线(CKC)模型研究了不同排放规模下中国 30 个省份商业建筑和住宅建筑的碳达峰状态,并评估了碳排放与经济增长之间的脱钩效应。就研究区域而言,现有的建筑运行碳排放研究大多集中于典型城市或国家尺度,省域层面的建筑运行碳排放趋势和影响因素的研究较为有限。近年来,河北省住房城乡建设事业呈现出良好的发展态势,建筑节能减排政策力度不断增强。基于此,本研究在计算河北省 2005—2020 年建筑运行阶段碳排放的基础上分析碳排放变化趋势特征,再引入 STIRPAT 模型较为系统地分析其影响因素,以为河北省建筑业的减碳发展提供借鉴。

## 1 建筑运行碳排放计算模型

### 1.1 建筑运行碳排放计算方法

建筑运行碳排放是指既有建筑在运行阶段用于照明、采暖、空调和办公设备运行以及热水供应等活动所产生的能源消耗引起的碳排放<sup>[8]</sup>。在本研究中采用联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提出的碳排放因子法对建筑运行阶段的碳排放进行核算,该方法目前广泛应用于不同规模的碳排放研究,且计算精度较高。根据 IPCC 碳排放因子法,建筑运行阶段的碳排放量等于各行业各类能源的建筑运行能耗乘以相应的碳排放因子,即

$$C = \sum_i^n \sum_j^m E_{ij} F_j \quad (1)$$

式中, $C$  为建筑的运行碳排放量; $i$  为行业类型; $j$  为能源类型; $E_{ij}$  为第  $i$  行业第  $j$  种能源的建筑运行能耗; $F_j$  为第  $j$  类能源的碳排放因子。

本文采用蔡伟光提出的能源平衡表拆分法<sup>[9]</sup>计算建筑运行能耗,数据来源于《中国统计年鉴》<sup>[10]</sup>,计算范围如图 1 所示。由能源平衡表中批发和零售业、住宿和餐饮业、生活消费和其他行业构成的建筑能耗基础量扣除相关行业交通运输能耗,再加上工业、建筑业和交通部门的建筑能耗即为建筑运行能耗<sup>[11]</sup>。假定工业、建筑业和交通部门的建筑能耗除采暖外,工业、建筑业中的建筑能耗与交通业中的建筑能耗相当<sup>[12]</sup>,建筑运行能耗具体计算公式如下:

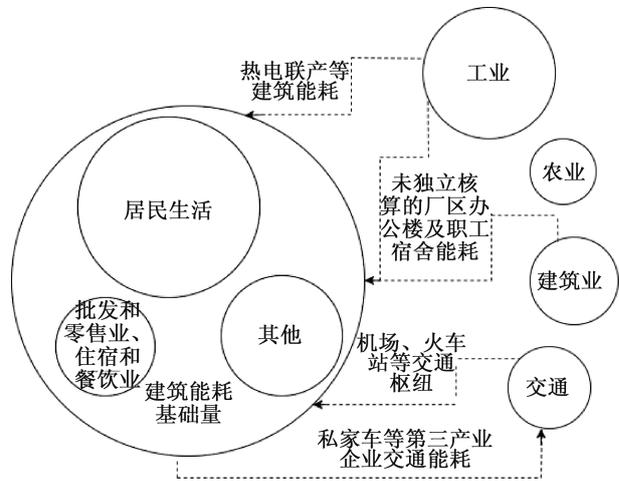


图 1 建筑运行能耗拆分计算范围

Fig. 1 Scope of energy consumption splitting calculation for building operation

$$E = E_b - E_1 + E_2 \quad (2)$$

式中, $E$  为建筑运行能耗; $E_b$  为建筑能耗基础量; $E_1$  为私家车及第三产业企业交通运输能耗; $E_2$  为工业、建筑业和交通业中的建筑能耗。

$$E_b = E_w + E_o + E_h \quad (3)$$

式中, $E_w$  表示批发和零售业、住宿和餐饮服务业的能源消耗; $E_o$  和  $E_h$  分别表示其他行业和居民生活的能源消耗。

$$E_1 = E_w^1 + E_o^1 + E_h^1 \quad (4)$$

式中, $E_w^1$  表示批发和零售业、住宿和餐饮服务业的私家车及第三产业企业交通运输能耗,即批发和零售业、住宿和餐饮服务业 95% 的汽油消耗量和 35% 的柴油消耗量之和<sup>[12]</sup>;  $E_o^1$  表示其他行业的私家车及第三产业企业交通运输能耗,即其他行业 95% 的汽油消耗量和 35% 的柴油消耗量之

和<sup>[12]</sup>;  $E_H$  为居民生活消费的私人交通运输能耗, 即居民生活消费中全部汽油消耗量和 95% 的柴油消耗量之和<sup>[12]</sup>。

$$E_2 = 2 \times E_T + E_{\text{Heat}} \quad (5)$$

式中,  $E_T$  为交通运输建筑能耗, 即交通运输全部煤耗和电力消耗之和;  $E_{\text{Heat}}$  是采暖能耗, 为河北省城镇集中采暖能耗与建筑能耗基础量的热力消耗之差<sup>[12]</sup>。城镇集中采暖能耗数据来源于《中国城乡建设统计年鉴》<sup>[13]</sup>。

## 1.2 碳排放因子的计算方法

建筑运行阶段的碳排放分为直接碳排放和间接碳排放, 直接碳排放是指建筑运行过程中直接燃烧化石能源导致的二氧化碳排放, 如居民炊事时使用天然气等燃料产生的碳排放; 间接碳排放是指消耗二次能源所产生的二氧化碳排放量, 包括各类电器使用产生的电力消费和冬季供暖产生的热力消费。

### 1.2.1 直接碳排放因子

本文采用 IPCC 提供的计算方法对直接碳排放因子进行计算, 计算公式如下:

$$F_j = \text{NCV}_j \times C_j \times O_j \times \frac{44}{12} \quad (6)$$

式中,  $F_j$  为  $j$  能源的碳排放因子,  $\text{kg}/\text{kg}$  或  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\text{NCV}_j$  为第  $j$  种能源的平均低位发热量,  $\text{kJ}/\text{kg}$  或  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;  $C_j$  为第  $j$  种能源的单位热值含碳量,  $\text{kg}/\text{kJ}$ ;  $O_j$  为第  $j$  种能源的碳氧化率, %。各类能源的平低位发热量来源于《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020), 各化石燃料单位热值含碳量和碳氧化率来源于《省级温室气体清单编制指南》, 计算得到的各类碳排放因子<sup>[14-15]</sup>如表 1 所示。

### 1.2.2 间接碳排放因子

在计算间接碳排放因子时, 考虑到电力一般为跨区输送, 因此电力排放因子基于全国范围进行计算。而由供热企业产出的热力通常在几十公里范围内输送, 不进行跨省输送, 因此热力排放因子按照河北省范围进行计算。根据《中国能源统计年鉴》<sup>[16]</sup> 能源平衡表“中间投入和转换”中的“火力发电”和“供热”数据以及化石燃料产生的二氧化碳排放总量计算电力和热力碳排放因子<sup>[17]</sup>, 计算公式如下:

$$F_e = \frac{\sum_j^m E_j \times F_j}{E_{e_1} + E_{e_2}} \quad (7)$$

表 1 能源碳排放因子

Tab. 1 Energy carbon emission factors

能源	碳排放因子 /( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	能源	碳排放因子 /( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
原煤	1.902 7	高炉煤气 <sup>[14]</sup>	0.145 7
型煤	1.933 7	转炉煤气 <sup>[14]</sup>	0.364 7
其他洗煤	0.748 0	其他煤气 <sup>[14]</sup>	0.739 2
煤矸石 <sup>[18]</sup>	0.371 0	液化石油气	3.105 2
焦炭	2.852 7	石油焦	3.156 9
原油	3.020 2	其他焦化产品 <sup>[14]</sup>	3.832 6
汽油	2.928 7	炼厂干气	3.008 2
煤油	3.037 2	天然气	2.162 2
柴油	3.099 8	其他石油制品 <sup>[14]</sup>	2.527 4
燃料油	3.174 4	液化天然气 <sup>[14]</sup>	3.050 4
焦炉煤气	0.875 0		

注: 其他能源的碳排放折算成标准煤进行计算, 折算单位为  $2.6 \text{ kgCO}_2/\text{1kgce}$ <sup>[15]</sup>。由于部分能源数据缺失造成没有计算结果的碳排放因子值参考文献<sup>[14]</sup>。

式中,  $F_e$  为电力碳排放因子,  $\text{kgCO}_2/\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $E_j$  为全国发电第  $j$  种能源的消耗量,  $\text{kg}$  或  $\text{m}^3$ ;  $F_j$  为第  $j$  种燃料的碳排放因子,  $\text{kg}/\text{kg}$  或  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $E_{e_1}$  为火电发电总量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $E_{e_2}$  为全国水力、风力和核能发电总量,  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

$$F_h = \frac{\sum_k^m E_k \times F_k}{E_h} \quad (8)$$

式中,  $F_h$  为热力碳排放因子,  $\text{tCO}_2/\text{GJ}$ ;  $E_k$  为省份生产热能第  $k$  种能源的消耗量,  $\text{kg}$  或  $\text{m}^3$ ;  $F_k$  为第  $k$  种燃料的碳排放因子,  $\text{kg}/\text{kg}$  或  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $E_h$  为省份热能生产总量,  $\text{kJ}$ 。

根据能源平衡表计算得到的全国电力碳排放因子和河北热力碳排放因子如表 2 所示, 其变化趋势见图 2 和图 3。

经计算数据显示, 全国电力排放因子与国家发改委及国家电网发布的平均值相符, 生态环境部最新数据显示全国电网平均碳排放因子为  $0.570 3 \text{ kgCO}_2/\text{kW} \cdot \text{h}$ <sup>[18]</sup>。我国碳排放核算指南中外购热力的碳排放因子推荐值为  $0.11 \text{ tCO}_2/\text{GJ}$ , 与河北省 2020 年热力碳排放因子值  $0.112 1 \text{ tCO}_2/\text{GJ}$  相近。近年来, 随着我国发电清洁能源的推广, 电力碳排放因子呈下降趋势。相比之下, 河北省热力碳排放因子波动较大, 2005—2010 年工业化和城镇化推动燃煤集中供热需求增长, 但 2010 年后热力结构变革和技术进步使得热力碳排放因子出现大幅下降。

表 2 间接碳排放因子

Tab. 2 Indirect carbon emission factors

年份	电力排放因子 ( $\text{kgCO}_2 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ )	热力排放因子 ( $\text{tCO}_2 \cdot \text{GJ}^{-1}$ )	年份	电力排放因子 ( $\text{kgCO}_2 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ )	热力排放因子 ( $\text{tCO}_2 \cdot \text{GJ}^{-1}$ )
2005	0.814 3	0.136 0	2013	0.710 4	0.116 9
2006	0.809 8	0.129 9	2014	0.652 2	0.115 1
2007	0.761 4	0.134 8	2015	0.618 6	0.113 4
2008	0.747 3	0.144 9	2016	0.600 9	0.114 3
2009	0.763 4	0.153 5	2017	0.599 0	0.112 4
2010	0.719 4	0.137 8	2018	0.595 0	0.111 7
2011	0.734 8	0.123 3	2019	0.585 5	0.110 8
2012	0.727 4	0.114 5	2020	0.576 9	0.112 1

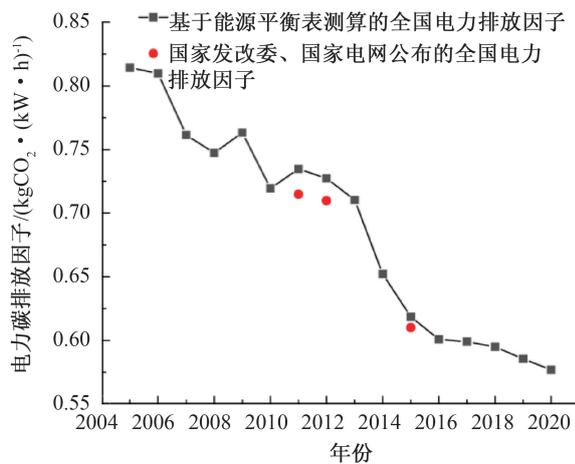


图 2 全国电力碳排放因子

Fig. 2 National electricity carbon emission factor

### 1.3 河北省建筑运行碳排放现状分析

根据上述 1.1 和 1.2 节分析算得的河北省 2005—2020 年建筑运行碳排放量如表 3 所示。

图 4 为河北省 2005—2020 年的建筑运行碳排放总量及直接和间接碳排放变化趋势图。由图可知,河北省建筑运行碳排放总量从 2005 年的 7 125.83 万 t 增加到 2020 年的 15 797.08 万 t,年均增长率达到 5.45%。直接碳排放量和间接碳

排放量在研究期间整体也呈增加的趋势,年均增长率分别为 3.49% 和 4.45%,可见间接碳排放量的增长较快。与此同时,间接碳排放量占总排放量的比值较大,平均占比达到 61.39%,而直接碳排放量仅占到总排放量的 38.61%,说明建筑运行碳排放主要来源于电力和热力的消耗。

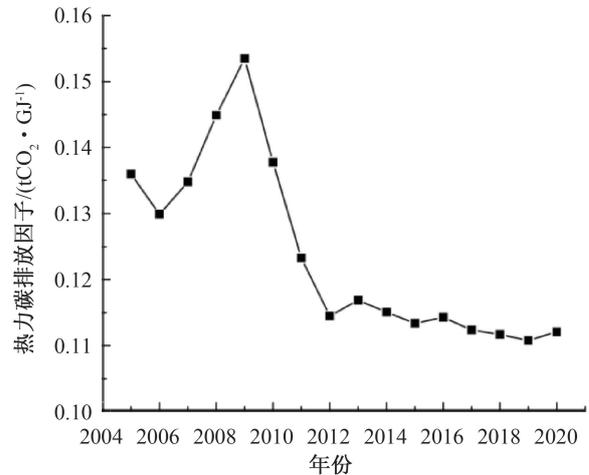


图 3 河北热力碳排放因子

Fig. 3 Thermal carbon emission factor of Hebei Province

表 3 2005—2020 年河北省建筑运行碳排放量(单位:万 t)

Tab. 3 Carbon emissions of building operations in Hebei Province from 2005 to 2020 (unit:万 t)

年份	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020
直接碳排放	2 904.68	3 746.35	4 415.25	4 473.44	4 983.38	5 787.98	5 759.87	5 612.34
间接碳排放	4 704.62	5 489.98	6 267.42	6 965.94	7 649.15	8 377.41	9 854.23	10 184.74
批发和零售业、 住宿和餐饮业	371.10	585.13	746.26	925.76	1 376.94	1 558.03	1 794.35	1 637.88
其他	961.70	1 391.62	1 695.53	1 809.16	1 905.18	2 236.94	2 290.03	2 602.18
工业、建筑业 和交通	2 491.49	2 853.72	2 986.16	2 954.24	2 752.61	2 880.71	3 131.63	1 727.36
居民生活	3 785.01	4 405.86	5 254.72	5 750.23	6 597.79	7 489.72	8 398.08	9 829.66
碳排放总量	7 609.30	9 236.33	10 682.67	11 439.38	12 632.52	14 165.39	15 614.10	15 797.08



构建的建筑运行碳排放 STIRPAT 影响因素分析模型如下:

$$\ln I_1 = \ln \alpha + \beta_1 \ln P + \beta_2 \ln U + \beta_3 \ln G + \beta_4 \ln T + \beta_5 \ln B + \ln e \quad (12)$$

式中:  $\alpha$  为常数项;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  分别表示人口总量、城镇化率、人均 GDP、第三产业占比和人均住宅面积的弹性系数。

### 2.2 共线性分析

从理论上分析,河北省常住人口、城镇化率、人均 GDP、第三产业占比、人均住宅面积各解释变量之间存在高度的相关性。利用 SPSS 25.0 软件对模型做最小二乘法回归分析和多重共线性检验,结果如表 4 所示。

一般认为,方差膨胀因子  $VIF \geq 10$  时,模型影响因素之间存在很强的共线情况,会严重影响回归结果。根据 VIF 检验,五个自变量的 VIF 均大于 10,而且最大的 VIF 值达到 257.692,因此可以判断该模型存在严重的多重共线性。从最小二乘回归分析结果可得,常住人口数量的系数为负值,不符合实际情况,故模型不能采用最小二乘法进行回归拟合。

### 2.3 岭回归分析

为克服模型中的共线性影响,可选用岭回归方法对模型进行回归分析。岭回归是一种专用于

线性自变量高度相关的情况下,估计多重回归模型系数的方法,其本质是一种改进的最小二乘法。通过放弃普通最小二乘法的无偏性,以损失少部分信息和降低精度为基础获得更为科学的回归系数<sup>[23]</sup>。本研究使用 SPSS 25.0 对模型进行岭回归拟合,得到岭迹图如图 6 所示。

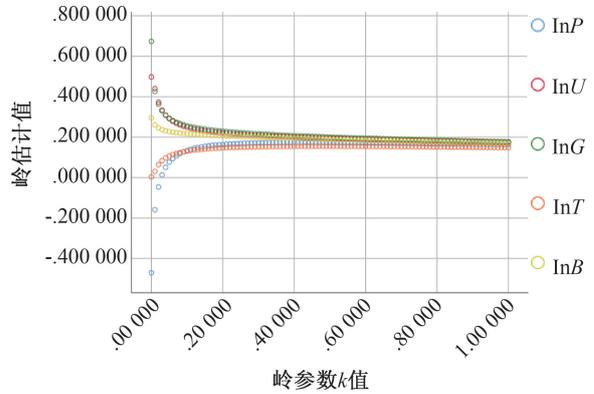


图 6 岭迹图

Fig. 6 Ridge trace map

根据图 6 的岭迹图和  $k$  值选取原则,选取  $k = 0.2$  时,五个变量的岭迹变化趋于稳定且均大于零,得到的岭回归分析结果如表 5 所示。

表 5 中,  $B$  列表示模型中各自变量的非标准回归系数,  $Beta$  列表示各自变量的标准回归系数。根据岭回归分析结果,岭回归模型的可决系数  $R^2 = 0.966$ ,拟合优度较高。假设检验结果中显著

表 4 最小二乘回归分析及多重共线性检验

Tab. 4 Least squares regression analysis and multicollinearity test

模型	非标准化系数		标准化系数	$t$	Sig	共线性统计量	
	$B$	标准误差	Beta			容差	VIF
(常量)	38.369	31.629		1.213	0.253		
$\ln P$	-4.290	3.907	-4.70	-1.098	0.298	0.013	79.760
$\ln U$	0.894	1.383	0.498	0.646	0.533	0.004	257.692
$\ln G$	0.435	0.491	0.674	0.885	0.397	0.004	251.921
$\ln T$	0.008	0.881	0.004	0.009	0.993	0.015	64.853
$\ln B$	0.334	0.212	0.296	1.575	0.146	0.065	15.331

表 5 岭回归计算结果

Tab. 5 Calculation results of ridge regression of the model

	非标准化系数		标准化系数	$t$	$p$	$R^2$	调整 $R^2$	$F$
	$B$	标准误差	Beta					
常量	-9.052 5	2.825	0.000	-3.204	0.000 **			
$\ln P$	1.495 4	0.333	0.164	4.486	0.001 **			
$\ln U$	0.396 8	0.053	0.221	7.428	0.000 **	0.966	0.949	$F(5, 10) = 56.33$
$\ln G$	0.147 9	0.022	0.230	6.733	0.000 **			$p = 0.000$
$\ln T$	0.335 4	0.124	0.147	2.712	0.022 *			
$\ln B$	0.233 5	0.057	0.207	4.105	0.002 **			

性  $p=0.000<0.05$ ,且回归系数的符号特征均符合经济学研究的实际意义,由此可得岭回归拟合方程为

$$\ln I_1 = -9.0525 + 1.4954 \ln P + 0.3968 \ln U + 0.1479 \ln G + 0.3354 \ln T + 0.2335 \ln B \quad (13)$$

#### 2.4 岭回归结果分析

由岭回归分析结果可知,2005—2020年各影响因素对河北省建筑运行碳排放总量的弹性系数为:常住人口数量(1.4954)、城镇化率(0.3968)、人均GDP(0.1457)、第三产业增加值(0.3354)、人均住宅面积(0.2335)。将模型的拟合数值与实际数值进行比对,结果表明拟合度较高。

河北省常住人口数量对建筑运行碳排放的影响最为显著。随着人口数量的持续增长,居民在建筑内的生产和生活用能不断上升,建筑运行碳排放量也随之增加。2005—2020年期间,河北省人口数量增加了8.9%,贡献了很大一部分建筑碳排放。

城镇化率是影响河北省建筑运行碳排放的第二大因素。随着城市化的快速推进,人们对居住环境的需求日益提升,导致人均生活能耗占比逐渐增大,进而直接推动建筑运行阶段碳排放量的增加。2005—2020年间,河北省的城镇化率从37.69%迅速增长至60.07%,累计涨幅达到了59.38%。

人均GDP是衡量一个地区经济发展的重要指标,在很大程度上反映该地区的经济活力和居民收入水平。经济快速发展会增加居民和企业对住宅、商业和工业用地的需求,从而推动住宅、商业、工业等建筑产品数量扩张,必然导致建筑运行阶段的碳排放量上升。河北省人均生产总值在2005—2020年间呈现出逐步增长的趋势,从2005年的12845万元增长到2020年的48564万元,累计增长278.08%。

第三产业的能耗是公共建筑能耗的重要组成部分,随着第三产业的发展,人们的工作和休闲活动逐渐转移到公共建筑,相应的碳排放持续增加。近年来,河北省第三产业比重不断上升,到2020年河北省第三产业比重已达到51.7%。

人均住宅面积也是推动建筑运行碳排放增加的重要因素,人均住宅面积的增加会带来建筑运行阶段采暖、照明、电梯等用能的增加,进而促进碳排放的增加。截至2020年,河北省的人均住宅面积为38.08 m<sup>2</sup>,比2005年增长了88.28%。

### 3 结论

1)随着工艺技术的改进和能源结构的调整,近年来国家电力排放因子和河北省热力排放因子呈现下降的趋势,有助于减缓河北省建筑运行阶段碳排放的增势。

2)河北省的建筑运行碳排放总量在2020年达到15797.08万t,为2005年的2.24倍,间接碳排放是建筑运行碳排放的主要来源。

3)在建筑运行碳排放的结构分析上,居民生活的碳排放量最多,工业、建筑业和交通次之,其他行业的碳排放量较少,批发和零售业、住宿和餐饮业的碳排放量最少。

4)常住人口数量、城镇化率、人均GDP、第三产业占比、单位住宅面积均会驱动建筑运行阶段碳排放量增加,其中常住人口数量对碳排放的影响最大,其他因素虽然对建筑运行碳排放的影响相对较小,但是影响因素的大幅增长也会引起建筑运行阶段碳排放的增加。

#### 参考文献:

- [1] SUN Z, MA Z, MA M, et al. Carbon peak and carbon neutrality in the building sector: A bibliometric review [J]. *Buildings*, 2022, 12(2): 128.
- [2] WANG J, WEI J, ZHANG W, et al. High-resolution temporal and spatial evolution of carbon emissions from building operations in Beijing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376: 134272.
- [3] CHEN C, BI L. Study on spatio-temporal changes and driving factors of carbon emissions at the building operation stage-A case study of China [J]. *Building and Environment*, 2022, 219: 109147.
- [4] DABOUS S A, SHANABLEH A, AL-RUZOUQ R, et al. A spatio-temporal framework for sustainable planning of buildings based on carbon emissions at the city scale [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 82: 103890.
- [5] TIMMONS D, ZIROGIANNIS N, LUTZ M. Location matters: Population density and carbon emissions from residential building energy use in the United States [J]. *Energy Research & Social Science*, 2016, 22: 137-146.
- [6] 黄振华. 基于STIRPAT模型的重庆市建筑碳排放影响因素研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
- [7] CHEN M, MA M, LIN Y, et al. Carbon Kuznets curve in China's building operations: Retrospective and prospective trajectories [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 150104.
- [8] 刘惠艳. 广东省建筑业碳排放测算及影响因素分析

[D]. 广州:华南理工大学, 2021.

[9] 蔡伟光, 庞天娇, 郎宁宁, 等. 我国各省建筑能耗测算与分析 [J]. 暖通空调, 2020, 50(02): 66-71+116.

[10] 国家统计局. 中国统计年鉴(2023)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.

[11] 王京京, 卫佳佳. 时间序列下北京市建筑运行碳排放变化特征与情景模拟 [J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(03): 220-229.

[12] 王庆一. 中国建筑能耗统计和计算研究 [J]. 节能与环保, 2007(08): 9-10.

[13] 中国城乡建设统计年鉴委员会. 中国城乡建设统计年鉴(2022)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.

[14] 闫树睿, 刘念雄. 基于能源平衡表拆分法的北京城镇居住建筑使用阶段碳排放趋势研究 [J]. 住区, 2020(S1): 182-187.

[15] 龙惟定, 梁浩. 我国城市建筑碳达峰与碳中和路径探讨 [J]. 暖通空调, 2021, 51(04): 1-17.

[16] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴(2022)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.

[17] JIANG J. China's urban residential carbon emission and energy efficiency policy [J]. Energy, 2016, 109: 866-875.

[18] 生态环境部办公厅. 《关于做好 2023—2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》环办气候函[2023]43 号. [2023-02-27]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202302/t20230207\\_1015569.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html).

[19] EHRlich P R, HOLDREN J P. Impact of population growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive [J]. Science, 1971, 171(3977): 1212-1217.

[20] YORK R, ROSA E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts [J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351-365.

[21] 河北省统计局, 国家统计局河北调查总队. 河北统计年鉴(2023)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.

[22] 洪峰. 中国城市年鉴(2022)[M]. 北京: 中国城市年鉴社, 2023.

[23] 杨艳芳, 李慧凤, 郑海霞. 北京市建筑碳排放影响因素研究 [J]. 生态经济, 2016, 32(01): 72-75.

(责任编辑 周雪梅)

## 欢迎关注《河北工程大学学报(自然科学版)》微信公众号

为更好地服务作者和读者,顺应学术期刊数字化发展趋势,本刊开通了《河北工程大学学报(自然科学版)》微信公众号。目前,微信公众号已推出“期刊浏览”“投稿指南”等板块,此后,将陆续推出“稿件查询”“热点聚焦”“编阅互动”等板块,热切期待大家持续关注。

添加微信公众号的方式有两种:一是在微信中直接搜索“河北工程大学学报自然科学版”微信公众号;二是扫描下方二维码,点击“关注”即可。河北工程大学学报编辑部欢迎作者、读者对微信公众号的建设提出宝贵建议!



河北工程大学学报编辑部