

# 不同规模城市居住建筑碳排放及 影响因素比较研究\*

张 赫, 亚 萌, 王 睿, 张建勋  
(天津大学 建筑学院, 天津 300072)

**摘要:** 为探究中国不同规模城市差异化低碳治理路径,依据城市规模划分大、中、小城市样本,基于方差分析与多元逐步回归分析的方法,对不同规模城市居住建筑能源消耗碳排放及其影响因素进行比较研究。结果显示:①大城市与中小城市居住建筑碳排放强度具有显著差异;②市政公用设施是不同规模城市居住建筑碳排放的共同影响因素,空间形态对大城市与小城市的碳排放产生不同程度的负向驱动效应,生活能源结构在中等城市与小城市中具有相反的驱动效应。据此,提出大城市应重点关注建设空间的集约化利用与清洁能源的普及,中等城市应重视冬季采暖对北方地区的居住碳排放影响,小城市具有更多影响要素,但推进冬季采暖优化与加强空间的精明发展模式是其应关注的重点内容。

**关键词:** 不同规模城市; 居住碳排放; 影响因素; 差异化; 控碳重点

**中图分类号:** TU98 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-9422(2021)03-0001-08

## Comparative Study on Carbon Emission and its Influencing Factors of Residential Buildings in Different-sized Cities

ZHANG He, YA Meng, WANG Rui, ZHANG Jian-xun

(School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to explore the differential low-carbon governance paths of different-sized cities in China, this study selects samples of large, medium and small cities according to city size and makes a comparative study on carbon emission and influencing factors of residential buildings' energy consumption in different-sized cities. ANOVA and multiple stepwise regression analysis were used for this comparative study. The results show that: ① There is a significant difference in carbon emission intensity between large cities and medium and small cities. ② Service facilities are the main and common factors affecting the carbon emission of residential buildings in different-sized cities. The spatial form has different degrees of impact on the carbon emission of large cities and medium and small cities. Domestic energy structure has the opposite driving effect in medium cities and small cities. Based on these, this paper proposes that large cities should focus on the intensive use of construction space and the popularization of clean energy, while medium cities should pay attention to the impact of winter heating on carbon emission from energy consumption of residential buildings in northern China. As for small cities, they have more influencing factors. But promoting the optimization of winter heating and strengthening the smart development model of urban space are still the key contents to reduce the carbon emission of small cities.

**Keywords:** different-sized cities; residential carbon emission; influencing factors; differentiation; carbon control

收稿日期: 2020-04-20; 修回日期: 2021-03-49

\* 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0704701); 天津市科技发展战略研究计划资助项目(19ZLZXZF00320); 天津市教委社科重大项目(2018JWZD46)

## 0 引言

全球气候变暖已成为城市可持续发展面临的重大挑战,城市碳排放是导致全球气候变暖的主要因素<sup>[1]</sup>。城市作为人类活动的载体,2015年城市二氧化碳排放量占世界二氧化碳排放总量的78%<sup>[2]</sup>。居民生活能源消耗所产生的居住碳排放作为我国城市二氧化碳排放的主要来源之一,其碳排放量占城市碳排放总量的45%~55%<sup>[3]</sup>。控制并减少城市居住碳排放已成为学界研究的重点。我国城市数量众多,规模差异显著,不同规模城市的发展水平、建成环境以及能源结构也呈现明显的差异。由此不同规模城市的居住建筑碳排放强度及其影响因素是否也存在差异化发展特征,将影响不同规模城市的低碳治理路径与策略制定。

明确不同规模城市居住建筑碳排放影响因素差异,是制定差异化低碳治理路径与策略的关键。然而,有关不同规模城市影响因素的实证研究尚未深入开展,学界既有研究主要集中于全国<sup>[4]</sup>、省(自治区)<sup>[5]</sup>、地级市<sup>[6]</sup>三个尺度的研究。研究成果表明:经济发展水平、能源消费、城市空间形态以及市政公用设施水平四个方面的相关衡量指标具有不同程度的影响作用。首先,经济发展水平的衡量指标主要为人均GDP<sup>[7]</sup>,且对碳排放具有重要的正向驱动作用<sup>[1]</sup>。例如:屈金凤等人实证分析了天津市居住碳排放的影响因素,得出人均GDP是居住碳排放的首要影响因素,对碳排放的增长具有显著推动作用<sup>[7]</sup>;Zhang Jie等人基于中国286个地级以上城市的相关数据,研究发现经济发展水平是居住碳排放的主要影响因素,在经济发展水平较低的城市具有显著的推动作用,但在经济发展水平高的城市中对碳排放具有一定的抑制作用<sup>[8]</sup>。其次,能源消费也是决定城市居住碳排放的主要因素之一<sup>[2]</sup>,既有研究对能源消费的衡量指标通常为能源消费量、能源消费结构以及能源强度<sup>[7,9]</sup>。其中,能源消费量的提高拉动了居住碳排放的增长,能源结构的优化和能源强度的降低对城市居住碳排放具有抑制效应<sup>[7,10]</sup>。第三,城市空间形态的衡量指标主要包含城市人口规模、人口密度和建设用地面积<sup>[11]</sup>。其中人口密度对城市居住碳排放产生显著的负驱动效应,而城市人口规模与建设用地面积的增长则对居住碳排放具有显著正向驱动效应<sup>[8,12]</sup>。其主要原因是城市人口密度的增加,可有效提升能源以及市政公用设施的能源效率,进而抑制城市居住碳排放<sup>[13]</sup>,而城市人口规模与建设用地面积的增长代表了人类活动的增加与经济水平的发展,进而导致了碳排放的快速增长<sup>[12]</sup>。例如:Qin等人对北京市居住碳

排放影响因素进行研究,得出提高人口密度可有效抑制居住碳排放的增加<sup>[14]</sup>;丁凡琳等人对我国287个地级市进行研究得出城市人口规模对居住碳排放具有显著的正向驱动效应<sup>[6]</sup>;Szu-Hua Wang等人以台北都会区为例,研究得出居住用地面积的增加促进了居住碳排放的增长<sup>[15]</sup>。最后,市政公用设施水平是衡量城市节能的重要因素,其通常对城市居住碳排放产生显著的正向驱动效应<sup>[5,16]</sup>。学者通常以集中供暖设施建设水平作为衡量影响城市居住碳排放的主要指标,城市集中供暖设施建设水平越发达,产生的居住碳排放越高<sup>[6,17]</sup>。例如:张艳等人对我国287个地级市居住碳排放影响因素进行研究,结果表明集中供暖设施建设水平对居住碳排放具有正向效应<sup>[16]</sup>;丁凡琳等人对于我国287个地级市的研究结果也表明集中供暖是居住碳排放的主要的驱动因素<sup>[6]</sup>。

如上所述,针对城市居住建筑碳排放影响因素,学界内已开展了诸多相关研究。但既有研究成果仍存在两方面局限性:①尚缺乏中小城市的实证检验,而无法以现有研究结论支撑不同规模城市的比较研究;②不同规模等级城市因城镇化水平与经济水平发展不同,其城市空间布局、能源消耗强度与结构、市政公用设施建设水平均存在显著差异<sup>[18-21]</sup>,此为影响居住建筑碳排放的主要因素,但对于影响因素差异性的研究并不充分。因此,仍需要开展不同规模等级城市居住建筑碳排放强度特征及其影响因素的实证研究,以明确不同规模等级城市居住建筑碳排放治理的重点管控方向。鉴于上述分析,本文延续既有研究中居住建筑碳排放的影响因素研究结论,以经济发展水平、能源消费、城市空间形态以及市政公用设施水平作为居住碳排放影响因素比较研究的重点层面。分别基于50个大城市、67个中等城市与295个小城市的相关统计数据,运用方差分析、多元逐步回归的分析方法,实证探讨不同规模城市居住碳排放影响因素的差异。以期明确以下研究问题:①城市居住建筑碳排放的强度特征是否因规模不同而存在显著差异;②不同规模等级城市居住建筑碳排放的影响因素及其内在的影响机制是否存在差异。基于以上研究结论制定不同规模等级城市居住建筑碳排放的控碳减排策略与低碳治理路径。

## 1 研究方法

### 1.1 样本选取方法

本文根据国务院《关于调整城市规模划分标准的通知》中公布的标准,以城区常住人口为标准划分城市规模:50万人以下为小城市,50~100万人为中等城市,100~500万人为大城市,500~1000万人为特大城

市,1 000 万人以上为超大城市。根据 2015 年人口统计数据,特大城市为天津、南京,超大城市为北京、上海、深圳、重庆,由于特大城市与超大城市样本量过小,不纳入本文研究范围。因此本文研究对象为大、中、小三类城市,使用分层抽样法对大、中、小城市分别进行抽样,将大、中、小城市样本组分为 1 组(G1)、2 组(G2)和 3 组(G3)。由于大中城市与小城市数量差距较大,且大中城市需满足实证研究最低样本数量要求(50 例),因此,三组抽样结果分别为 50 个(70%)、67 个(70%)、295 个(15%)。样本城市分布情况见表 1。西藏、香港、澳门以及台湾因数据缺失,在本文中不予分析。

表 1 样本城市分布

Table 1 Distribution of sample cities

省份	大城市	中等城市	小城市	省份	大城市	中等城市	小城市
河北	4	4	8	湖北	2	1	15
山西	1	1	10	湖南	0	6	12
内蒙古	1	1	8	广东	2	3	13
辽宁	3	2	3	广西	2	2	30
吉林	2	1	18	海南	1	0	3
黑龙江	3	2	8	四川	2	9	21
江苏	7	5	5	贵州	0	1	10
浙江	3	4	12	云南	0	1	18
安徽	3	5	17	陕西	1	1	9
福建	2	2	11	甘肃	1	0	14
江西	1	4	10	青海	1	0	4
山东	7	8	7	宁夏	0	0	6
河南	1	4	11	新疆	0	0	12

## 1.2 方差分析方法

本文采用单因素方差分析方法,通过对实验数据均值的分析,明确各组均值之间是否存在显著差异,从而判断某个因素对实验结果是否产生影响。因此,为探究城市居住建筑碳排放的强度特征是否因规模不同而存在显著差异,本文将大、中、小城市居住建筑碳排放强度 G1、G2、G3 作为因变量,以城市规模作为因子,采用 SPSS20.0 软件进行统计描述、单因素方差分析与平均数多重比较,分析不同规模等级城市的碳排放强度是否存在差异。

## 1.3 影响因素指标体系构建

基于既有研究,综合考虑经济发展水平、能源消费、城市空间形态与市政公用设施水平因素在不同规模城市中的差异及其对居住碳排放的影响,本文从上述四个特征层面选取衡量指标,并选用人均居住碳排放量( $t/人$ )作为对比指标,构建指标体系(见表 2)。

(1) 经济发展水平:不同规模城市在经济发展水平上存在巨大差异<sup>[12]</sup>,人均 GDP 是衡量经济发展水平的主要指标<sup>[7]</sup>,因此本文选用人均 GDP( $X_1$ ,单位:

万元/人)作为经济发展水平的衡量指标。

(2) 能源消费水平:衡量指标主要为能源消费量、能源结构与能源强度<sup>[22-23]</sup>,由于经济发展水平差异,不同规模城市在能源结构方面具有显著差异,因此选用能源结构( $X_2$ )作为能源消费的衡量指标<sup>[24]</sup>。具体选择电力能源在总能源消耗量中所占比重,即采用居民生活用电折算标煤量占能源消耗总量折算标煤量的百分比表示<sup>[25]</sup>。

(3) 城市空间形态:通常采用城市规模、人口密度以及土地利用三项指标<sup>[26]</sup>,本文为探讨不同规模城市居住碳排放影响因素的差异性,依据规模对样本城市进行分组,因此不采用城市规模作为城市空间形态的衡量指标。而选取能直接反应居民居住水平的居住人口密度( $X_3$ )和居住用地比例( $X_4$ )作为城市空间形态的衡量指标。居住人口密度为城区常住人口(万人)与居住用地面积( $km^2$ )的比值;居住用地比例则采用县城区居住用地面积( $km^2$ )与建设用地面积( $km^2$ )的比值衡量。

(4) 市政公用设施水平:包括集中供热和燃气两部分,在集中供热层面,既有研究采用采暖度日数与是否集中供热作为市政公用设施水平的衡量指标<sup>[5,16]</sup>,然而采暖度日数与是否集中供热主要受气候因素影响,难以衡量不同规模城市间公用设施水平的差异,因此在集中供热方面本文采用供热覆盖率( $X_5$ )与供热管道密度( $X_6$ )作为衡量指标。供热管道密度用供热管道长度占建成区用地面积的百分比表示,鉴于数据的可获得性,集中供热覆盖率用住宅供热面积与住宅用地面积的比值表示。燃气能源消耗虽然在既有研究中关注不足,但其作为居住碳排放的重要组成部分,不同规模城市也具有一定的差异<sup>[27]</sup>,因此本文增加燃气普及率( $X_7$ )与燃气管道密度( $X_8$ )作为衡量指标。燃气普及率用县城用气人口(万人)占县城人口(万人)的百分比表示,燃气管道密度( $km/km^2$ )用供气管道长度(km)与建成区用地面积( $km^2$ )的比值表示。

## 1.4 逐步回归方法

本研究旨在通过研究不同规模城市经济发展水平、能源消费水平、城市空间形态与市政公用设施水平因素与居住碳排放的关系,确定不同规模城市的居住碳排放影响因素。多元逐步回归分析可对自变量依次进行检验,选取具有主要影响作用的自变量进入方程,同时避免进入方程的自变量之间出现多重共线性。因此,为合理地分析人均居住碳排放量与各项衡量指标之间的关系,本研究采用多元逐步回归分析方法进行研究,建立如下回归方程模型:

表2 指标与计算方法  
Table 2 Indicators and calculation methods

指标类型	指标类型	指标名称	计算方法	单位
对比指标	碳排放量	人均居住碳排放( Y )	居住碳排放量/城区常住人口	t/人
	经济发展水平	人均 GDP( X <sub>1</sub> )	市辖区 GDP/市辖区人口	万元/人
	能源消费水平	能源结构( X <sub>2</sub> )	( 居民生活用电折算标煤量/能源消耗总量折算标煤量 ) × 100%	%
衡量指标	城市空间形态	居住人口密度( X <sub>3</sub> )	城区常住人口/居住用地面积	万人/km <sup>2</sup>
		居住用地比例( X <sub>4</sub> )	居住用地面积/城市建设用地面积 × 100%	%
	市政公用设施水平	集中供热覆盖率( X <sub>5</sub> )	( 住宅供热面积/住宅用地面积 ) × 100%	%
		集中供热管道密度( X <sub>6</sub> )	供热管道长度/建成区用地面积	km/km <sup>2</sup>
		燃气普及率( X <sub>7</sub> )	( 县城用气人口/县城人口 ) × 100%	%
		燃气管道密度( X <sub>8</sub> )	供气管道长度/建成区用地面积	km/km <sup>2</sup>

$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \cdots + b_iX_i + \varepsilon$  ( 1 )  
式中: Y 为因变量;  
 $X_i$ (  $i = 1\ 2\ 3\ \cdots\ i$  ) 为自变量;  
 $b_0$  为回归方程常数项。

2 碳排放计算与数据来源

2.1 居住建筑碳排放计算方法

居住碳排放总量构成包括燃气消耗碳排放、生活用电碳排放和集中供暖碳排放<sup>[27]</sup>。基于 2015 年中国城市与县城统计数据,采用《IPCC 温室气体排放清单指南》推荐的碳排放系数法,根据公式( 2) 计算家用燃气碳排放;依据居民生活用电量与电网碳排放因子,使用公式( 3) 计算居住生活用电碳排放;依据集中供暖面积和单位面积耗煤量,使用公式( 4) 计算集中供暖碳排放;最后根据公式( 5) ,计算人均居住碳排放<sup>[6]</sup>。

( 1) 家用燃气碳排放

$$C_1 = \sum_{i=1}^3 F_i \times NCV_i \times EF_i \times a$$
 ( 2 )

式中:  $C_1$  为家用燃气碳排放 t;  
 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  分别为人工煤气、天然气、液化石油气的消耗量 m<sup>3</sup> 或 kg;  
 $NCV_1$ 、 $NCV_2$ 、 $NCV_3$  分别为人工煤气、天然气、液化石油气的净发热量 kJ/kg;  
 $EF_1$ 、 $EF_2$ 、 $EF_3$  分别为人工煤气、天然气、液化石油气的碳排放因子( 见表 3) kg/TJ;  
 $a$  为单位换算系数,数值为 0. 001。

表3 能源净发热量与碳排放因子

Table 3 Net calorific value and carbon emission factor of energy

能源类型	净发热值/( kJ/kg)	碳排放因子/( kg/kJ)
天然气	35 584. 5	0. 000 056
液化石油气	50 179	0. 000 063 1
人工煤气	17 025. 071 43	0. 000 044 4

( 2) 居民生活用电碳排放

$$C_2 = F_4 \times EF_4 \times b$$
 ( 3 )

式中:  $C_2$  为居民生活用电碳排放 t;  
 $F_4$  为居民生活用电量,万 kW · h;

$EF_4$  为城市所在电网碳排放因子( 见表 4) ,  
t/MWh;  
 $b$  为单位换算系数,数值为 0. 1。

表4 区域电网碳排放因子

Table 4 Carbon emission factor of regional power grids

电网名称	碳排放因子/( kg/kJ)
华北区域电网	1. 058 5
东北区域电网	1. 198 3
华东区域电网	0. 941 1
华中区域电网	1. 252 6
西北区域电网	1. 032 9
南方区域电网	0. 988 53
海南省电网	0. 934 9

( 3) 集中供暖碳排放

$$C_3 = S \times qc \times EF_5 \times a$$
 ( 4 )

式中:  $C_3$  为集中供暖碳排放 t;  
 $S$  为集中供暖住宅面积 m<sup>2</sup>;  
 $qc$  为单位面积供暖耗煤量 kg/m<sup>2</sup>;  
 $EF_5$  标准煤碳排放因子 2. 46 kg/kg;  
 $a$  为单位换算系数,数值为 0. 001。

( 4) 人均居住碳排放

$$C = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{P}$$
 ( 5 )

式中:  $C$  为人均居住碳排放 t/人;  
 $C_1$  为家用燃气碳排放量 t;  
 $C_2$  为生活用电碳排放量 t;  
 $C_3$  为集中供暖碳排放量 t;  
 $P$  为城区人口,人。

各规模城市人均碳排放及各类能源碳排放计算结果如表 5 所示。

除以上能源形式,我国北方仍有部分中小城市存在分散供暖现象。但由于本文讨论对象仅为大、中、小城市的城区、县城范围,不包括村镇地区,因此样本中分散供暖现象整体占比不高。据统计,2015 年中国北方市县区供暖面积约为 110 亿 m<sup>2</sup>,其中集中供暖占

比为 88% ,分散式供暖仅占 12%<sup>[28]</sup>。分散式供暖系统又包括燃气供暖、大型电锅炉供暖以及地热供暖等。以上供暖方法所产生碳排放已计入电、燃气碳排放计量中 ,剩余燃煤供暖及燃油供暖占比较少 ,且不易统

计。加之近年来 ,我国北方地区大力推进“煤改燃、煤改气”工程 ,在市区、县城等城市地区散煤燃烧现象基本杜绝<sup>[28 29]</sup> ,因此本研究将该部分碳排放计量做忽略处理。

表 5 能源碳排放数据

Table 5 Carbon emission data of various energy sources

碳排放类型	城市规模	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
人均居住碳排放( C )	大	50	1. 858	1. 747	0. 535	12. 988
	中	67	1. 094	0. 503	0. 449	2. 619
	小	295	1. 067	0. 755	0. 150	4. 073
家用燃气碳排放( C <sub>1</sub> )	大	50	32. 180	33. 309	7. 917	212. 841
	中	67	9. 896	6. 110	1. 525	29. 398
	小	295	3. 028	3. 992	0. 049	43. 435
居民生活用电碳排放( C <sub>2</sub> )	大	50	198. 210	156. 631	40. 517	654. 754
	中	67	49. 497	23. 699	19. 616	161. 983
	小	295	12. 625	13. 028	0. 775	100. 839
集中供暖碳排放( C <sub>3</sub> )	大	50	231. 389	195. 034	4. 636	784. 922
	中	67	58. 030	36. 073	2. 476	142. 750
	小	295	21. 361	19. 057	0. 050	69. 925

## 2.2 数据来源

本文人口数据、用地面积、居民燃气消耗量、集中供热住宅面积、管道长度与燃气普及率来源于《中国县城建设统计年鉴 2015》、《中国城市建设统计年鉴 2015》,居民生活用电量来源于《中国城市统计年鉴 2016》以及各县统计公报 ,各类能源折标煤系数、净发热值来源于《中国能源统计年鉴 2016》,各区域电网排放因子来源于《2009 年中国区域电网基准线排放因子的公告》,单位面积耗煤量取自 JGJ 26—95《中华人民共和国行业标准民用建筑节能设计标准( 采暖居住建筑部分) 》;碳排放系数来源于 IPCC。

## 3 结果

### 3.1 不同规模等级城市居住建筑碳排放强度比较结果

本文以大、中、小城市居住碳排放强度为因变量 ,以城市规模等级作为影响因子 ,基于 SPSS 20.0 软件进行描述统计与单因素方差分析 ,进而确定大、中、小城市居住建筑碳排放强度以及城市居住建筑碳排放的强度特征是否因规模等级不同而存在显著差异;并且运用 LSD 法进行多重比较 ,分析大、中、小城市碳排放强度组间差异显著性。具体结果如下:

(1) 根据描述统计结果 ,大( G1)、中( G2) 和小城市( G3) 人均居住建筑碳排放强度分别为 1.86 t、1.09 t 和 1.07 t( 见表 6)。

(2) 单因素方差分析与 LSD 检验结果显示 ,G1 与 G2、G1 与 G3 有显著性差异(  $P < 0.05$ ) ,G2 与 G3 无显著性差异(  $P > 0.05$ ) ( 见表 7、8)。

### 3.2 不同等级规模城市居住建筑碳排放影响因素比较结果

本文以不同规模城市居住碳排放为因变量 ,以城市经济发展水平、能源消费、空间形态、市政公用设施水平四个方面的衡量指标为自变量。基于 SPSS20.0 软件对其进行多元逐步回归分析 ,进而确定影响不同规模城市居住碳排放量的相关因素及其产生的驱动效应。具体结果如下:

(1) 影响大城市居住碳排放的重要因素依次为居住人口密度、集中供热覆盖率、燃气普及率 ,标准化系数分别为 -0.893、0.577、-0.396 ,回归方程拟合优度 R 值为 0.758 ,调整后的 R<sup>2</sup> 值为 0.524 ,居住人口密度的 sig 值小于 0.001 ,集中供热覆盖率的 sig 值为 0.002 ,燃气普及率的 sig 值为 0.012 ,回归方程拟合效

表 6 描述统计结果

Table 6 Results of descriptive statistical

城市规模	样本个数	均值	标准差	标准误差	均值的 95%置信区间		极小值	极大值
					上限	下限		
大城市	50	1. 858	1. 747	0. 274	1. 362	2. 355	0. 535	12. 988
中等城市	67	1. 094	0. 503	0. 061	0. 972	1. 217	0. 449	2. 619
小城市	295	1. 067	0. 755	0. 439	0. 980	1. 153	0. 150	4. 073
总数	412	1. 167	0. 937	0. 046	1. 076	1. 258	0. 150	12. 988

表7 单因素方差分析结果  
Table 7 Results of one-way analysis of variance

	平方和	df	均方	F	Sig
组间	27.214	2	13.607	16.673	0.000
组内	333.794	409	0.816		
总数	361.008	411			

注: sig 值显示 0.000 为软件自动生成的结果,其代表 sig 值 < 0.001。

表8 多重比较结果  
Table 8 Results of least-significant difference (LSD) test

因变量: 居住建筑碳排放强度						
(I) G1 大城市; G2 中等城市; G3 小城市	(J) G1 大城市; G2 中等城市; G3 小城市	均值差 (I - J)	标准误差	显著性	95%置信区间	
					下限	上限
G1	G2	0.764 <sup>*</sup>	0.169	0.000	0.432	1.096
	G3	0.792 <sup>*</sup>	0.138	0.000	0.520	1.063
G2	G1	-0.764 <sup>*</sup>	0.169	0.000	-1.096	-0.432
	G3	0.027	0.122	0.822	-0.213	0.268
G3	G1	-0.792 <sup>*</sup>	0.138	0.000	-1.063	-0.520
	G2	-0.027	0.122	0.822	-0.268	0.213

注: ①\*: 均值差的显著性水平为 0.05; ②sig 值显示 0.000 为软件自动生成的结果,其代表 sig 值 < 0.001。

表9 大城市居住碳排放影响因素回归分析结果  
Table 9 Regression analysis results of the influencing factors of residential carbon emission in large cities

变量类型	变量名称	标准化系数	R	R <sup>2</sup>	Sig	驱动效应
城市空间形态	居住人口密度	-0.893			0.000	负向
市政公用设施水平	集中供热覆盖率	0.577	0.758	0.524	0.002	正向
	燃气普及率	-0.396			0.012	负向

注: sig 值显示 0.000 为软件自动生成的结果,其代表 sig 值 < 0.001。

排放的影响作用较小。

(2) 影响中等城市居住碳排放的重要因素为集中供热覆盖率与能源结构。其标准化系数依次为 0.519、-0.435, 回归方程拟合优度 R 值为 0.868, 调整后的 R<sup>2</sup> 值为 0.731, 集中供热覆盖率 sig 值为 0.001, 人均 GDP 的 sig 值为 0.005, 回归方程拟合效果良好(见表 10)。结果表明: 衡量市政公用设施水平的集中供热覆盖率与衡量能源消费的能源结构是中等城市居住碳排放的重要影响因素。其中, 集中供热覆盖率对中等城市居住碳排放具有显著正向驱动效应, 能源结构对中等城市碳排放产生负向驱动效应。

(3) 影响小城市居住碳排放的重要因素依次为集中供热覆盖率、居住人口密度、人均 GDP、能源结构、

果良好(见表 9)。结果表明: 衡量城市空间形态的居住人口密度、市政公用设施水平的集中供热覆盖率与燃气普及率是影响大城市居住碳排放的重要影响因素。其中, 居住人口密度与燃气普及率对大城市居住碳排放产生了显著负向效应, 集中供热覆盖率对大城市居住碳排放产生了显著的正向驱动效应。衡量经济发展水平与能源消费的相关指标对大城市居住碳

燃气管道密度。其标准化系数依次为 1.003、-0.695、0.246、0.292、-0.109, 回归方程拟合优度 R 值为 0.849, 调整后的 R<sup>2</sup> 值为 0.707, 集中供热覆盖率、人均 GDP、居住人口密度、能源结构的 sig 值均小于 0.001, 燃气管道密度 sig 值为 0.047, 回归方程拟合效果良好(见表 11)。结果表明: 衡量小城市市政公用设施水平的集中供热覆盖率与燃气管道密度、衡量城市空间形态的居住人口密度、衡量经济发展水平的人均 GDP、衡量能源消费的能源结构是小城市居住碳排放的重要影响因素。其中集中供热覆盖率、人均 GDP、能源结构对小城市居住碳排放产生了显著的正向驱动效应; 居住人口密度、燃气管道密度对小城市居住碳排放产生了显著的负向驱动效应。

表10 中等城市居住碳排放影响因素回归分析结果  
Table 10 Regression analysis results of the influencing factors of residential carbon emission in medium cities

变量类型	变量名称	标准化系数	R	R <sup>2</sup>	Sig	驱动效应
市政公用设施水平	集中供热覆盖率	0.519	0.868	0.731	0.001	正向
能源消费	能源结构	-0.435			0.005	负向

注: sig 值显示 0.000 为软件自动生成的结果,其代表 sig 值 < 0.001。

表 11 小城市居住碳排放影响因素回归分析结果

Table 11 Regression analysis results of the influencing factors of residential carbon emission in small cities

变量类型	变量名称	标准化系数	R	R <sup>2</sup>	Sig	驱动效应
市政公用设施水平	集中供热覆盖率	1.003			0.000	正向
城市空间形态	居住人口密度	-0.695			0.000	负向
经济发展水平	人均 GDP	0.246	0.849	0.707	0.000	正向
能源消费	能源结构	0.292			0.000	正向
市政公用设施水平	燃气管道密度	-0.109			0.047	负向

注: sig 值显示 0.000 为软件自动生成的结果,其代表 sig 值 < 0.001。

#### 4 结论与建议

本文基于不同规模城市居住建筑碳排放影响因素的实证研究,针对城市居住建筑碳排放的强度特征是否因规模不同而存在显著差异、不同规模等级城市居住建筑碳排放的影响因素及其背后的影响机制是否存在差异两个问题,得出以下研究结论:

(1) 大(G1)、中(G2)和小城市(G3)人均居住碳排放分别为 1.86 t、1.09 t 和 1.07 t。单因素 ANOVA 分析结果显示,G1 和 G2、G1 和 G3 之间存在显著差异( $P < 0.05$ ),G2 和 G3 之间不存在显著差异( $P > 0.05$ )。结合各规模城市样本均值、标准差分析可知,中等城市、小城市的居民建筑碳排放强度平均值分别为 1.09 t、1.07 t,分别为大城市的 59%、58%,中、小城市碳排放强度相近且明显低于大城市。根据标准差可知中等城市、小城市内部差异性较小。导致此差异性的原因可能为中、小城市发展水平差异性较低,且中、小城市能源消费结构和能源消费水平差距较小,而大城市高水平城镇化带来的能源消费需求,相比于中、小城市大幅增加且人口过度聚集导致了设施需求增长和能源损耗偏多。

(2) 从三种规模等级城市中居民建筑碳排放影响因素差异性分析结果显示,既有研究结论所涉及的能源消费水平、经济发展水平、城市空间形态以及市政公用设施四方面影响因素对不同规模等级城市具有不同的影响关系和主导性。结合研究结果,大、中、小城市居住建筑碳排放影响因素具有一定差异且其内在影响机制有所不同:

大城市居住建筑碳排放影响因素主要为居住人口密度、集中供热覆盖率、燃气普及率。其中,人口密度分布在不同地域间差距巨大,也是城镇化水平的标志性指标之一,也进一步验证了既有研究中的人口密度越高则居住碳排放越低的影响关系;集中供暖同样对居住建筑碳排放具有较大影响,是北方大城市居住建筑碳排放的主要正向驱动因素。南方城市不存在普遍性的集中供暖形式,但其空调使用时间较长,产生的碳排放不容忽视。进一步对东部地区大城市人均生活用电量进行统计,结果显示南方地区大城市人

均生活用电量约为北方大城市的 1.7 倍。但由于当前集中供热仍以煤炭作为主要能源,碳排放因子较高。因此,集中供热产生的影响仍大于电量增长产生的影响。除此之外,燃气作为我国清洁能源之一,其水平提高也对我国大城市碳排放增长起到了较好的抑制作用。

中等城市与小城市是我国城镇化的中坚力量且多处于城镇化快速发展时期<sup>[20]</sup>。其中,中等城市经济发展水平与大城市相接近,高于小城市,整体处于较高水平,居民生活能源需求也基本得到满足。经济发展水平的进一步提升,不会显著推动生活能源需求的增长,而是促进生活能源消费之外其他消费的提升。但在生活能源需求相对稳定的情况下,能源结构的提升能够有效抑制居住建筑碳排放的增长。因此,在中等城市中人均 GDP 不具有显著影响作用,而能源结构具有显著负向驱动效应。除此之外,供暖也是和大城市相近的碳排放主要影响因素。

而与大、中城市相比,小城市的主要影响因素较多。这也反映了我国小城市居民建筑碳排放的差异性与能源消费、经济发展水平、城市空间形态以及市政公用设施差异均产生较强影响关系。其中,集中供热普及率为主导因素,冬季采暖所产生的碳排放仍然是我国北方小城市的居住碳排放的主要影响因素。在小城市中也进一步验证了人口密度对碳排放的负影响关系,可见土地的集约化利用和城市精明增长模式对小城市低碳发展起到较为关键的作用。与大、中城市相比,小城市经济发展水平较低,经济发展水平提升能够推动生活能源需求的增长。经济水平的发展也促进了能源结构的提高,但同时也伴随着能源总量的增长与居住建筑碳排放的增加。除此之外,燃气管道密度的降低表征着市政设施水平的提高,从而对碳排放产生一定抑制作用,但影响作用相对较弱。

基于以上研究结论,应对大城市、中等城市和小城市的居住建筑碳排放治理,采取差异化控碳策略。对于大城市,应重点关注城市建设空间的集约化利用、清洁能源的进一步普及以及市政设施水平和结构的进一步优化。而对于中等城市,则应更加重视冬季

采暖对于北方城市的居住能源消耗影响,采用更为多元化的供热能源和管网布局方式,进一步推动生活节能热源应用;同时也应进一步优化能源结构,增加电力等清洁能源供给。小城市具有多重影响因素,在推进冬季采暖优化的同时,也应注重精明增长的发展模式在城市空间建设中的应用,促进能源集约利用,避免城市低密度扩张造成的生活能源低效利用。本研究从宏观视角对我国大、中、小城市居住建筑碳排放及影响因素进行比较研究,未来应结合具体城市案例对其影响机制及控碳策略进行更为深入的探索。

#### 参考文献:

- [1] Jinpei Ou, Xiaoping Liu, Shaojian Wang, et al. Investigating the Differentiated Impacts of Socioeconomic Factors and Urban Forms on CO<sub>2</sub> Emissions: Empirical Evidence From Chinese Cities of Different Developmental Levels [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 601 – 614.
- [2] 王悦, 李锋, 孙晓. 城市家庭消费碳排放研究进展 [J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1201 – 1212.
- [3] 杜威. 基于 LMDI 分解模型的中国居民生活间接碳排放特征分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S2): 5 – 9.
- [4] 汪臻, 汶醒君. 基于指数分解的居民生活用能碳排放影响因素研究 [J]. 生态经济, 2015, 31(4): 51 – 55.
- [5] 计志英, 赖小锋, 贾利军. 家庭部门生活能源消费碳排放: 测度与驱动因素研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 64 – 72.
- [6] 丁凡琳, 陆军, 赵文杰. 城市居民生活能耗碳排放测算及空间相关性研究——基于 287 个地级市的数据 [J]. 经济问题探索, 2019, (5): 40 – 49.
- [7] 屈金凤, 楚春礼, 鞠美庭, 等. 居民生活能源消费碳排放驱动因素分解——以天津市为例 [J]. 生态经济, 2017, 33(4): 38 – 42.
- [8] Jie Zhang, Yang Xie, Bo Luan, et al. Urban Macro-Level Impact Factors on Direct CO<sub>2</sub> Emissions of Urban Residents in China [J]. Energy and Buildings, 2015, 107: 131 – 143.
- [9] 梅林海, 蔡慧敏. 中国南北地区生活消费人均碳排放影响因素比较——基于空间计量分析 [J]. 生态经济, 2015, 31(7): 45 – 50.
- [10] 方德斌, 陈卓夫, 郝鹏. 北京城镇居民碳排放的影响机理——基于 LMDI 分解法 [J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2019, 21(3): 30 – 38.
- [11] 杨磊, 李贵才, 林姚宇. 影响城市居民碳排放的空间形态要素 [J]. 城市发展研究, 2012, 19(2): 26 – 31.
- [12] Yanchun Yi, Sisi Ma, Weijun Guan, et al. An Empirical Study on the Relationship Between Urban Spatial Form and CO<sub>2</sub> in Chinese Cities [J]. Sustainability, 2017, 9(4): 672.
- [13] Xiaochen Liu, John Sweeney. Modelling the Impact of Urban Form on Household Energy Demand and Related CO<sub>2</sub> Emissions in the Greater Dublin Region [J]. Energy Policy, 2012, 46: 359 – 369.
- [14] Bo Qin, Sun Sheng Han. Planning Parameters and Household Carbon Emission: Evidence From High – and Low-Carbon Neighborhoods in Beijing [J]. Habitat International, 2013, 37: 52 – 60.
- [15] Szu-Hua Wang, Shu-Li Huang, Po-Ju Huang. Can Spatial Planning Really Mitigate Carbon Dioxide Emissions in Urban Areas? A Case Study in Taipei, Taiwan [J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 169: 22 – 36.
- [16] 张艳, 陈太政, 秦耀辰. 中国城市居民直接能耗碳排放的空间格局及影响因素 [J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(2): 161 – 167.
- [17] 章蓓蓓, 成虎, 张涛, 等. 市政基础设施碳排放核算框架研究 [J]. 工程管理学报, 2010, 24(6): 626 – 630.
- [18] 武俊奎. 城市规模、结构与碳排放 [D]. 上海: 复旦大学, 2012.
- [19] 韩柯子, 石楠. 城市规模密度、用地结构对市政基础设施投资水平影响关系的实证研究 [J]. 经济问题探索, 2019, (8): 66 – 72.
- [20] 刘珺. 我国中小城市城市化发展模式研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [21] 陈龙. 城市规模影响能源效率的统计研究 [D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017.
- [22] 曲建升, 刘莉娜, 曾静静, 等. 中国城乡居民生活碳排放驱动因素分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(8): 33 – 41.
- [23] 王莉叶, 陈兴鹏, 庞家幸, 等. 基于 LMDI 的能源消费碳排放因素分解及情景分析——以兰州市为例 [J]. 生态经济, 2019, 35(9): 38 – 44.
- [24] 程开明, 徐扬. 城市蔓延对电力强度的影响——基于中国地级及以上城市面板数据的分析 [J]. 城市问题, 2019, (7): 37 – 42.
- [25] 任悦. 河北省农村居民碳排放影响因素的实证研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- [26] 陈珍启, 林雄斌, 李莉, 等. 城市空间形态影响碳排放吗? ——基于全国 110 个地级市数据的分析 [J]. 生态经济, 2016, 32(10): 22 – 26.
- [27] 陈双庆. LNG 在中小城市的应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [28] 方豪, 夏建军, 林波荣, 等. 北方城市清洁供暖现状和技术路线研究 [J]. 区域供热, 2018, (1): 11 – 18.
- [29] 魏传桂. 西安地区城镇居住建筑采暖模式研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2018.

作者简介: 张赫(1982),男,满族,陕西汉中,毕业于天津大学,城乡规划专业,博士,研究方向:低碳城市规划、海岸带规划(ccazh2000@sina.com)。