

长江经济带能源消费碳排放强度时空演变及影响因素¹

赵 凡¹, 许 佩^{2*}

(1. 武汉科技大学法学与经济学院, 湖北 武汉 430065; 2. 扬州大学商学院, 江苏 扬州 225100)

【摘要】: 城市是碳排放最集中的地区, 同时由于城市部门众多、管辖力强, 也是深度参与和有力执行国家减排目标和减排政策最合适的尺度。选取 2003~2020 年长江经济带 108 个城市相关数据, 测算了各城市的能源消费碳排放强度, 进一步采用核密度分析、STIRPAT 模型和面板分位数回归模型, 分析长江经济带城市能源消费碳排放强度的时空特征和影响机理, 结果表明: (1)2003~2020 年长江经济带城市平均能源消费碳排放强度基本一直保持下降的趋势, 从 2003 年的 1.87t/万元降至 2020 年的 0.51t/万元, 年平均增长率为-7.34%。(2)长江经济带城市能源消费碳排放强度在空间上呈现出从由化石能源相对稀缺的下游地区向相对丰裕的中上游地区不断增强的趋势, 从城市规模来看呈现“小城市>中等城市>大城市”的等级规模特征。(3)经济增长、人口规模、政府干预和产业结构升级显著抑制能源消费碳排放强度提升, 人力资本水平和能源强度是使城市能源消费碳排放强度增大的主要因素, 其中人力资本水平的正向促进作用在能源强度低的城市不显著。

【关键词】: 城市碳排放强度; STIRPAT 模型; 面板分位数回归; 长江经济带

【中图分类号】: F427 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004- 8227(2023) 11- 2225- 12

随着全球气候变暖、极端气候事件频繁发生, 全球性气候变化已经成为全人类正在面对和亟待解决的重大命题。习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上郑重宣布: “中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和”。其中, 城市作为经济活动的中心, 是生产和生活的主要场所, 大量产业与人口大规模集聚到城区, 能源消耗和污染排放规模也随之扩大, 生态环境负担加重。同时, 由于城市部门众多、管辖力强, 也是深度参与和有力执行国家减排目标和减排政策最合适的尺度。而长江经济带城市群作为中国经济密度最大的流域地带, 据统计, 2020 年底长江经济带 11 省市常住人口达到 6.06 亿人, 占全国人口总量的 43%, 平均城镇化率达到 61.70%; 同时地区生产总值达到 471 580 亿元, 占全国的 46.42%, 这组数据说明长江经济带的经济地位至关重要, 但事实上其大部分城市的发展仍然是以工业为主的“二、三、一”产业结构模式。这虽然能在一定时期内迅速产生经济效益, 但长远来看这种产业发展模式并不能促进经济持续增长, 还带来了较为严重的环境污染问题。综上所述, 鉴于长江经济带城市较为集中, 且横跨东、中、西三大区域, 考察其城市尺度能源消费碳排放特征、探究其碳减排路径, 对于中国城市“双碳”目标的实现具有重要的现实意义。

通过梳理相关文献发现, 城市尺度碳排放研究的关键在于如何确定城市碳排放边界, 目前城市碳排放的覆盖范围仍存在较

¹ 收稿日期: 2023- 03- 29; 修回日期: 2023- 05- 26

基金项目: 国家社会科学基金青年项目(21CJY031); 湖北省社会科学基金一般项目(2021133)

作者简介: 赵 凡(1991~), 女, 讲师, 主要研究方向为低碳经济. E - mail: zhaofana@yeah.net

* 通讯作者 E- mail: 1564840115@qq.com

大争议。其中，IPCC 提出的城市碳排放核算边界就是指城市边界内燃料燃烧或工业过程的排放，现有城市碳排放研究主要围绕燃料燃烧或工业生产过程在城市边界内产生的排放和城市边界范围内因为供电、供热等行为消耗的能源产生的排放展开，研究的框架和方法也更为成熟。鉴于统计口径不一致和城市碳排放相关数据缺乏系统性等现实问题，城市尺度碳排放核算难度较大，文献相对较少。总结来看，关于城市尺度能源消费碳排放的测算方法包括以下几种：碳排放核算清单等排放因子法、质量平衡法和实测法。排放因子法是一种严格按照碳排放清单设计每一种排放源的排放因子的核算方法，目前在不同尺度的碳排放研究中得到广泛应用。排放源的碳排放估计值一般用排放因子和排放源的活动数据的乘积来衡量，其中碳排放核算的重要依据是碳排放核算清单，该清单同时也是碳排放核算实现标准化的重要凭据。为了真实地反映各国国情，各国和学术界根据本国国情和地方属性构建了符合各自国家和区域实际的排放因子，例如中国的《省级温室气体清单编制指南》。现今，国内外学者在已有国家尺度碳排放核算清单的基础上对城市尺度碳排放核算清单的编制展开了进一步研究，并将其应用于实践研究[1]，同时已有研究表明该种测算方法的实际误差在 10%左右，相对于其他核算方法该方法更贴近中国实际[2]。

探究碳排放的影响因素，能够为碳减排的路径识别提供有效信息。纵观国内外已有研究，影响碳排放的因素主要包括经济因素、人口因素和技术因素等。Narayan 等[3]以 43 个发展中国家为研究样本，实证检验了经济发展水平与碳排放的关系，研究结果证明了环境库兹涅兹曲线，即短期内碳排放增加与经济增长同步，长期来看，随着经济增长碳排放量有下降态势。彭璐璐等[4]利用结构分解分析法，量化了影响因素对居民消费间接碳排放的贡献，研究发现：收入规模和人口规模对其具有显著的正向促进作用，而生产技术和消费倾向则大大抵消了上述影响。张云辉等[5]也证明了收入差距与碳排放之间存在显著的“U”型曲线关系。从中国发展现实来看，技术进步、能源结构调整和效率提高是实现碳减排目标的三大主要途径[6]。杨莉莎等[7]构建了一致性宏观二氧化碳反弹效应研究框架，定量分析了中国省域不同产业二氧化碳排放与技术进步之间的关系，研究结果表明：技术进步带来的理论减排率为 5.66%，技术进步显著推动了中国碳减排进程，而能源消费结构调整和生产效率提高的碳减排作用并不十分显著。随着研究的不断深入，产业结构、对外贸易、城镇化水平、能源结构和政府干预也被证明是影响碳排放的重要因素。Zhang 等[8]建立柯布道格拉斯模型，探究了中国城镇化与城市碳排放之间的关系，研究发现：城镇化主要通过影响能耗作用于碳排放，城镇化显著推动能源消耗增加，进而使得能源消费碳排放量增加。王雅晴等[9]的研究同样也证明了这个观点，文章以 158 个地级市为研究对象，探究了 2006~2015 年的能源碳排放特征，研究表明：城市化每提升 0.095%，总能耗上升 1%。王兆峰等[10]研究发现新型城镇化与旅游业碳排放之间呈显著的“N”型曲线关系。产业结构调整同样也是影响碳排放的重要因素，产业结构调整有利于降低污染产业比重，进而减少碳排放。郭艺等[11]也利用实证数据对其进行检验，研究发现：区域一体化政策可以通过促进产业结构升级推进城市节能减排进程。

囿于能源消费量数据可得性，梳理发现现有研究存在如下不足之处，一是测度城市碳排放时较多研究只采用 8、9 种一次能源，较少的种类无法有效反映地区碳排放的实际情况[12,13]。二是目前城市尺度碳排放的研究范围相对较窄，主要集中于北京、上海、广州等大城市或典型城市[14]，忽略对中小城市的研究，但是不同城市规模间的碳排放情况存在较大差异，受到多种因素影响，对其进行研究对于推进城市碳减排进程具有重要的现实意义。鉴于此，本文利用 17 种一次能源，以 IPCC 核算清单为基础，综合考虑中国自身实际，对 2003~2020 年长江经济带 108 个不同类型城市的能源消费碳排放量进行了核算，据此分析了能源消费碳排放强度的时空演变特征；进一步采用 STIRPAT 模型分析城市能源消费碳排放强度的影响因素以及城市异质性，在此基础上提出不同类型城市的低碳发展路径。

1 研究方法数据来源

1.1 城市能源消费碳排放强度的测度

具体测算方法如下，主要根据 IPCC 推荐的测算方法，测算了上述 17 种一次能源在 47 个部门产生的直接能源消费碳排放量，具体公式如下：

$$C = \sum_i \sum_j C_{ij} = \sum_i \sum_j E_{ij} \times NCV_i \times EF_i \times$$

$$O_{ij}, i \in [1, 17], j \in [1, 47] \quad (1)$$

式中： C_{ij} 为上述一次能源消费产生的碳排放量(百万吨, Mt); E_{ij} 表示第 i 种能源在 j 部门的消费总量(104 t 或 108 m3); NCV_i 表示第 i 种能源的平均低位发热量(PJ/104 t, 108 m3); EF_i 表示第 i 种能源的排放因子(t-能源消费碳排放/TJ); O_{ij} 表示第 i 种能源在第 j 个部门的碳氧化率(%)。为了更加贴合中国实际和提高准确率, 故本文选取了贴合中国实际的碳排放参数[15]。较多研究表明, 能源消费碳排放量的多少与区域经济发展水平以及经济结构密切相关。为了深入分析城市经济增长和能源消费碳排放之间的关系, 本文借鉴王少剑等[16]的做法, 使用各城市能源消费碳排放总量/地区生产总值(t/万元)来测度能源消费碳排放强度。

1.2 核密度估计法

核密度分析是一种常见的非参数检验方法, 用来描述变量的分布情况。它不需要设置函数形式, 具有用连续曲线来刻画变量变化情况的特点[17]。具体公式如下:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \quad (2)$$

式中: n 是观测样本的数量; h 表示带宽; X_i 表示 i 市能源消费碳排放强度; $K(\cdot)$ 表示核函数, 本研究采用高斯核函数对区域能源消费碳排放强度的时空演化规律进行分析。具体公式如下:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] \quad (3)$$

1.3 STIRPAT 模型

现有关于碳排放的影响因素的研究, 主要基于 STIRPAT 模型、结合 Kaya 恒等式、投入产出模型和 LDMI 分解模型以及多种计量分析方法。其中, STIRPAT 模型已经被广泛运用于研究碳排放的驱动因素, 其将人口、经济和技术等要素的影响作为参数通过计量的手段估计各个要素对碳排放的影响。标准的 STIRPAT 模型如下:

$$I = a P^b \times A^c \times T^d e \quad (4)$$

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + e \quad (5)$$

式中: I 代表城市能源消费碳排放强度; a 是常数项; P 代表人口因素; A 代表经济因素; T 代表技术因素; e 为随机误差项。上式主要反映了人口、富裕程度和技术水平与生态环境之间的线性关系, 目的在于分析经济增长、人口规模、技术水平等要素对碳排放的影响。

参照已有研究,本文进一步拓展 STIRPAT 模型。研究表明人口能够通过生产、生活行为影响碳排放[18],人口规模的大小对碳排放强度产生不同影响,因此本文选取人口规模(POP)代表人口因素。经济发展水平越高越能够通过改变生产和消费模式,进而影响碳排放强度,因此本文选取人均地区生产总值(RGDP)代表经济因素。第三产业占比较大的产业结构有助于提高经济增长质量,且能源利用效率和技术创新水平提高是实现碳减排的关键[19],因此,本文选取产业结构(RI)、能源强度(EI)和人力资本水平(HC)代表技术因素。而政府干预能够对经济发展和环境保护产生重要影响,也是经过实践检验的共识,因此,本文选取政府干预(GOV)代表制度因素。综上所述,本文将以上因素均纳入 STIRPAT 模型,探究影响城市的碳减排路径,考察能源消费碳排放强度与影响因素之间的关系。

$$\ln I_{it} = \ln a + b_1 \ln RGDP_{it} + b_2 \ln POP_{it} + b_3 \ln GOV_{it} + b_4 \ln HC_{it} + b_5 \ln EI_{it} + b_6 \ln RI_{it} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

1.4 面板分位数回归模型

事实上,不同碳排放强度下,经济增长等变量的影响效应是否存在不同的显著性结构变化值得探究,分位数回归相较于传统回归方法更为详细且不易受极端值的影响。鉴于此,本文借鉴 Lin 等[20]的研究,0.1、0.25、0.5、0.75 和 0.9 五个分位数指数来评估在不同能源消费碳排放强度下各影响因素影响效应的变动轨迹。具体模型如下:

$$Q_{\ln I_{it}}(\theta/X_{it}) = \ln a_i + \beta_{1,\theta} \ln RGDP_{it} + \beta_{2,\theta} \ln POP_{it} + \beta_{3,\theta} \ln GOV_{it} + \beta_{4,\theta} \ln HC_{it} + \beta_{5,\theta} \ln EI_{it} + \beta_{6,\theta} \ln RI_{it} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

式中: i、t 和 q 分别表示城市、时间和分位数。

1.5 数据来源

鉴于数据可得性和统计口径的一致性,数据主要来源于 2004~2021 年的《中国城市统计年鉴》《中国区域统计年鉴》,以及各地级市历年的统计公报和统计年鉴,且各货币量指标均以 2000 年为基期进行平减调整。本文对个别缺失值采用插值法进行补充。各变量的描述性统计情况报告于表 1。

表 1 各变量的描述性统计情况

符号	指标测度和说明	均值	标准差	最小值	最大值	观测值
lnI	城市能源消费碳排放量/GDP	0.699	0.392	0.031	2.513	1 944
lnRGDP	人均地区生产总值	10.156	0.931	7.548	12.467	1 944
lnPOP	年末常住人口	6.011	0.618	4.261	8.136	194
lnGOV	财政支出占 GDP 的比重	0.155	0.070 2	0.048	0.910	1 944
LnHC	中学及以上学生数占总人口的比重	0.072 0	0.026 3	0.015	0.282	1 944
lnEI	全社会用电量/GDP	0.059 3	0.039 3	0.007	0.282	1 944
lnRI	第三产业生产总值占 GDP 的比重	0.330	0.061 8	0.188	0.574	1 944

资料来源:根据测算结果及相关统计年鉴与统计公报资料整理。

2 实证分析

2.1 城市能源消费碳排放强度的时序演变特征分析

从长江经济带整体来看,长江经济带 108 个城市 2 的平均能源消费碳排放强度的时序演变趋势如图 1 所示,在研究阶段内基本一直保持下降的趋势,从 2003 年的 1.87 t/万元降至 2020 年的 0.51 t/万元,年平均增长率为 -7.34%。研究阶段内一般分为两个阶段,第一阶段为快速下降期(2003~2012 年),平均能源消费碳排放强度快速降低,在 2012 年突破 1 t/万元的边界,碳排放强度由 1.87 t/万元降至 0.92 t/万元,年平均增长率为 -7.54%。该阶段内长江经济带特别是长三角地区经济发展水平不断提高,创造了较多的区域财富,低碳技术特别是与能源相关的技术水平也通过引入发达国家绿色技术和吸收资金而不断提升,碳排放强度因此不断降低。第二个阶段是平稳下降期(2013~2020 年),该阶段平均能源消费碳排放强度由 0.78 t/万元降至 0.51 t/万元,年平均增长率为-7.12%,这个阶段长江经济带的经济增长方式正在逐步转变,产业结构也发生了较大变化,正逐步由第二产业为主导向第三产业为主导过渡,大部分城市已不需要以牺牲环境为代价实现经济增长,且关于节能减排和低碳技术的研发和创新也在有条不紊的推进过程中。总体上看,长江经济带经济在经济发展水平不断提升的情况下,亟需摆脱过去粗放型增长模式向集约型转型,而能源消费碳排放强度的变化也在一定程度上折射出这一发展态势。

分区域来看,三大城市群的能源消费碳排放强度总体均呈现下降趋势,并呈现出显著的“上游、中游、下游”梯度递减的区域差异特征,2003~2020 年三大区域的碳排放强度均值分别为 1.33、1.14 和 0.77 t/万元。图 1 明显可以看出,长江经济带下游城市的能源消费碳排放强度持续下降,远远低于整体水平,由 2003 年的 1.51 t/万元快速下降至 2020 年的 0.38 t/万元,这主要是因为长江下游地区城市在改革开放的浪潮中由于其近海的地理优势,率先发展起来,经济发展水平相对较高,且经济结构在发展过程中也在不断调整,趋于合理化,产业发展并不以能源消费为主动力,因此该地区能源消费碳排放强度在发展中不断下降。长江经济带中游城市能源消费碳排放强度的时间变动趋势与区域整体大体一致,并在 2012 年以后基本重合,整体上保持下降趋势,其中 2004~2011 年这段时期内能源消费碳排放强度高于区域整体状况,这主要是因为中游地区城市经济发展相对缓慢,产业结构基本以第二产业为主,高技术产业发展滞后,经济发展对能源消费有一定的依赖性,而在 2012 年以后中国经济增长速度趋缓,经济结构趋优,在这样的发展背景下中游地区的经济发展尤其是工业结构也逐渐向绿色转型,但基础相对较弱所以速度相对缓慢。长江经济带上游城市能源消费碳排放强度虽然也保持下降趋势,但是其远高于其他地区水平,主要是因为该区域能源相对丰裕,发展容易产生路径依赖,但是其下降速度是几大区域中最快的,由 2003 年的 1.87 t/万元快速下降至 2020 年的 0.77 t/万元,下降幅度超过下游地区,这仍旧归功于国家的产业发展规划和环保措施,对长江上游水域的保护力度,上游地区已不再以牺牲环境为代价发展经济。

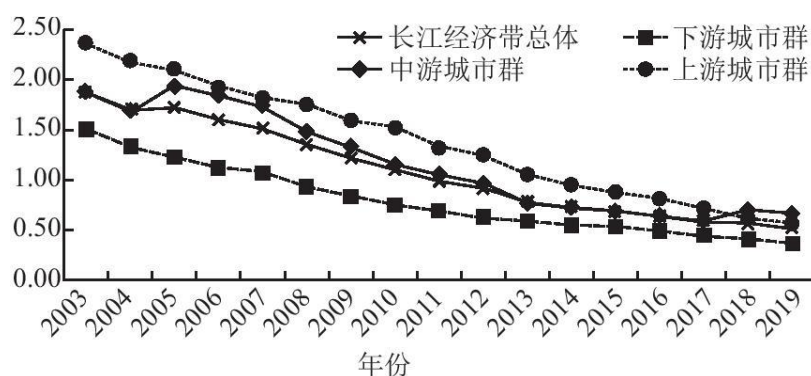


图 1 长江经济带 2003~2020 年城市的平均能源消费碳排放强度值

分城市规模来看,按照相关分类标准 3,将长江经济带 108 个城市按照城市常住人口数分为大型及以上城市组、中等城市组和小城市组,2003~2020 年三类不同规模城市的能源消费碳排放强度的变动趋势如图 2 所示。长江经济带城市能源消费碳排放强度呈现“小城市>中等城市>大城市”的等级规模特征,且 2003~2020 年三类不同规模城市的碳排放强度的平均值分别为 1.32、

1.13 和 0.94 t/万元。从变动趋势来看,长江经济带三组不同规模城市的能源消费碳排放强度均出现大幅度下降趋势,且大城市组和小城市组在 2015~2020 年间基本降到 0.40~0.60 这个区间范围内,小城市组下降幅度最大,而中等城市组在 2018 年间出现小幅度上涨的趋势,2019 年继续下降,2020 年降至 0.49 t/万元。以上海、杭州、武汉、长沙等为代表的大城市组,能源消费碳排放强度相对较低,因为该区域经济发展水平相对较高,节能减排技术也相对较为先进,碳排放强度起始值相对较小,因而在产业结构和能源供给结构的调整下,能源利用率提高,能源消费碳排放强度随之降低,但是由于绿色技术创新水平与发达国家仍然存在较大差距,因而能源消费碳排放强度降幅较小。而中小城市的产业基础较为薄弱,缺乏主导产业,特别是小城市对于资源的依赖度相对较高,产业结构雷同,经济发展也主要以资源密集型产业为主,经济发展水平较低,环境质量也相对较差。因此其碳排放强度起始值相对较大,在发展绿色经济的指导下地方政府不在以地区生产总值作为唯一的评判标准、注意生态环境保护,自然资源在长期开发下也呈现衰竭趋势,因此各城市不论是主动寻求转型还是被迫转型,均开始转变经济增长方式、调整能源利用结构,有效降低能源消费碳排放强度。

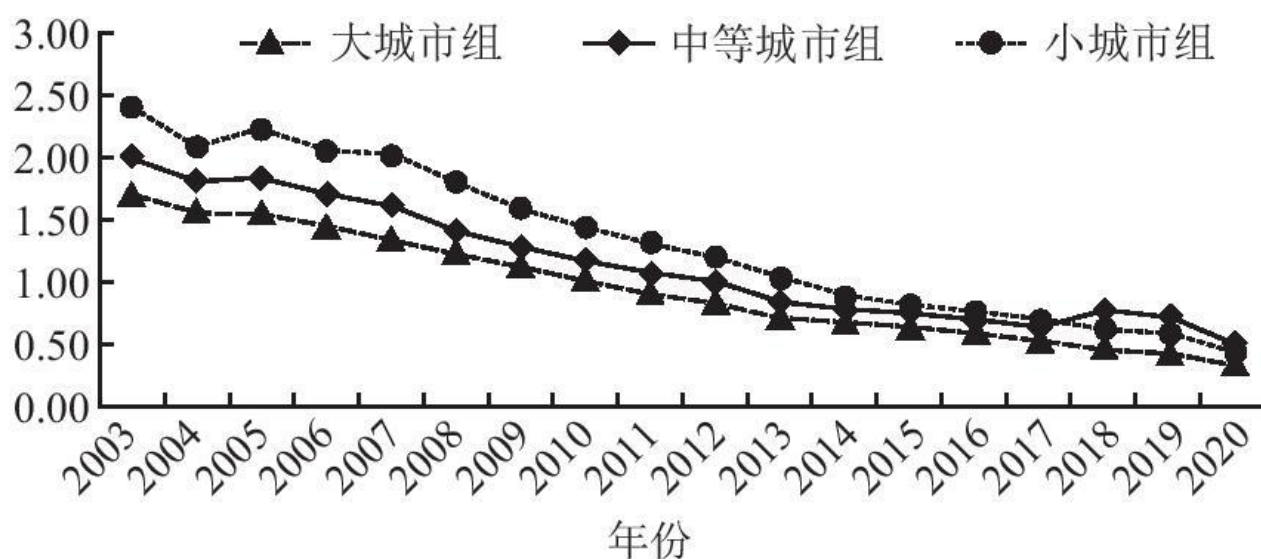


图 2 长江经济带 2003~2020 年各类规模城市的平均能源消费碳排放强度值

为了继续探索长江经济带各地级市能源消费碳排放强度随时间演变的分布特征,本文选择 2003、2009、2015、2020 年 4 个年度为时间节点绘制核密度曲线变化图(图 3),充分了解在这个时间区间内长江经济带能源消费碳排放强度的内部时空变动特征。从核密度曲线中心来看,能源消费碳排放强度核密度函数中心呈现不断左移的趋势,表明长江经济带 108 个城市的能源消费碳排放强度的平均值持续变小的稳定变动态势。2003~2018 年间长江经济带特别是长江经济带下游地区的经济发展方式发生了变革,产业发展愈发偏向绿色、低碳和高技术,碳排放量不断减少,因而能源消费碳排放强度不断下降。从核密度曲线的峰值来看,2003 年的核密度峰值最大,各年份碳排放强度的分布态势呈现由“单峰”型转为“双峰”后又转为“单峰”的特征,且峰型不断向“尖峰”转变。表明 2003 年各城市的能源消费碳排放强度值非均衡程度降低,分布相对集中;2015 和 2020 年能源消费碳排放强度值分布更加分散,城市间的差异愈发明显。由于各城市的经济发展水平和碳排放所处的阶段本来存在很大差异,在不断发展的过程中资源和能源的投入和产出不同,因而能源消费碳排放强度的差距更显著。从核密度曲线区间来看,右尾不断向中间缩短,表明研究阶段内为了实现经济高质量发展,长江经济带各城市奋勇直追,不断降低强度值;左尾的数值不断缩小,表明能源消费碳排放强度低的城市越来越多。长江经济带城市间的能源消费碳排放强度虽然差距在不断扩大,但是大部分城市的强度值呈现不断下降的趋势。

2.2 城市能源消费碳排放强度的空间演变特征分析

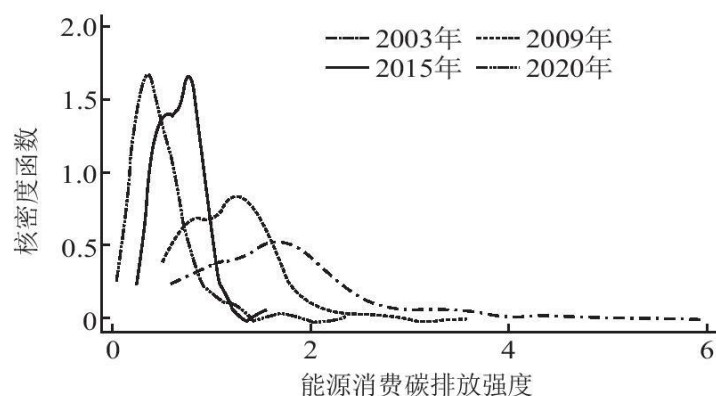


图3 主要年份能源消费碳排放强度核密度估计

整体来看,以2003~2020年各城市能源消费碳排放强度的平均值为基础进行分析,长江经济带下游地区中长三角所有城市的能源消费碳排放强度平均值均低于1 t/万元,安徽大部分城市的能源消费碳排放强度平均值都超过1 t/万元但小于2 t/万元,除了铜陵达到2.01 t/万元,主要还是因为铜陵市能源消费碳排放强度的初始值较高即2003年已经高达5.49 t/万元。长江经济带中游地区除了长沙、南昌等省会城市以及江西的部分城市外,其他绝大多数城市的能源消费碳排放强度平均值都超过1 t/万元但小于2 t/万元,除了鹰潭达到2.01 t/万元,同样也是因为初始值较高。而长江上游地区除了成都、广安、达州、雅安和巴中以外的所有城市包括重庆、贵阳、昆明等其能源消费碳排放强度平均值也都超过1 t/万元,其中贵州的四个城市均超过2 t/万元,依次为六盘水(2.85 t/万元)、贵阳(2.59 t/万元)、遵义(2.20 t/万元)、安顺(2.17 t/万元),同铜陵一样这些城市的能源消费碳排放强度的初始值都较高,说明这些城市的经济发展对能源的依赖性较强。上述数据也反映了从化石能源相对稀缺的下游地区,到相对富裕的中上游地区,能源消费碳排放强度在长江经济带呈现不断增强趋势的空间分布特征。

为了直观反映长江经济带108个城市的能源消费碳排放强度的空间变动特征,本文利用ArcGIS技术展示研究区域4个时间节点的能源消费碳排放强度的变动趋势(图4)。如图4所示,2003年长江经济能源消费碳排放强度整体偏高,中上游城市整体偏高,基本均在1 t/万元以上,其中贵州省的大部分城市碳排放强度值最高;长江经济带下游城市中江、浙、沪城市碳排放强度整体上处于偏低水平,基本低于1 t/万元,但安徽省的大部分城市都很高。主要原因在于贵州省和安徽省的部分城市化石能源相对丰富,在发展初期主要依靠化石能源大力发展高耗能产业,而当时能源利用效率低下,发展方式相对粗放形成了路径依赖,能源结构上高碳特征明显,经济增长的环境附加成本很高,因此使得两省大部分城市的初期能源消费碳排放强度值处在较高水平。

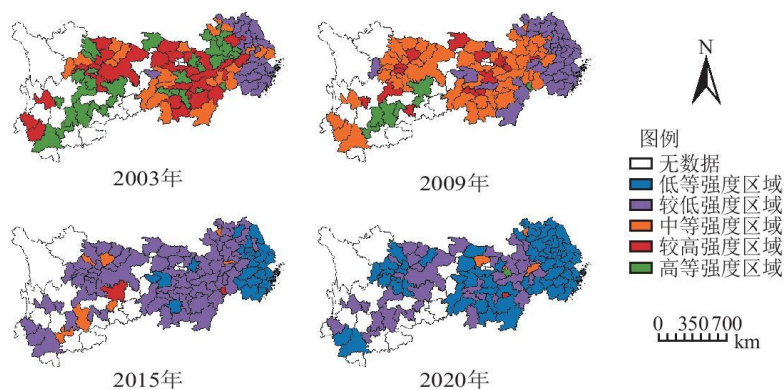


图4 主要年份长江经济带能源消费碳排放强度空间分布格局

2009 年长江经济带能源消费碳排放强度较于 2003 年呈现明显的下降趋势，特别是安徽省的大部分城市，而中上游城市群的碳排放强度虽然也在下降，但是下降幅度较小，仍然处于较高水平，呈现明显的沿海向内陆递增的阶梯性态势。原因在于 2005 年以后东部地区特别是长三角地区开始向外进行大规模的产业转移[21],且转移的产业大多属于污染密集型产业,中上游城市为了发展经济承接了这些产业，必然会导致污染排放增加，碳排放强度居高不下。

2015 年长江经济带能源消费碳排放强度整体出现明显的下降，大部分城市的能源消费碳排放强度值基本小于 1 t/万元，特别是中、上游城市下降幅度最大，但低排放强度值城市仍然集中于中下游地区，特别是长三角城市群。这段时期政府加强了环境规制力度，强调城市发展不仅要注重量的增加，也要注重质的提升，经济发展模式向高质量方向转变[17],污染排在一定程度上受到了限制。

2020 年长江经济带能源消费碳排放强度仍然保持下降态势，但是下降速度相较于 2015 年趋缓。2016 年习总书记提出长江经济带“共抓大保护，不搞大开发”，为长江经济带的发展定了向，即长江经济带发展的战略定位是坚持生态优先、绿色发展。因而，在这段时期内长江经济带下游城市更加注重发展绿色技术的发明及应用，低排放强度的城市越来越多。而以江西和湖北为代表的中游地区少数几个城市的能源消费碳排放强度却不降反升，原因在于这段时间内少数城市为了发展经济大量引进高污染、高能耗产业[17],污染排放不断增加，进而使得这些城市的碳排放强度恢复较高水平。

2.3 能源消费碳排放强度的影响因素分析

2.3.1 全样本分析

以长江经济带 108 个城市为例，基于 STIRPAT 模型采用分位数回归模型和 OLS 模型对影响能源消费碳排放强度的因素进行实证检验，在计量模型构建中对各变量进行了取对处理，一定程度上能够减少共线性和异方差影响。为了进一步确定各变量之间的共线性关系，在进行回归分析之前对各变量的取对数据进行多重共线性检验，检验结果发现最大的 VIF 值为 1.52,平均 VIF 值为 1.28,远低于数字 10,故可以认为多重共线性问题不严重，可直接进行回归，模型回归结果如表 2 所示。对于长江经济带城市群而言，经济增长、人口规模、产业结构和政府干预能够显著抑制城市能源消费碳排放强度提高；而人力资本水平和能源强度则对城市能源消费碳排放强度均具有显著的正向促进效应。

表 2 能源消费碳排放强度的影响因素面板分位数模型回归估计结果

变量	分位数回归					OLS
	10th	25th	50th	75th	90th	
lnRGDP	-0.139***	-0.177***	-0.223***	-0.305***	-0.308***	-0.240***
	(0.009 5)	(0.006 9)	(0.007 7)	(0.012 0)	(0.017 2)	(0.008 0)

lnPOP	-0.129***	-0.121***	-0.176***	-0.223***	-0.238***	-0.199***
	(0.012 3)	(0.008 9)	(0.011 1)	(0.020 4)	(0.033 3)	(0.011 5)
lnGOV	0.130	-0.258***	-0.633***	-0.985***	-0.703***	-0.591***
	(0.135)	(0.082 9)	(0.095 3)	(0.138)	(0.146)	(0.098 1)
lnHC	-0.128	0.318	1.908***	3.410***	5.130***	1.983**
	(0.296)	(0.221)	(0.263)	(0.355)	(0.454)	(0.271)
lnEI	0.859***	0.939***	0.843***	1.235***	3.338***	1.552***
	(0.200)	(0.154)	(0.175)	(0.267)	(0.339)	(0.179)
lnRI	-0.997***	-0.777***	-0.640***	0.018 1	0.301	-0.320**
	(0.144)	(0.102)	(0.124)	(0.203)	(0.303)	(0.127)
_CONS	2.846***	3.258***	4.117***	5.115***	5.076***	4.303***
	(0.101)	(0.079 9)	(0.099 5)	(0.175)	(0.292)	(0.103)

Observations	1 944	1 944	1 944	1 944	1 944	1 944
--------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

注：*、**、***分别表示在 10%、5%和 1%的显著性水平下显著，括号内数值是标准差.下同.

具体来看：(1)经济增长显著抑制了城市能源消费碳排放强度提升。对于不同能源消费碳强度的城市而言，相对中低分位城市，经济增长对碳排放强度的抑制作用在高分位城市更为显著。在新兴产业和节能环保技术快速发展的背景下，长江经济带经济增长质量不断提高，加大对碳减排相关技术创新的投入力度，激励绿色创新技术的孵化和发展，进而抑制碳排放强度提高。(2)人口规模要素对于城市能源消费碳排放强度具有显著的抑制作用。能源与城市居民生产和生活密切相关，人口因素主要通过改变居民的生产生活方式影响碳排放强度[16],高人口规模的城市可以通过促进城市公共基础设施和服务共享的规模经济效益和知识溢出与劳动力成本下降的集聚效应的形成，进而减少能源消耗。长江经济带城镇化正处于快速增长阶段，2020 年城镇化水平超过 60%,城市人口规模不断扩大，进而影响城市资源利用方式和交通运输方式[22],利用规模经济效应在一定程度上实现碳减排目标；进一步从分位数回归可以发现，人口规模回归系数的绝对值随着能源消费碳排放强度分位提高而不断增大，反映人口规模对于能源消费碳排放强度高的城市的碳减排效应更明显。(3)产业结构升级有效抑制了城市能源消费碳排放强度提升，表明产业结构优化调整是长江经济带实现城市碳减排目标的关键。第三产业占比越高意味着地区经济发展水平越高，能源消耗量也相对较少。长江经济带城市群第三产业占比提高意味着相关的生产要素会从高消耗、低产出的部门流动到低消耗、高产出的部门，促使产业结构朝着清洁化、数字化方面转变。值得注意的是，目前产业结构的回归系数随能源消费碳排放强度分位提高而变小，产业结构优化的负效应逐渐减弱，表明目前长江经济带城市的工业占比仍然较大，产业结构优化的进程较慢。(4)政府干预的回归系数为负，且均在 1%的水平上显著，表明环境规制等政府干预措施对城市能源消费碳排放强度具有显著的抑制作用。回归系数显示，财政支出对长江经济带中高分位城市能源消费碳排放强度的抑制作用尤其关键。政府关于公共卫生事业和绿色技术创新等方面的支出，具有显著的正外部性，促进生态环境优化。(5)人力资本水平的回归系数为正，且回归系数随能源消费碳排放强度分位提高而变大，人力资本的正效应逐渐增大表明目前长江经济带的人力资本水平要素能够推动能源消费碳排放强度提升。相对于高分位城市，中低分位城市特别是小于 50%分位点系数不显著甚至为负，即对于能源消费碳排放较低的城市，人力资本水平提高的碳减排效应开始凸显，但是并不显著。人力资本不仅是绿色技术创新的来源，更是绿色低碳技术的推广者和使用者。一般而言，区域人力资本水平越低意味着学习能力、创新能力和知识吸收能力不强及绿色低碳环保责任意识欠缺等，这必然会滋生高耗能高污染的生产生活方式，目前长江经济带劳动力结构性短缺、人力资本水平整体不高，且人力资本数量不足，不仅不利于推广清洁生产技术，还会因为高能耗高污染的生产方式产生更多污染[23]。(6)能源强度的回归系数为正，在 1%的水平上显著，且回归系数随能源消费碳排放强度分位提高而变大，能源强度的正效应逐渐增大，表明能源强度要素显著促进长江经济带城市能源消费碳排放强度提升。能源强度指数越大说明能源利用相关的技术水平越低，能源使用量也就越大，表明在城市碳排放强度由大变小过程中通过技术创新、降低高耗高排产业比重、能源消费结构调整等手段能有效降低碳排放量增速。

2.3.2 城市异质性的影响因素

(1)分区位城市碳排放的影响因素

长江经济带是重要的流域经济带，上、中、下游城市群资源禀赋、经济发展水平和碳排放所处阶段均存在较大不同，本文利用 OLS 模型对比分析了上、中、下游城市能源消费碳排放的主要影响因素，检验结果如表 3 所示。各变量的影响方向与全样本基本一致，区别主要体现在影响程度上。

通过比较上游城市、中游城市和下游城市能源消费碳排放强度的影响因素，明确长江经济带不同区位城市实施碳减排措施的重点，表 3 显示各变量的影响方向与全样本基本一致，区别主要体现在影响程度上。其中，不同区位城市的经济增长、人口规模、产业结构和政府干预对城市能源消费碳排放强度均具有负向影响，通过比较影响系数可知，经济增长对能源消费碳排放强度的影响程度均呈现出下游城市<中游城市<上游城市的特征，人口规模对能源消费碳排放强度的影响程度均呈现出上游城市<

下游城市<中游城市的特征，但是上游城市人口规模对能源消费碳排放的影响并不显著。政府干预对能源消费碳排放强度的影响程度均呈现出下游城市<上游城市<中游城市的特征，且下游城市的影响并不显著。产业结构对能源消费碳排放强度的影响程度均呈现出上游城市<中等城市<下游城市的特征。能源强度和人力资本对城市能源消费碳排放强度均具有正向影响，且能源强度对能源消费碳排放强度的影响程度均呈现出上游城市<中游城市<下游城市的特征，人力资本对能源消费碳排放强度的影响程度均呈现出中游城市<下游城市<上游城市的特征，但中游城市的影响并不显著。下游城市群经济发展水平较高，除了安徽省的部分城市的经济发展水平一直处在长江经济带的前列，经济发展产生的碳减排效应已经逐渐缩小；下游城市的产业主体仍然是制造业等高耗能产业，但目前正在大力发展信息技术等新兴产业，对于劳动力提出了更高的技能要求，因而能源强度对于城市能源消费碳排放强度的正向影响更显著，产业结构对城市能源消费碳排放强度的负向抑制作用最为显著。中游城市群高校林立，为区域经济发展提供智力支持，因而虽然整体上人力资本水平不高，但是并不会对城市能源消费碳排放强度提高产生显著影响。

表 3 城市异质性回归结果

变量	上游城市	中游城市	下游城市	大城市	中等城市	小城市
lnRGDP	-0.234***	-0.189***	-0.138***	-0.183***	-0.215***	-0.247***
	(0.030 0)	(0.015 3)	(0.021 6)	(0.016 4)	(0.024 6)	(0.049 4)
lnPOP	-0.015 5	-0.097 3*	-0.067 5*	-0.014 5	-0.029 5	-0.131*
	(0.035 1)	(0.054 9)	(0.035 7)	(0.035 2)	(0.040 7)	(0.063 5)
lnGOV	-0.815***	-1.567***	-0.348	-0.505**	-0.757***	-0.405
	(0.202)	(0.279)	(0.215)	(0.200)	(0.193)	(0.541)
lnHC	3.120***	0.616	2.510**	2.067***	1.973***	1.409
		(0.733)	(0.928)	(0.559)	(0.604)	(1.841)

	(0.815)					
lnEI	1.328**	1.688**	1.729**	2.842***	0.920**	3.476***
	(0.575)	(0.757)	(0.671)	(0.537)	(0.397)	(1.112)
lnRI	-0.655***	-0.663***	-1.088***	-0.906***	-0.970***	-2.524***
	(0.223)	(0.227)	(0.317)	(0.270)	(0.206)	(0.487)
_CONS	3.239***	3.517***	2.529***	2.653***	3.279***	4.581***
	(0.328)	(0.470)	(0.389)	(0.278)	(0.425)	(0.553)
R-squared	0.549 6	0.625 5	0.616 0	0.631 1	0.584 7	0.655 8
Observations	558	648	738	1 098	594	252

(2)分等级城市碳排放的影响因素

通过比较大城市、中等城市和小城市能源消费碳排放强度的影响因素，明确长江经济带不同规模城市实施碳减排措施的重点，表 3 检验结果显示各变量的影响方向与全样本基本一致，区别主要体现在影响程度上。其中，三类规模城市的经济增长、人口规模、产业结构和政府干预对城市能源消费碳排放强度均具有负向影响，通过比较影响系数可知，经济增长和人口规模对能源消费碳排放强度的影响程度均呈现出大城市<中等城市<小城市的特征，但是中等城市和大城市人口规模对能源消费碳排放的影响并不显著。政府干预对能源消费碳排放强度的影响程度均呈现出小城市<大城市<中等城市的特征，且小城市的影响并不显著。产业结构对能源消费碳排放强度的影响程度均呈现出大城市<中等城市<小城市的特征。能源强度和人力资本对城市能源消费碳排放强度均具有正向影响，且能源强度对能源消费碳排放强度的影响程度均呈现出中等城市<大城市<小城市的特征，人力资本对能源消费碳排放强度的影响程度均呈现出小城市<中等城市<大城市的特征。大城市的经济基础较好，但是发展质量需要进一步提高，大城市目前正在大力发展信息技术、新能源、新材料等新兴产业，整体上占比仍然较小，低碳减排技术发展迟

滞，为了提高绿色技术创新水平需要投入更大规模的资产和能源间接产生更多的碳排放，因而经济增长和产业结构对城市能源消费碳排放强度的影响小于中、小城市。虽然大城市的人口规模较大，但是人力资本水平相对较低，劳动力技能水平平均偏低被禁锢在产业链的底端，因而人口规模对于碳排放强度的负向抑制作用弱于中、小城市。

2.3.3 稳健性检验

为保证上述回归结果的可靠性，本文采用滞后变量和替换变量两种方式分别进行稳健性检验。模型(1)中由于能源消费碳排放强度也会对经济增长和产业结构产生影响，为了降低反向因果造成的内生性问题，本文将经济增长的滞后一期(L.lnRGDP)和产业结构的滞后一期(L.lnRI)纳入模型中进行回归；模型(2)中将第三产业增加值与第二产业增加值的比值作为产业结构高级化(RT)的指标替代产业结构(RI),其他变量不变，回归结果见表 4。结果显示，其影响作用与前文基本一致仅是某些变量的系数值发生了较小变动，说明上述研究结论具有实际稳健性。

表 4 稳健性检验

变量	模型(1)	模型(2)
lnRGDP		-0.246***
		(0.007 1)
L.lnRGDP	-0.236***	
	(0.008 0)	
lnPOP	-0.191***	-0.195***
	(0.011 5)	(0.011 2)
lnGOV	-0.656***	-0.474***
		(0.101)

	(0.098 8)	
lnHC	1.781***	2.141***
	(0.271)	(0.270)
lnEI	1.425***	1.474***
	(0.189)	(0.178)
L.lnRI	-0.247*	
	(0.129)	
lnRT		-0.195***
		(0.039 8)
_CONS	4.186***	4.332***
	(0.104)	(0.099 7)
R-squared	0.463 4	0.488 2
Observations	1 836	1 944

3 结论与建议

城市是产生碳排放的主要区域,同时由于城市部门众多、管辖力强,也是深度参与和有力执行国家减排目标和减排政策最合适的尺度。本文以长江经济带 108 个城市为例,测算了各城市的能源消费碳排放强度,对其进行了时空演变特征分析,在此基础上构建 STIRAT 模型,实证检验了城市能源消费碳排放的影响因素。研究发现:(1)从时间演变特征来看,2003~2020 年城市平均能源消费碳排放强度基本一直保持下降的趋势,且在 2012 年突破 1 t/万元的边界,从 2003 年的 1.87 t/万元降至 2020 年的 0.51 t/万元,年平均增长率为 -7.34%;从空间演变特征来看,由化石能源相对稀缺的下游地区向相对丰裕的中上游地区不断增强的趋势,从城市规模来看呈现“小城市>中等城市>大城市”的等级规模特征。(2)从影响因素来看,无论是全样本还是分区域样本、分城市规模样本来看,经济增长、人口规模、政府干预和产业结构对于城市能源消费碳排放强度的负向抑制作用较强,特别是产业结构;人力资本水平和能源强度对城市能源消费碳排放强度的正向促进作用显著,促进经济增长的同时使得能源消费碳排放大幅度增加;各类社会经济因素存在明显的城市异质性特征。

“十四五”时期是实现中国碳达峰、碳中和目标的关键时期,城市碳排放占据碳排放总量的 70%以上,因此调整能源消费结构和减污降碳措施落实到城市层面具有重要的现实意义。本文聚焦长江经济带城市群,探究其能源消费碳排放强度的时空演变特征和影响因素,为长江经济带城市碳达峰目标的实现提供如下建议:

(1)对于长江经济带城市群内的所有城市而言,为了抑制城市能源消费碳排放强度的增加,长江经济带城市群需要协调区域内大、中、小城市发展格局和功能地位,引导要素在区域范围内科学流动;不断促进经济增长,在保证经济增长的质量的同时循序渐进地提高低碳发展水平;科学制定人口政策、建设紧凑型城市,注意城市生态平衡,提高城镇化的质量;根据城市经济发展基础和低碳发展所处阶段的不同,制定和落地实施有针对性的碳减排政策,大力推进和完善低碳公共政策治理体系;加大教育投入,发展职业教育,并对在职员工进行技能培训,保证员工在制造业转型升级的过程中具备不可取代的绝对优势;加大能源研究和利用投入,促进能源利用技术水平的提高,发展绿色低碳技术;根据自身经济技术特性,通过优先发展先进制造业实现“去工业化”,提高产业结构中第三产业占比,优化产业结构。

(2)针对城市异质性特征,长江经济带下游城市中以上海为代表的部分城市已经实现了经济增速大于碳排放增速,已经进入城市群发展的成熟阶段,应该发挥碳达峰的先导作用;中游城市在促进经济增长的同时,也要不断挖掘碳减排的潜力;而上游城市在经济增长和碳减排方面有着更迫切的需求。因此在“双碳”目标约束下,各地区应因地制宜、实事求是地实施相关措施。未来长江经济带下游城市在已有经济发展基础的优势上,进一步加强与能源利用相关的研究,继续大力发展数字经济和实体经济融合,推动城市碳达峰目标的实现。中游城市和上游城市的产业结构需要进一步调整,亟需向绿色低碳方向转型。其中,中游城市在推进城镇化、夯实社会服务基础的过程中,需要注重城镇化质量和水平的提高;继续大力发展教育、提高教育质量,培育社会主义新时代需要的后备力量。上游城市则需要科学地利用能源和资源优势,摒弃粗放的能源利用方式,完善基础设施配套,通过优化产业结构来促进经济增长。

参考文献:

[1]徐丽笑,王亚菲.我国城市碳排放核算:国际统计标准测度与方法构建[J].统计研究,2022,39(7):12-30.

XU L X, WANG Y F. City carbon emission accounting in China :International statistical standards measurement and methodology construction [J] . Statistical Research, 2022 , 39 (7): 12-30.

[2]景侨楠,侯慧敏,白宏涛,等.自上而下的城市能源消耗碳排放估算方法[J].中国环境科学,2019,39(1):420-427.

JING Q N, HOU H M , BAI H T, et al. A top-bottom estimation method for city-level energy-related CO₂ emissions [J] . China Environmental Science, 2019, 39(1): 420-427.

[3] NARAYAN P K, NARAYAN S. Carbon dioxide emissions and economic growth : Panel data evidence from developing countries [J]. Energy Policy, 2010, 38(1) : 661-666.

[4]彭璐璐, 李 楠, 郑智远, 等.中国居民消费碳排放影响因素的时空异质性[J].中国环境科学, 2021, 41(1): 463-472.

PENG L L, LI N, ZHENG Z Y, et al. Spatial-temporal heterogeneity of carbon emissions and influencing factors on household consumption of China [J]. China Environmental Science, 2021, 41(1) : 463-472.

[5]张云辉, 郝时雨.收入差距与经济集聚对碳排放影响的时空分析[J].软科学, 2022, 36(3) : 62-67, 82.

ZHANG Y H, HAO S Y. Spatiotemporal analysis of impact of income gap and economic agglomeration on carbon Emissions [J]. Soft Science, 2022, 36(3) : 62-67 , 82.

[6]潘家华, 廖茂林, 陈素梅.碳中和: 中国能走多快? [J]. 改革, 2021(7) : 1-13.

PAN J H, LIAO M L, CHEN S M. Carbon neutrality: How fast can China go? [J]. Reform, 2021(7): 1-13.

[7]杨莉莎, 朱俊鹏, 贾智杰.中国碳减排实现的影响因素和 当前挑战——基于技术进步的视角[J].经济研究, 2019, 54(11) : 118- 132.

YANG L S, ZHU J P , JIA Z J. Influencing factors and current challenges of CO₂ emission reduction in China: A perspective based on technological progress [J] . Economic Research Journal, 2019, 54(11) : 118- 132.

[8] ZHANG C, LIN Y. Panel estimation for urbanization, energy consumption and CO₂ emissions: A regional analysis in China [J] . Energy Policy, 2012(49) : 488 - 498.

[9]王雅晴, 谭德明, 张佳田, 等.我国城市发展与能源碳排放 关系的面板数据分析[J].生态学报, 2020, 40(21) : 7897-7907.

WANG Y Q, TAN D M, ZHANG J T, et al. impact of urbanization on carbon emissions: Analysis of panel data from 158 cities in China [J] . Acta Ecologica Sinica, 2020 , 40 (21) : 7897-7907.

[10] 王兆峰, 汪倩.长江经济带新型城镇化对旅游业碳排放 的门槛效应研究[J].长江流域资源与环境, 2022, 31 (1) : 13-24.

WANG Z F, WANG Q. Threshold effect of new urbanization on tourism carbon emission in Yangtze River economic belt [J] . Resources and Environment in Yangtze Basin , 2022, 31 (1) : 13-24.

[11] 郭 艺, 曹贤忠, 魏文栋, 等.长三角区域一体化对城市碳 排放的影响研究[J].地理研究, 2022, 41(1) : 181-192.

GUO Y, CAO X Z, WEI W D, et al. impact of regional integration in Yangtze River Delta on urban carbon emissions [J] . Geographical Research, 2022, 41(1) : 181 - 192.

[12] 马晓君, 董碧滢, 于渊博, 等.东北三省能源消费碳排放测 度及影响因素[J].中国环境科学, 2018, 38(8) : 3170-3179.

MA X J, DONG B Y , YU Y B, et al. Measurement of carbon emissions from energy consumption in three Norastern provinces and its driving factors [J] . China Environmental Science, 2018, 38(8) : 3170-3179.

[13] 张玉华, 张涛.改革开放以来科技创新、城镇化与碳排放[J].中国科技论坛, 2019(4) : 28-34, 57.

ZHANG Y H, ZHANG T. Urbanization, Technological Innovation and carbon emission since reform and opening up [J] . Forum on Science and Technology in China, 2019 (4) : 28 - 34 , 57.

[14] YU H, PAN S Y , TANG B J, et al. Urban energy consumption and CO2 emissions in Beijing: current and future [J]. Energy Efficiency, 2015, 8(3) : 527- 543.

[15] SHAN Y, GUAN D, ZHENG H, et al. China CO2 emission accounts 1997-2015 [J] . Scientific Data, 2018, 5: 170201.

[16]王少剑, 黄永源.中国城市碳排放强度的空间溢出效应及 驱动因素[J].地理学报, 2019, 74(6) : 1131-1148.

WANG S J, HUANG Y Y. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China [J] . Acta Geographica Sinica, 2019, 74(6) : 1131 - 1148.

[17] 张樨樨, 曹正旭.长江经济带工业生态效率时空演变及影 响因素分析[J].长江流域资源与环境, 2022, 31 (3): 493-502.

ZHANG X X, CAO Z X. Spatio-temporal evolution and analysis of influencing factors of industrial ecological efficiency and in Yangtze River economic belt [J]. Resources and Environment in Yangtze Basin, 2022 , 31(3) : 493-502.

[18] 彭希哲, 朱 勤.我国人口态势与消费模式对碳排放的影 响分析[J].人口研究,2010, 34(1): 48-58.

PENG X Z, ZHU Q. Impact s of population dynamics and consumption pattern on carbon emission in China [J]. Population Research, 2010, 34(1) : 48-58.

[19] 黄蕊, 王 铮, 丁冠群, 等.基于 STIRPAT 模型的江苏 省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J].地理研 究, 2016, 35(4) : 781-789.

HUANG R, WANG Z, DING G Q, et al. Analysis and trend prediction of carbon emission in Jiangsu Province based on STIRPAT model [J] . Geographical Research, 2016, 35 (4) : 781-789.

[20] LIN B, Xu B. Factors affecting CO₂ emissions in China's agri

culture sector: A quantile regression [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94 : 15-27.

[21] 成艾华, 赵 凡.基于偏离份额分析的中国区域间产业转 移与污染转移的定量测度[J].中国人口 -资源与环境, 2018, 28(5) : 49-57.

CHENG A H, ZHAO F. Quantitative measure on inter-regional industry transfer and pollution transfer based on idea of shift share analysis [J] . China population , Resources and Environment, 2018, 28(5) : 49-57.

[22] 陆 铭, 冯 皓.集聚与减排: 城市规模差距影响工业污染强度的经验研究[J].世界经济, 2014, 37(7): 86-114.

LU M, FENG H. Agglomeration and emission reduction: An empirical study on influence of urban scale gap on industrial pollution intensity [J] . Journal of World Economy, 2014, 37 (7) : 86- 114.

[23] 赵 凡, 罗良文.长江经济带产业集聚对城市碳排放的影响: 异质性与作用机制[J].改革,2022(1) : 68-84.

ZHAO F, LUO L W. impact of industrial agglomeration on urban carbon emissions in Yangtze River economic belt: Heterogeneity and action mechanism [J] . Reform, 2022 (1) : 68 - 84.