

# 长江经济带城市碳排放的空间效应与影响因素研究

庞欣玥, 仲云云, 余 赟

南京邮电大学管理学院, 江苏 南京

收稿日期: 2023年4月21日; 录用日期: 2023年6月20日; 发布日期: 2023年6月29日

## 摘 要

2020年9月中国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标。作为重要的经济发展区域, 长江经济带减少碳排放, 早日实现碳排放与经济增长脱钩的低碳发展方式, 对于我国如期完成碳减排目标有至关重要的作用。以长江经济带为研究对象, 计算108个城市2003~2018年的碳排放总量、人均碳排放量、碳排放生产率等核心指标。通过建立空间计量模型, 以108个城市的面板数据作为检验, 实证分析长江经济带城市碳排放的空间效应及影响因素, 最后提出长江经济带区域梯度碳减排政策建议。

## 关键词

长江经济带, 碳排放, 空间效应

# Spatial Effects and Influencing Factors of Urban Carbon Emissions in the Yangtze River Economic Belt

Xinyue Pang, Yunyun Zhong, Yun Yu

School of Management, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu

Received: Apr. 21<sup>st</sup>, 2023; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In September 2020, China clearly put forward the goals of “carbon peaking” by 2030 and “carbon neutral” by 2060. As an important economic development region, the Yangtze River Economic Belt

should reduce carbon emissions and achieve low carbon development by decoupling carbon emissions from economic growth as soon as possible, which is crucial for China to achieve the carbon reduction target on schedule. Taking the Yangtze River Economic Belt as the research object, the core indicators of total carbon emissions, per capita carbon emissions and carbon productivity of 108 cities from 2003 to 2018 are calculated. By establishing a spatial econometric model and using the panel data of 108 cities as a test, we empirically analysis the spatial effects and influencing factors of urban carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt, and finally propose a regional gradient carbon emission reduction policy for the Yangtze River Economic Belt.

## Keywords

Carbon Emission, Spatial Effect, Yangtze River Economic Belt

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

气候变化是 21 世纪人类面临的最复杂的挑战, 不仅仅是环境问题, 同时也是政治、经济和社会问题。国际组织、各国政府、社会公众都成为应对气候变化行动中的活跃因素。打造长江经济带, 是党的十八届三中全会后, 党中央、国务院应对国际和国内经济调整发展趋势, 促进“东中西”区域经济协调发展、培植经济增长极的重要举措。长江经济带占据我国的重要位置, 其涵盖我国长江沿岸的 9 个省份和 2 个直辖市, 横贯东中西三个经济发展带, 是世界上人口最多、产业规模最大、城市体系发展最为完善的流域之一, 也是我国经济发展最具活力和潜力的区域之一, 也将作为绿色循环低碳发展生态经济示范区。国务院在 2014 年颁布的《国务院关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》, 更是将长江经济带的发展上升到“对于实现中华民族伟大复兴的中国梦具有重要现实意义和深远战略意义”的层面[1]。作为重要的经济发展区域, 长江经济带减少碳排放, 早日实现二氧化碳排放达到峰值, 对于我国如期完成二氧化碳的减排目标有着至关重要的作用。低碳发展是破解长江经济带资源、环境约束的重要突破口, 是实现长江经济带生态安全的重要保证, 也是当前急需探讨和解决的关键问题。刘峥延(2021)指出预计长江经济带将早于全国实现碳达峰, 一半以上城市将在“十四五”结束前达到峰值[2]。本文以长江经济带 108 个地级城市为例, 分析我国区域碳排放的空间分异及其影响因素, 研究区域碳减排模式和发展路径。本研究将有助于长江经济带各城市了解自身的碳排放状况, 推动长江经济带各地区开展节能减排工作, 能够缓解长江经济带内部的能源资源和环境压力, 为我国区域低碳发展指引方向, 并能为我国政府因地制宜制定相应的碳减排政策提供决策参考。

## 2. 文献综述

与碳排放有关的研究中, 学者大多将重点放在区域碳排放特征与碳排放影响因素等方面上。碳排放量和碳排放生产率是衡量区域碳排放程度的重要指标, 许多学者的研究均表明长江经济带的碳减排效率从地区上呈现东高西低、从时间上呈先降后升的“U”形特点, 如田泽等(2016) [3]、Tang 等(2020) [4]。在碳排放影响因素方面, 许多国内外学者普遍使用指数分解法进行研究。黄勤和何晴(2017) [5]、李丽(2021) [6]、Fan and Zhang (2020) [7]等学者使用 LMDI 模型将影响因素分解为经济增长、能源强度、能源结构、产业结构以及人口等因素。田泽等(2021) [8]、Huang 等(2019) [9]、朱冬元和纪磊(2021) [10]等学者借助

STIRPAT 模型拓展分析后发现,经济规模、人口、能源消耗强度、产出碳强度、技术进步、城市化水平以及实际利用外资对碳排放增加存在不同程度的影响。Sufyanullah Khan 等(2022)使用向量误差修正模型指出碳排放随着城市化进程的加快而上升,且存在单项因果关系[11]。赵凡和罗良文(2022)通过构建计量模型表明制造业集聚、产业协同集聚对城市碳排放强度有一定的影响[12]。Zhao 等(2020)指出碳排放绩效与城市化的关系呈现 U 型曲线[13]。丁涵等(2021)通过构建 PVAR 模型和脉冲响应函数,并利用方差分解法得出产业结构高级化有利于抑制碳排放,碳排放与创新投入之间存在“倒 U 型”的关系[14]。田泽和黄萌萌(2018)利用构建模型指出碳减排效率与产业结构演化尚未实现协调发展,但产业结构集中化和高级化优化有利于提升碳减排效率[15]。黄国华等(2018)借助长江经济带的相关数据对区域内的碳排放、能源强度和碳密度进行测算,指出长江经济带碳排放聚集度较高且整体增速趋缓[16]。

近年来,国内外学者对碳排放的空间关联性的研究也在增加。王维等(2019)通过构建低碳经济评价指标体系得出长江经济带低碳经济指数空间分布差异显著等结论[17]。张晨露和张凡(2022)通过构建空间杜宾模型表明长江经济带流域的碳排放具有空间效应,生态保护能够显著降低碳排放且对碳排放的影响存在区域异质性[18]。Zhou 等(2021)使用地理和时间加权回归方法分析了多维城市化对城市可持续发展影响的空间异质性[19]。Yao Fei 等(2021)使用空间杜宾模型和门槛回归模型表明城市化的多个维度与碳排放之间存在非线性关系[20]。尹迎港和常向东(2021)基于空间杜宾模型对省际面板数据进行实证分析指出,科技创新和产业结构升级可以加快地区碳排放强度的降低[21]。吕康娟和何云雪(2021)以长三角城市的面板数据为样本利用空间计量模型研究表明经济集聚与碳排放强度之间存在倒“U”型关系,技术水平在其中起到了中介作用[22]。马婧和陈雄(2018)使用主成分分析法和自然断裂分类法探究长江经济带碳排放量的相关数据后指出各因素对长江经济带碳排放量的影响作用存在显著的空间差异性[23]。周莹莹和孙玉宇(2018)通过构建长江经济带城市碳排放的空间关联网络得出此空间关联网络的密度值不是很高,整个长江经济带能源流通效率较低[24]。

综上所述,国内外的研究均表明对长江经济带的研究意义重大,目前已有文献多集中关注长江经济带大层面或省级的碳排放影响因素,而对各地级市的研究较少。现有研究中关于碳排放的影响因素多采用多元回归模型进行分析,对空间上的相关性研究较少。长江经济带地域跨越幅度较大,区域内经济悬殊较大,故本文以长江经济带为研究对象,以 2003~2018 年 108 个地级市数据为研究样本,通过建立空间计量模型,实证分析长江经济带城市碳排放的空间效应及其影响因素。

### 3. 长江经济带碳排放的核算与时空演变特征

#### 1) 长江经济带碳排放的核算

全球碳排放量通常采用实际能源消耗量和与之对应的碳排放系数乘积进行测度。这里碳排放的估算方法即是基于 IPCC《国家温室气体排放清单指南》2006 版(IPCC, 2006)。计算方法如公式(1)。

$$C_{it} = \sum E_{ijt} \times \eta_j \quad (i=108; j=1,2,\dots,108) \quad (1)$$

$C_{it}$  为  $i$  城市第  $t$  年的碳排放总量;  $E_{ijt}$  为  $i$  省第  $t$  年第  $j$  种能源消费量;  $\eta_j$  为第  $j$  种能源的碳排放系数。根据《中国能源统计年鉴》口径,将最终能源消费种类划分为 9 类,包括原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和电力。本文主要是从碳排放总量、人均碳排放以及碳排放生产率三个方面对长江经济带碳排放的时空演变特征进行分析。

#### 2) 长江经济带碳排放总量的时空演变特征

下游中的上海、苏州、无锡、南通、宁波、杭州、绍兴、台州 8 个城市在各年的碳排放总量始终较高,这 8 个城市的碳排放总量占下游城市的 46% 以上,占有所有城市的 25% 左右,舟山、黄山两个城市的碳排放较低,二者碳排放之和占长江经济带的碳排放总量的比重不足 1%。中游的武汉、宜昌、襄阳和黄

冈 4 个城市各年的碳排放量较高, 分别占中游区域与长江经济带所有城市的 22% 以上与 5% 左右。上游城市中, 重庆、成都、贵阳、遵义、昆明这 5 个城市的碳排放总量占上游区域的 45% 左右, 占有所有城市的 10% 左右, 其中重庆的碳排放量最高且仍在大幅度增多, 而丽江在各年的碳排放总量最低, 占上游区域碳排放的比重仅为 0.5% 左右。

长江经济带上中下游的碳排放总量的变化趋势如图 1 所示, 就上中下游区域的碳排放而言, 下游城市的总体碳排放量远远高于其他两个区域, 占长江经济带所有城市碳排放的 52% 及以上, 上游和中游区域的碳排放总量相近, 其中上游城市的碳排放量在逐年增多并高于中游城市。

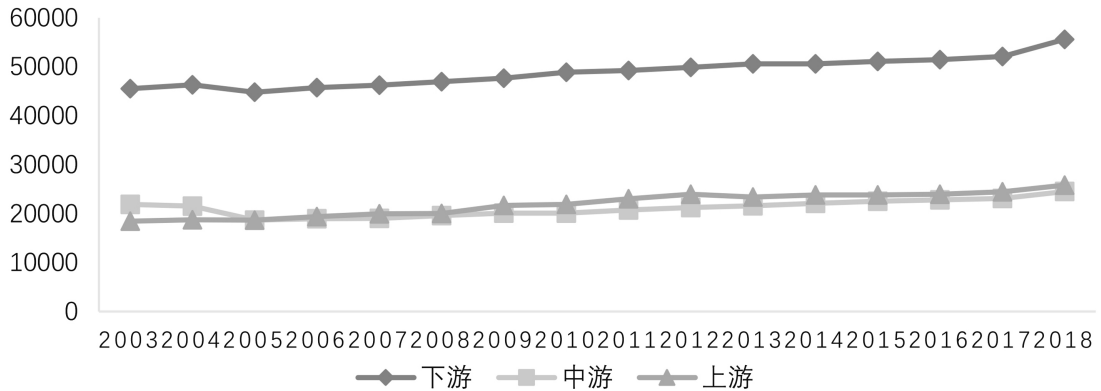


Figure 1. Change trend of total carbon emissions in the Yangtze River economic belt (10,000 tons of carbon)  
图 1. 长江经济带碳排放总量变化趋势(万吨碳)

### 3) 长江经济带人均碳排放的时空演变特征

由表 3 可知, 长江经济带的总体人均碳排放量维持在 2 吨/人, 并且在 2003~2018 年间, 逐年有增加的趋势, 2018 年比 2003 年共增加了 0.26 吨/人。上游与下游区域的人均碳排放略高于总体排放量, 而中游人均碳排放始终少于总体人均排放量, 在 1.4 吨/人左右。苏州、镇江、鄂州、贵阳、六盘水、安顺这 6 个城市较其他城市的人均碳排放量更高, 其中上游贵阳市的人均碳排放每年高于 10 吨/人, 其他城市也均超过 3 吨/人, 蚌埠、黄山、赣州、邵阳、张家界、广元、普洱等城市的人均碳排放量较少, 各年均不超过 1 吨/人。

根据图 2 显示, 2003~2018 年间, 下游区域有 19 个城市的人均碳排放量显示减少, 中游区域有 16 个城市的人均碳排放减少, 而上游区域所有城市的人均碳排放量均在增加, 其中保山市增长幅度最高, 增加了 7.48 倍。

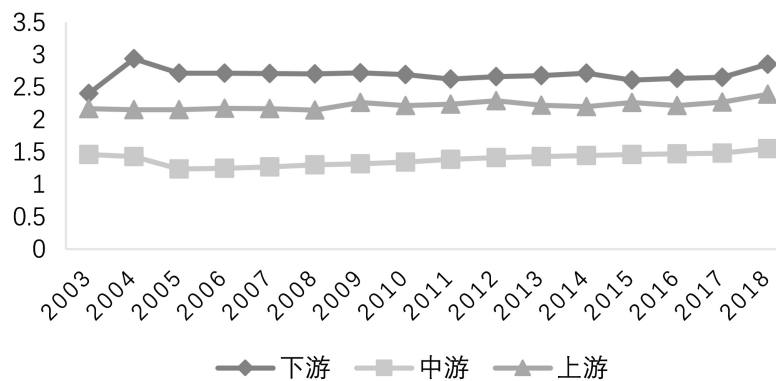


Figure 2. Change trend of per capita carbon emissions in the Yangtze River economic belt (ton carbon per person)  
图 2. 长江经济带人均碳排放量变化趋势(吨碳/人)

#### 4) 长江经济带碳生产率的时空演变特征

表 4 为长江经济带 108 个城市在 2003 年、2008 年、2013 年、2018 年的碳生产率。碳生产率即碳均 GDP，是指单位 CO<sub>2</sub> 的 GDP 产出水平，从各年的碳生产率数据可看到，上海、南京、衢州、杭州、宁波、长沙、重庆、成都等城市的碳生产率在长江经济带城市中处前列水平，2018 年均高于 3 万元/吨碳，其中南京和衢州碳生产率最高，超过 8 万元/吨碳。铜陵、亳州、宣城、孝感、六盘水、安顺、普洱、临沧等城市的碳生产率水平较低，其中 2018 年宣城碳生产率最低，为 1.16 万元/吨碳，当年碳生产率最高的城市衢州是其碳生产率的 7.7 倍。

根据图 3 可看到各年碳生产率的动态变化，2003~2018 年，108 个城市的碳生产率均有所增长，其中衢州、淮南、池州、贵阳、遵义、安顺的增长幅度较高，最高增长了 19 倍，而下游地区的碳生产率增长幅度显著高于中游与上游地区。

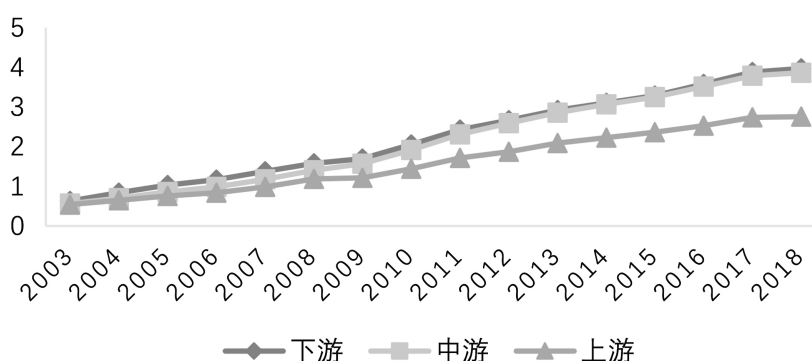


Figure 3. Variation trend of carbon productivity in the Yangtze River economic belt  
图 3. 长江经济带碳生产率变化趋势

### 4. 长江经济带区域碳排放的空间异质性与影响因素分析

#### 1) Tapio 脱钩指标的长江经济带各城市的比较

通过计算长江上中下游区域 2003~2018 年间三个时间段内碳排放量和 GDP 变化率的比值，得到长江上中下游地区碳排放与经济发展之间的脱钩指标值，并根据 Tapio 对脱钩状态的界定对其进行了划分，结果如表 1 所示。

Table 1. Stage decoupling elasticity of carbon emissions in the middle and lower reaches of the Yangtze River economic belt  
表 1. 长江经济带中下游碳排放分阶段脱钩弹性

地区	上游		中游		下游		总流域	
	系数	状态	系数	状态	系数	状态	系数	状态
2003~2008	0.177	弱脱钩	-0.258	强脱钩	0.065	弱脱钩	0.018	弱脱钩
2008~2013	0.302	弱脱钩	0.209	弱脱钩	0.184	弱脱钩	0.224	弱脱钩
2013~2018	0.277	弱脱钩	0.348	弱脱钩	0.292	弱脱钩	0.302	弱脱钩

从表 1 可以看出，长江经济带总体碳排放与经济发展之间的脱钩情况为弱脱钩为主，个别出现强脱钩的情况，这说明经济发展的增长速度大于碳排放增长速度。长江上游和下游地区在 2003~2018 年间一

直处于弱脱钩状态，并且脱钩弹性指标变化较小，说明经济增长速度始终大于碳排放增长速度。长江中游地区在 2003~2013 年间经济发展与碳排放之间脱钩关系发生了明显的变化，中游地区由强脱钩状态转向弱脱钩状态；2013~2018 年间，长江上中下游地区的脱钩指标弹性值虽然有所上涨，但占长江流域碳排放量绝大部分的上游地区和下游地区的弹性指并未发生大的变化，三个地区都处于弱脱钩状态。长江流域地区总体处于弱脱钩的状态，三个时间段的脱钩弹性并未发生太大变化。

2003~2008 年间，长江上游地区处于弱脱钩的状态，但是上游地区的 32 个地级市中，仅有 12 个处于弱脱钩的状态，其中四川省和贵州省的地级市强脱钩和增长连接状态所占比重较大，说明这些地区在一时期碳排放较少，这可能与这些地区处于山区有关。08~13 年间，长江上游地区仍处于弱脱钩的状态，但 32 个地级市中，只有攀枝花市、贵阳市和玉溪市仍处于强脱钩的状态，巴中市、丽江市和临沧市转变为增长连接的状态，这三个城市的碳排放速度明显增加。13~18 年间，长江上游地区仍然处于弱脱钩的状态，但泸州市、遂宁市和保山市由弱脱钩的状态转变为增长连接，达州市、资阳市、昆明市，昭通市、玉溪市为强脱钩状态，说明这些地区的低碳发展有一定的成果。

2003~2008 年间，长江中游地区处于强脱钩的状态，在中游地区的 36 个地级市中，大部分都处于强脱钩的状态，有 9 个地级市处于弱脱钩的状态，其中湖南省和江西省占比较大，说明湖北省的低碳发展态势较好。08~13 年间，长江中游地区转为弱脱钩状态，各地级市脱钩状态发生明显变化，其中湖北省最为明显，各省市均由强脱钩状态转变为弱脱钩，湖北省碳排放速度明显加快。13~18 年间，长江中游地区保持弱脱钩的状态，其中大部分地级市仍保持弱脱钩的状态，南昌市、长沙市和株洲市转变为增长连接状态，碳排放增速明显。

2003~2008 年间，长江下游地区处于弱脱钩状态，但在 41 个地级市中，有 22 地级市处于弱脱钩的状态，其余均处于强脱钩的状态。08~13 年间，下游地区仍处于弱脱钩状态，与前一时间段不同的是，各地级市中有大多数都处于弱脱钩状态。除江苏省中的无锡市、苏州市，浙江省的杭州市、温州市、金华市、台州市、绍兴市；安徽省的宿州市、淮南市、马鞍山市、淮北市、黄山市、六安市，其余地级市脱钩状态均为弱脱钩。13~18 年间，下游地区仍保持着弱脱钩的状态，大多数的地级市的脱钩状态未发生变化。上海市、苏州市、衢州市和安庆市由弱脱钩转变为强脱钩状态，说明这些城市的低碳发展取得了一定的进展；南京市、宿州市由前两个时期的弱脱钩状态转变为增长连接，无锡市、杭州市、绍兴市由强脱钩转变为弱脱钩状态碳排放速度明显加快；其余地级市的脱钩状态均未发生变化。

2) 基于泰尔指数的长江经济带碳生产率差异性分析

根据泰尔指数计算公式，利用 STATA16 软件，将长江经济带 108 个城市分为上游、中游、下游三个组，计算了长江经济带碳排放生产率的泰尔指数。见表 2 所示。(图 4)

**Table 2.** Theil index of carbon productivity in the Yangtze River economic belt, 2003~2018

**表 2.** 2003~2018 年长江经济带碳生产率泰尔指数

Year	TWR	TBR	Theil	TPi 下游	TPi 中游	TPi 上游
2003	0.06162	0.00218	0.06381	0.06907	0.03542	0.08187
2004	0.064	0.002	0.066	0.07342	0.03895	0.0812
2005	0.0591	0.00368	0.06278	0.07059	0.0289	0.08027
2006	0.05881	0.00464	0.06344	0.07013	0.03315	0.0749
2007	0.05957	0.0048	0.06437	0.07013	0.03676	0.07347
2008	0.06011	0.0035	0.06361	0.07235	0.03399	0.07615

Continued

2009	0.05827	0.00642	0.06469	0.07147	0.03577	0.06944
2010	0.05842	0.00735	0.06577	0.06746	0.03938	0.07197
2011	0.05639	0.00713	0.06353	0.0648	0.03837	0.07
2012	0.05515	0.00859	0.06374	0.06273	0.04043	0.06564
2013	0.0554	0.00786	0.06326	0.06353	0.04257	0.06185
2014	0.05047	0.00799	0.05846	0.05961	0.03777	0.05524
2015	0.05084	0.00802	0.05886	0.06193	0.03819	0.05217
2016	0.04425	0.00852	0.05277	0.05351	0.0333	0.0459
2017	0.04621	0.00856	0.05477	0.05461	0.03475	0.05008
2018	0.04753	0.00921	0.05673	0.05426	0.03575	0.05486

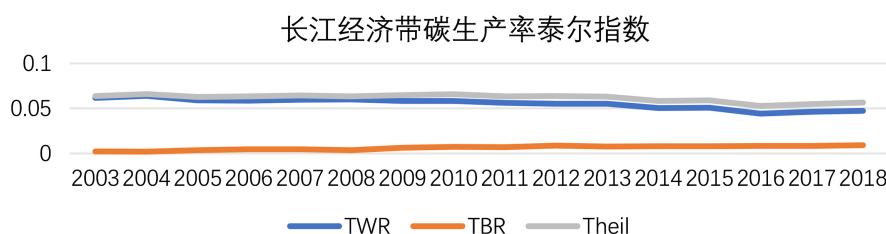


Figure 4. Theil index of carbon productivity in the Yangtze River economic belt, 2003~2018  
 图 4. 长江经济带 2003~2018 年碳生产率泰尔指数

从长江经济带区域总体来看，长江经济带碳生产率的组内差异大于组间差异。碳生产率长江经济带中上下游间的差异呈递增趋势，2018 年的组间差异是 2003 年的约 3 倍，而三大区域内的差异呈收敛下降趋势。长江中游的泰尔指数最小且一直比较稳定，说明长江中游碳生产率的差异性最小。长江上游和下游的泰尔指数逐年下降，说明各自区域内差异性在缩小，但是仍然大于长江中游地区，也是对长江经济带碳排放生产率的整体差异性做了主要贡献。

### 3) 长江经济带区域碳排放的空间效应分析

从人口、经济、技术和结构视角出发，基于扩展的 STIRPAT 模型，构建长江经济带碳排放 108 个城市，16 年(2003~2018)的面板数据模型，采用邻接矩阵，通过实证检验选择空间计量模型，利用 STATA16 软件，实证分析长江经济带区域碳排放的空间效应。

构建的面板数据计量经济学模型如下：

$$\ln TC_{it} = a \ln P_{it} + b \ln RPGDP_{it} + c \ln EE_{it} + d \ln ES_{it} + e \ln CZH_{it} + f \ln IS_{it} + g \ln FDI_{it} + \mu_{it} + \gamma_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中，TC 表示被解释变量为碳排放总量。解释变量为：P 表示人口，RPGDP 表示以 2003 年为基期的实际 GDP，EE 表示能源效率，这里采用单要素能源效率，即单位能源的 GDP 产出。ES 表示能源结构，以各城市的煤炭占全部能源的比重来表示。CZH 是城镇化率，以城镇人口占总人口的比重来表示；IS 为产业结构，以第三产业占第二产业的比值来表示；FDI 为对外开放程度，以外商投资占 GDP 比重来表示。 $\varepsilon_{it}$  是随机误差项， $\mu_{it}$  是空间效应， $\gamma_{it}$  是时间效应。

#### 1) 基于莫兰指数的空间自相关检验

在运用空间杜宾模型实证分析影响因素对碳排放总量的影响之前，要先判别碳排放总量与各影响因

素之间是否存在空间自相关关系。目前大多数研究均采用莫兰指数(Moran's I)检验数据是否存在全局空间自相关性, Moran's I 指数的取值范围为[-1, 1], 如果 Moran's I 指数大于零, 说明各变量在整个区域上存在正相关关系, 反之则表示变量在整个区域上存在负相关关系, 如果 Moran's I 指数等于 0 则说明变量在整个区域上是不相关的。本文以 108 个城市 16 年的碳排放总量, 利用邻接矩阵, 计算莫兰指数。并画出局部莫兰指数散点图, 如表 3 和图 5 所示。

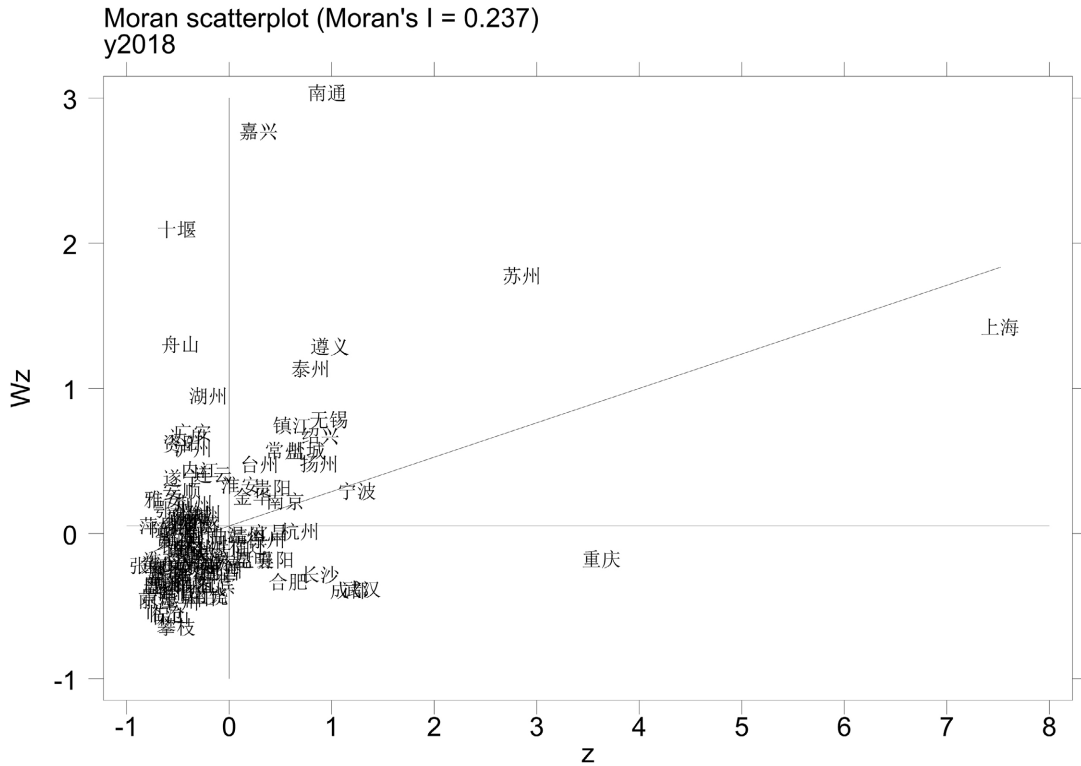


Figure 5. Local Moran index scatter plot in 2018  
图 5. 2018 年局部莫兰指数散点图

Table 3. Moreland index of total carbon emissions in the Yangtze River economic belt, 2003~2018  
表 3. 长江经济带碳排放总量 2003~2018 年的莫兰指数

Variables	I	E(I)	sd(I)	z	p-value*
y2003	0.311	-0.009	0.055	5.859	0
y2004	0.303	-0.009	0.054	5.8	0
y2005	0.266	-0.009	0.052	5.252	0
y2006	0.27	-0.009	0.053	5.278	0
y2007	0.262	-0.009	0.053	5.174	0
y2008	0.247	-0.009	0.052	4.969	0
y2009	0.24	-0.009	0.052	4.787	0
y2010	0.221	-0.009	0.051	4.557	0
y2011	0.195	-0.009	0.051	4.025	0
y2012	0.195	-0.009	0.051	4.015	0



Continued

y2013	0.202	-0.009	0.049	4.273	0
y2014	0.201	-0.009	0.052	4.072	0
y2015	0.209	-0.009	0.051	4.271	0
y2016	0.197	-0.009	0.051	4.023	0
y2017	0.19	-0.009	0.051	3.897	0
y2018	0.203	-0.009	0.052	4.054	0

由历年总体莫兰指数可以看出，108 个城市的碳排放存在一定的空间聚集性，并且通过显著性检验。由图 5 局部莫兰指数散点图可知，莫兰指数主要集中在第三象限和第一象限，说明碳排放主要以低低聚集和高高聚集为主。

### 2) 基于空间杜宾模型的长江经济带碳排放影响因素分析

经过 LM 检验、hausman 检验以及 LR 检验，选择空间杜宾的时间固定效应来做碳排放空间面板的计量检验。结果如表 4 所示。其中，人口、GDP 和对外开放程度的回归系数均显著为正，表明这些影响因素对长江经济带碳排放起正向促进作用；能源效率和城镇化率均显著为负，表明该影响因素存在负向作用。各解释变量的空间滞后项对长江经济带碳排放的影响中，人口和 GDP 的回归系数显著为负，能源效率、产业结构和对外开放程度显著为正。

Table 4. Estimation results of spatial effects of carbon emissions based on SDM model

表 4. 基于 SDM 模型的碳排放空间效应的估计结果

变量	lnTC	
	Model 1	Model 2
	FE	SDM (W1)
lnP	0.9986*** (144.75)	-0.6222*** (-29.23)
lnRPGDP	1.0279*** (83.41)	-0.6033*** (-23.11)
lnEE	-1.0453*** (-92.53)	0.5938*** (23.86)
lnES	0.0283 (1.32)	0.0016 (0.04)
lnCZH	-0.1266*** (-7.21)	0.0323 (1.12)
lnIS	0.0012 (0.09)	0.043** (2.10)
lnFDI	0.0191*** (4.37)	0.0480*** (7.95)
R <sup>2</sup>		0.9331
Log-L		717.8829
$\sigma^2$		0.6738

把碳排放效应分为直接效应、间接效应和总效应。根据表 5 所示结果,从直接效应来看,人口、财富、对外开放对本城市的碳排放有显著正向促进作用;能源效率、城镇化水平对本城市碳排放有显著的抑制作用;能源结构、产业结构对碳排放的增长有正向影响但不显著。间接效应中人口、外商投资、产业结构通过显著性检验,说明这三个要素具有明显的空间溢出效应。

**Table 5.** Spatial effect decomposition  
**表 5.** 空间效应分解

变量	直接效应	间接(溢出)效应	总效应
lnP	0.9884*** (133.95)	-0.1104*** (-4.54)	0.8780*** (32.90)
lnRPGDP	1.0245*** (90.34)	-0.0313 (-1.23)	0.9932*** (37.48)
lnEE	-1.0451*** (-96.27)	-0.0077 (-0.24)	-1.0528*** (-30.24)
lnES	0.0315 (1.30)	0.0347 (0.39)	0.0661 (0.63)
lnCZH	-0.1340*** (-7.49)	-0.0853 (-1.44)	-0.2192*** (-3.20)
lnIS	0.100 (0.72)	0.0930** (2.11)	0.103** (1.97)
lnFDI	0.0310*** (7.25)	0.1260*** (11.70)	0.1570*** (13.42)

### 5. 长江经济带区域梯度碳减排建议

区域间技术创新合作和产业互动已经成为区域经济发展的主要路径。长江经济带应通过各个城市的思想创新、管理模式创新、技术创新等推动区域一体化,走低碳协同发展路径。所谓的低碳协同发展,主要是指以低碳发展为目标加强多方协同与合作,在融合、协同、合作基础上减少碳排放,实现低碳经济的发展。但是因为长江经济带内部各个城市间碳排放空间分异性特征明显,可以预见各城市低碳协同发展能力也存在明显差异。因此,一刀切的碳减排模式并不适合长江经济带的实际情况,而要在低碳协同发展基础上实现梯度碳减排模式,进行有针对性的碳减排政策设计。

下游地区第一梯度碳减排:长三角城市群率先实现低碳发展。作为长江经济带碳排放第一俱乐部的下游地区,主要包括上海、江苏、浙江、安徽等长三角地区,交通便利,经济发展水平较高,应加大碳减排力度,应做好低碳发展的领头羊和示范区。

中游地区第二梯度碳减排:长江中游城市群稳步推进低碳发展。长江中游地区主要包括江西、湖北、湖南三个省份,低碳产业发展之后,技术创新不足。这三个省份一方面应积极推进工业化和城市化进程,降低第二产业比重,增强发展能力;另一方面进行技术创新,发展清洁能源,提高能源效率,控制高耗能产业,实现经济发展和低碳排放的双赢。

上游地区第三梯度碳减排：以成渝城市群为核心，逐步实现低碳发展。长江上游地区主要包括重庆、四川、贵州、云南等地区，这 4 个地区属于西部欠发达地区。应在保障经济发展的基础上逐步实现低碳发展。四川的太阳能资源、水电资源丰富云南森林覆盖率高，也是国内最早开展清洁发展机制的省份之一；贵州省煤、水能、森林等资源丰富。因此应积极利用可再生能源，积极发展清洁能源，在加快第二产业的同时，打造低碳农业，降低能源消耗水平。同时这类地区因为生活水平落后，人均生活消费碳排放较低，经济转型的压力小、成本低。通过发挥后发优势，逐步实现经济由高碳向低碳转型。

## 基金项目

国家自然科学基金项目“基于空间分异的长江经济带低碳发展演化博弈与减排模式研究”(71803088)；教育部青年基金项目“基于演化博弈的长江经济带低碳发展水平测度与减排模式研究”(18YJCZH268)江苏省研究生科研创新计划项目“绿色金融对重污染企业环境绩效的影响研究”(KYCX22\_0894)。

## 参考文献

- [1] 国务院关于依托黄金水道 推动长江经济带发展的指导意见[EB/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-09/25/content\\_9092.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-09/25/content_9092.htm), 2014-09-25.
- [2] 刘峥延. 长江经济带城市碳达峰和分类减排路径研究[J]. 未来与发展, 2021, 45(9): 92-100+112.
- [3] 田泽, 严铭, 顾欣. 碳约束下长江经济带区域节能减排效率时空分异研究[J]. 软科学, 2016, 30(12): 38-42. <https://doi.org/10.13956/j.ss.1001-8409.2016.12.09>
- [4] Tang, D., Zhang, Y. and Bethel, B.J. (2020) A Comprehensive Evaluation of Carbon Emission Reduction Capability in the Yangtze River Economic Belt. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**, Article No. 545. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020545>
- [5] 黄勤, 何晴. 长江经济带碳排放驱动因素及其空间特征——基于 LMDI 模型[J]. 财经科学, 2017(5): 80-92.
- [6] 李丽. 长江经济带能源碳排放脱钩效应及其驱动因素[J]. 西部经济管理论坛, 2021, 32(2): 44-53.
- [7] Fan, Z.G. and Zhang, S.L. (2020) Decomposition Analysis of Energy Carbon Emission Factors in Beijing-Tianjin-Hebei. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **440**, Article ID: 042022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/440/4/042022>
- [8] 田泽, 张宏阳, 纽文婕. 长江经济带碳排放峰值预测与减排策略[J]. 资源与产业, 2021, 23(1): 97-105.
- [9] Huang, Y.S., Yang, Y.Q. and Shi, M.S. (2019) Research on the Factors Affecting Carbon Emission of Energy Consumption in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **342**, Article ID: 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/342/1/012027>
- [10] 朱冬元, 纪磊. 基于 STIRPAT 模型的长江经济带碳排放驱动因素研究[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(11): 50-54+61. <https://doi.org/10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2021.11.011>
- [11] Khan, S., Arshad, A.K. and Ali Muhammad Abu, S. (2022) Does Emission of Carbon Dioxide Is Impacted by Urbanization? An Empirical Study of Urbanization, Energy Consumption, Economic Growth and Carbon Emissions—Using ARDL Bound Testing Approach. *Energy Policy*, **164**, Article ID: 112908. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112908>
- [12] 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.
- [13] Zhao, Z.B., Yuan, T., Shi, X.P. and Zhao, L.D. (2020) Heterogeneity in the Relationship between Carbon Emission Performance and Urbanization: Evidence from China. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **25**, 1363-1380. <https://doi.org/10.1007/s11027-020-09924-3>
- [14] 丁涵, 史璐丽, 杨丽华. 创新投入、产业结构升级与碳排放的关系研究——基于长江经济带省域的实证分析[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(4): 73-80.
- [15] 田泽, 黄萌萌. 长江经济带终端能源消费碳减排效率与产业结构耦合分析[J]. 安徽师范大学学报(人文社会科学版), 2018, 46(1): 92-100.
- [16] 黄国华, 刘传江, 徐正华. 长江经济带碳减排潜力与低碳发展策略[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 695-704.
- [17] 王维, 张涛, 石国宁, 陈云. 长江经济带城市低碳经济时空格局研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 133-140.

- 
- [18] 张晨露, 张凡. 生态保护、产业结构升级对碳排放的影响——基于长江经济带数据的实证[J]. 统计与决策, 2022, 38(3): 77-80.
- [19] Zhou, Z.H., Cao, L.J., Zhao, K.K., Li, D.L. and Ding, C. (2021) Spatio-Temporal Effects of Multi-Dimensional Urbanization on Carbon Emission Efficiency: Analysis Based on Panel Data of 283 Cities in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18**, Article No. 12712. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312712>
- [20] Yao, F., Zhu, H.S. and Wang, M.J. (2021) The Impact of Multiple Dimensions of Urbanization on CO<sub>2</sub> Emissions: A Spatial and Threshold Analysis of Panel Data on China's Prefecture-Level Cities. *Sustainable Cities and Society*, **73**, Article ID: 103113. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103113>
- [21] 尹迎港, 常向东. 科技创新、产业结构升级与区域碳排放强度——基于空间计量模型的实证分析[J]. 金融与经济, 2021(12): 40-51.
- [22] 吕康娟, 何云雪. 长三角城市群的经济集聚、技术进步与碳排放强度——基于空间计量和中介效应的实证研究[J]. 生态经济, 2021, 37(1): 13-20.
- [23] 马嫦, 陈雄. 长江经济带碳排放时空特征及影响因素分析[J]. 贵州科学, 2018, 36(1): 75-80.
- [24] 周莹莹, 孙玉宇. 长江经济带城市碳排放的空间关联性研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2018, 17(2): 52-60.