DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0459
魏猛,蔡智,徐建刚, 等.2024.中国城市群碳排放特征与影响机制分析[J].环境科学学报,44(6):414-424
WEI Meng, CAI Zhi, XU Jiangang, *et al*.2024.Characteristics and mechanisms of carbon emissions in urban agglomerations: A spatiotemporal analysis of Chinese major regions[J].Acta Scientiae Circumstantiae,44(6):414-424

中国城市群碳排放特征与影响机制分析

魏猛[1,3],蔡智[2],徐建刚[1],宋彦[3,*],陆慕秋[1]

1. 南京大学建筑与城市规划学院,南京 210008
2. 浙江工商大学旅游与城乡规划学院,杭州 310018
3. 北卡罗来纳大学教堂山分校城市规划系,美国北卡州教堂山,27514

摘要:随着我国经济的飞速发展和城市化进程的加速,城市群逐渐成为碳排放的主要来源,如何有效地控制并减少城市群碳排放成为一个紧迫的议题.本研究基于城市面板数据,利用空间自相关和空间计量回归模型分析了我国长三角、京津冀、珠三角及成渝城市群碳排放时空格局特征,并且从经济社会和环境治理行为方面探讨了城市群碳排放影响机制.结果表明,城市群碳排放时空格局深受其内部功能特征的影响,并表现出特定的演变趋势.此外,合理的环境管理和城市间协作可以有效促进城市群可持续发展.基于以上发现,研究提出应充分考虑到各城市群的功能特征以及碳排放的时空格局,并针对具体的碳排放影响机制来制定差异化减碳策略.

关键词:碳排放;时空格局;城市群;影响机制;碳减排;演变

文章编号:0253-2468(2024)06-0414-11　　**中图分类号:**X32　　**文献标识码:**A

Characteristics and mechanisms of carbon emissions in urban agglomerations: A spatiotemporal analysis of Chinese major regions

WEI Meng[1,3], CAI Zhi[2], XU Jiangang[1], SONG Yan[3,*], LU Muqiu[1]

1. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210008
2. School of Tourism and Urban-Rural Planning, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018
3. Department of City and Regional Planning, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC 27514

Abstract: With the rapid development of our country's economy and the accelerated process of urbanization, urban agglomerations have gradually emerged as the primary contributors to carbon emissions. Effectively controlling and reducing carbon emissions from urban agglomerations has become an urgent issue. This study, based on urban panel data, employs spatial autocorrelation and spatial econometric regression models to analyze the spatiotemporal patterns of carbon emissions in China's Yangtze River Delta, Beijing-Tianjin-Hebei region, Pearl River Delta, and Chengdu-Chongqing urban agglomerations. Furthermore, the research explores the influencing mechanisms of carbon emissions from urban agglomerations in terms of economic, social, and environmental governance behaviors.The findings of the study indicate that the spatiotemporal patterns of carbon emissions in urban agglomerations are profoundly influenced by their internal functional characteristics, exhibiting specific evolving trends. Additionally, rational environmental management and inter-city cooperation can effectively promote the sustainable development of urban agglomerations. Based on these discoveries, the research proposes that due consideration should be given to the functional characteristics of each urban agglomeration and the spatiotemporal patterns of carbon emissions. Tailored decarbonization strategies should be formulated based on specific carbon emission influencing mechanisms.

Keywords: carbon emissions; spatial and temporal patterns; urban agglomerations; impact mechanism; carbon reduction; evolution

1　引言(Introduction)

中国在过去几十年中经历了一个快速城市化和工业化的过程,城市高污染和高排放问题日益加剧.相关研究表明, 中国的碳排放量约有85%在城市产生(Yu *et al.*, 2023).作为目前世界上最大的碳排放国之一,中国在2015年巴黎联合国气候变化大会上宣布于2030年和2060年分别实现碳达峰、碳中和的目标(Zhao *et al.*, 2022).节能减排已成为中国实现可持续发展目标的一项重要而紧迫任务(陈明星等, 2022).随着新型

收稿日期:2023-11-16　　**修回日期:**2023-12-26　　**录用日期:**2023-12-28
作者简介: 魏猛(1993—),男,博士研究生,E-mail:dg21360018@smail.nju.edu.cn; * **责任作者**,E-mail:ys@email.unc.edu

城镇化、区域一体化、城市群建设等区域发展战略的稳步推进,中国经济在增长的同时将更加关注环境改善、社会进步统一协调发展(Wang *et al.*, 2022; 冯长春等, 2022).

城市群作为空间组织的一种形式,已经成为促进我国新型城镇化发展和增加全球竞争力的一个关键组成部分.城市群包括由若干大城市为核心向周围各种中小城市辐射形成的集合区域,表现出分工和合作的双重功能,是城市发展较为成熟阶段的一种空间组织形式(Yang *et al.*, 2021).特大城市通常是这些城市群的核心,与3个或更多的都市区或其他大城市构成一个核心区.这些核心区域通过高度发达的交通基础设施相连,形成空间紧凑、经济联系紧密、区域一体化的城市实体(Fang *et al.*, 2017).2018年,中国确立了以城市群带动区域发展的新模式,促进区域板块的融合互动发展(Yao *et al.*, 2022),使得城市群集聚效应和带动效应不断增强(Yang *et al.*, 2022; Dong *et al.*, 2022).

长江三角洲、珠江三角洲、京津冀地区、成渝城市群作为我国人口增量最大的4个城市群,在全国GDP比重中也超过50%,因此,对中国经济社会发展有着巨大影响.然而,它们也面临日益严重的环境和气候问题(Liu *et al.*, 2020).城市群中快速增长的人口加剧了对资源的需求,也加重了对生态环境的影响(Fang *et al.*, 2009; Bai *et al.*, 2019).为确保可持续性,未来碳减排不能仅仅依靠提高能源效率和优化产业结构(Wang *et al.*, 2017;程番苑等,2023),还取决于与经济社会、环境治理行为的协调度,从而在发展经济的同时帮助城市应对气候变化.因此,了解城市群碳排放的时空格局和影响机制已成为中国应对"双碳"战略挑战的一个关键问题(Shen *et al.*, 2021).

2　文献回顾(Literature review)

揭示城市群碳排放时空演变特征,预测城市群碳排放趋势,成为碳排放管理和减排决策的基础.现有研究显示,城市群碳排放空间分布有着明显的地理特征,这种特征涉及资源、要素、社会经济活动的时空分布和空间组合,反映在城市群特定区域内的经济、社会、规模、功能和结构等方面(Dong *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022;孔旻蔚等, 2023; Wei *et al.*,2024).例如,一些大城市和产业化程度较高的城市不仅可以通过提高周边地区的区域经济竞争力来刺激碳排放,还可以通过加快产业结构调整、优化资源再分配来减少碳排放(Wang *et al.*,2022).此外,有研究发现城市群的多中心空间结构与能源效率之间存在"倒U型"关系,这种关系又会受到地域特性的 影响,表现出特定的空间格局(Chen *et al.*, 2021).近年来,随着城市交通拥堵问题的加剧和人口密度的增加,一些经济较发达的城市扩大了基础设施建设,从而推高了城市群能源需求.此外,居民消费总量增长、消费结构升级及城市消费比重上升,也增加了城市对能源的需求并导致碳排放的增加,使得学界愈加关注城市群碳排放的研究(Wang *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022).

目前有关城市群碳排放的研究主要聚焦在以下4个方面:①城市群碳排放特征的比较分析.一方面是选择典型城市群进行碳排放特征的研究和比较分析,如有学者对中国各个城市群的主要大城市能源使用和碳排放情况进行对比分析,发现中国35个最大的城市包含了全国18%的人口,但其能源使用和二氧化碳排放却占全国的40%(Dhakal, 2009);另一方面是从特定行业的角度分析城市群的碳排放特征,如研究发现不同城市重点碳减排行业存在较大差异,电力和交通部门在大多数城市的碳减排过程中产生了负面影响(Yu *et al.*, 2023),以及发现商业建筑部门的碳库兹涅茨曲线揭示了不同城市群中不同脱钩路径的原因(Mma *et al.*, 2019).②研究城市群碳排放与特定因素之间的关系.在这方面学者们针对不同类型的特定要素,研究了城市化和土地利用变化对碳排放的影响(Zhou *et al.*, 2021)、经济发展对碳排放的影响机制(Han *et al.*, 2018)、用地类型与碳源碳汇的关系(Cui *et al.*, 2019)、城市群紧凑度与碳排放强度的时空演变及协调发展水平(李志英等, 2023)、城市群工业碳排放空间网络结构特征及其影响因素(陆杉等, 2023)等.③研究城市群碳排放的空间关系.例如,有研究将碳减排政策运用到城市规划中,探索长三角城市群的集聚程度与碳排放之间的关系,并根据碳减排和结构优化来重新规划城市空间(Yu *et al.*, 2020; Shu *et al.*, 2019).④研究城市某类发展指标与碳排放绩效的关系.如绿色创新(Xu *et al.*, 2021)、社会经济发展水平(Qian *et al.*, 2022)、城镇化率(Guo *et al.*, 2023)、低碳试点政策(郭沛等, 2022)等对城市碳排放效率的影响.

总体上,当前研究较多关注特定要素影响,缺乏对经济、社会及环境治理综合作用的探讨.在其综合

影响机制方面存在较大不足，尤其是中国城市群间的比较分析不完备，限制了对碳排放差异及成因的理解．因此，本文通过研究中国典型四大城市群碳排放特征，旨在进一步揭示其影响机制，促进资源合理配置，为实现碳减排目标提供参考．

3 研究区概况及研究方法（Overview of the study area and research methodology）

3.1 研究区概况

本文以中国四大典型城市群为研究案例（图1），分别为：①长三角城市群，以上海、南京、杭州、宁波、苏州等城市为核心的长江三角洲地区；②珠三角城市群，以广州、深圳、珠海、东莞、佛山等城市为核心的珠江三角洲地区；③京津冀城市群，主要包括北京、天津和河北省；④成渝城市群，以成都和重庆为中心，包括周边的一些城市．这四大城市群是中国的经济发展的引擎，贡献了国内很大一部分的GDP．如长三角国土面积21.17万km^2，以占全国2.2%的地域面积承载了11.1%的人口和19.94%的经济总量，京津冀以占全国2.3%的地域面积承载了7.8%的人口和8.5%的经济总量等．其次，这些地区有大量的高校、研究机构和企业研发中心，是国家科技创新的重要基地．并且这些城市群在所在区域中起到了辐射和带动作用，推动了周边地区的发展．但这4个城市群的城市由于规模扩张速度较快，导致碳排放量急剧上升，已经严重影响了该区域的可持续发展．

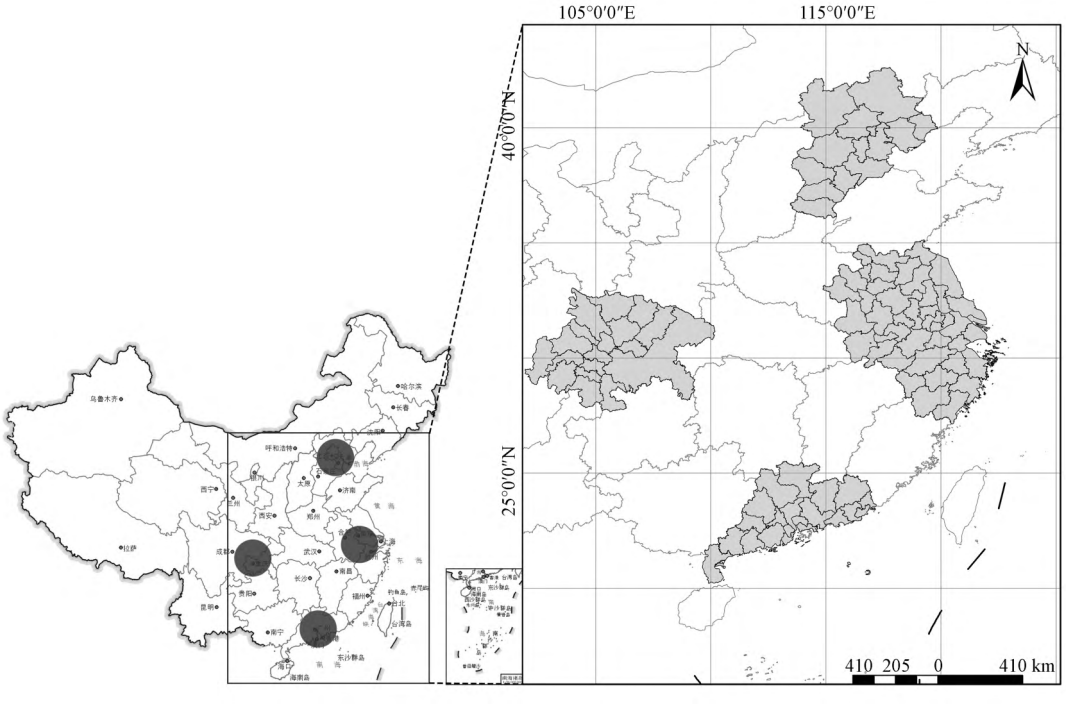


图1 研究区域示意图（审图号：GS（2019）1823号，自然资源部监制，底图未修改）

Fig.1 Schematic diagram of the study area

3.2 数据来源

区域经济社会和环境治理数据来源于国家和地方历年统计年鉴，以及历年政府工作报告．碳排放数据来源于中国城市温室气体工作组（http://www.cityghg.com/toCauses? id=4），访问于2023年5月1日．为了保证数据的有效性，本研究对部分城市进行了实地调研，访谈了相关省、市政府工作人员．之后结合调研结果将收集到的数据进行离差标准化处理，以消除量纲变异大小的影响．

3.3 城市群碳排放评估和分析方法

城市中各类要素和产业聚集的活动过程产生了能源消耗，而政府会通过政策制定有意识地对城市空间进行绿色治理，引导城市绿色发展，这两个作用共同推进形成了城市群碳排放的时空格局（图2）．在此理论

框架下,本文的技术路线构建如下:首先基于整理的2005—2020年中国四大城市群城市碳排放、经济社会及环境治理等面板数据,利用莫兰指数及热点分析方法,分析城市群的碳排放时空演变特征;然后建构城市群碳排放的要素指标体系,利用空间计量回归分析方法,揭示2005—2020年的城市群碳排放影响机制;最后得出本文的研究结论.

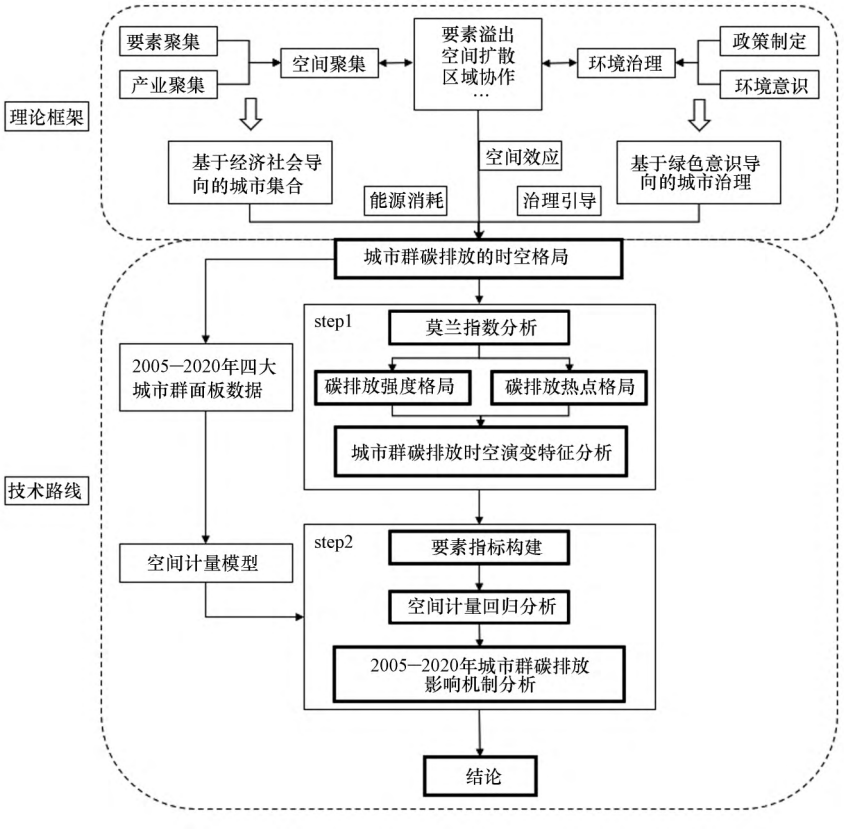


图2　本文理论框架及技术路线图

Fig.2　Theoretical framework and technical roadmap of this article

3.3.1　城市群碳排放分析方法　①空间自相关性分析:空间自相关性分析包括 Moran′s I 指数和热点分析(Getis-Ord G_i^*),利用两者来析碳排放量在空间尺度上的关联性和聚集特征.Moran′s I 指数的计算公式见式(1).

$$\text{Moran's } I=\frac{N}{S_0}\frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\omega_{ij}(y_i-\bar{y})(y_j-\bar{y})}{\sum_{i=1}^{N}(y_i-\bar{y})^2} \tag{1}$$

式中,N为空间单元的个数,也等同于观察值的个数;y_i为变量y在空间单元i的观测值;$\bar{y}$为其均值;ω_{ij}为矩阵中的元素;S_0为所有元素之和,其公式见式(2).

$$S_0=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\omega_{ij} \tag{2}$$

$Z(I)$值可以分析Moran's I指数的显著性水平,计算方法见式(3).

$$Z(I)=\frac{I-E(I)}{\sqrt{V(I)}} \tag{3}$$

式中,$E(I)$为Moran's I指数的期望值;$V(I)$为Moran's I指数的方差.

热点分析G_i^*则可以分析各个城市碳排放量在空间上的高低聚类情况,计算公式见式(4).

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{t} w_{i,j}x_j - \bar{X}\sum_{j=1}^{t} w_{i,j}}{S\sqrt{[t\sum_{j=1}^{t} w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^{t} w_{i,j})^2]/(t-1)}} \quad (4)$$

式中，x_j为空间单元j的属性值；$w_{i,j}$为空间单元i和j之间的空间权重；t为空间单元数量；$\bar{X}$为均值；S为标准差.G_i^*统计结果是Z得分，正值表示热点，Z得分越高，表示热点聚集越紧密；负值表示冷点，Z得分越低，表示冷点聚集越紧密.

②空间计量回归模型的选择：常规的空间计量模型有空间滞后模型（SAR）、空间误差模型（SEM）和空间杜宾模型（SDM）.其中，空间杜宾模型增加了自变量的空间滞后项，同时考虑了自变量和因变量的空间溢出效应，避免遗漏变量导致结果有偏.本文通过LM检验结果确定本研究适用的模型为空间杜宾模型，Hausman检验显示该模型适合添加固定效应，并且进一步通过Wald检验和LR检验证实空间杜宾模型为最优选择.空间杜宾模型见式（5）.

$$Y = \rho \boldsymbol{W}Y + X\beta + \boldsymbol{W}X\delta + \varepsilon \quad (5)$$

式中，X为自变量，在本文中指经济、社会及环境治理的各个要素指标；Y为因变量，是各个城市的碳排放量；ρ为空间滞后系数；$\boldsymbol{W}$为空间权重矩阵；δ为空间误差项系数，β为解释变量系数；ε为扰动项.

直接效应和间接效应是空间杜宾模型重要的分析结果，直接效应代表解释变量对本市碳排放量的直接影响作用，若指标对应的直接效应系数显著为正，意味着在同一市该指标的增加会增加本市碳排量；而间接效应则表示邻近城市的解释变量对本地碳排放的影响作用.

3.3.2 城市群碳排放影响要素指标构建 基于图2的理论框架，城市群碳排放并非仅受单一因素影响，它是多种经济、社会和环境因素相互作用的结果.如城市群通过经济集聚效应，产生要素集聚、产业集聚和城市集聚，城市的集聚效应带来了基础设施的快速发展，制造业和服务业的比重反映了城市群经济结构的特点，这与能源使用效率和碳排放密切相关，并且这些设施也会反过来为城市群服务（Wang *et al.*, 2022）；此外，人口聚集效应也可以促进或抑制碳排放，居民的生活习惯、地区消费水平等也与能源消耗相关联.同时，地方政府为了吸引人口会将环境治理作为一种空间治理方式（Tiebout, 1956; 张建鹏等, 2021），环境投入程度表明了政府和社会对于环境保护的财政支持，而绿色创新能力则反映了技术进步在减少碳排放中的作用.工业污染指标直接显示了主要污染物的排放情况，这对理解和控制城市群的碳排放至关重要.据此，本文建立了碳排放的要素指标体系，主要包括社会经济、环境治理两大维度，涉及经济规模、人口规模、工业污染等10项指标（表1）.

表1 城市群碳排放影响的要素指标体系

Table 1 Element indicator system of carbon emission impact in urban agglomerations

指标层	指标名称	指标内涵
社会经济	地区经济规模	地区GDP总量（万元）
	地区消费水平	社会消费品零售总额（万元）
	制造业规模	二产占GDP比重
	服务业规模	三产占GDP比重
	地区人口规模	年末总人口量（万人）
环境治理	环保投入程度	环境污染治理投资占GDP比重
	环境重视程度	环境词汇词频与政府工作报告词频之比
	绿色创新能力	当年申请的绿色发明数量
	工业污染情况	工业二氧化硫排放量（t）
	工业烟尘污染	工业烟尘排放量（t）

4 城市群碳排放特征及影响机制分析（Characteristics of carbon emissions in urban agglomerations and analysis of the influencing mechanisms）

4.1 城市群碳排放时空演变特征分析

通过对四大城市群2005—2020年碳排放量的空间相关性分析，可以发现它们表现出较大的差异（表2）.长三角和珠三角城市群内部城市之间的碳排放大多表现出显著相关关系，而京津冀和成渝城市群内部城市之间的碳排放则始终没有显著相关关系.这表明长三角和珠三角城市群内部各个城市的碳排放量彼此之间互相影响，而京津冀和成渝内部各个城市彼此影响较少.其中，长三角地区在2015年不显著相关的表现可能是安徽省在此期间纳入长三角城市群（2014年9月，国务院出台关于长江经济带发展的指导意见，明确将合肥都市区划入长三角城市群；2016年6月，国家发改委、住房和城乡建设部印发的《长江三角洲城市群发展规划》提出，安徽8座城市正式成为长三角城市群的新成员，最终安徽省于2019年正式纳入长三角），出现了一定的适应期.

表 2　各城市群碳排放全局 Moran's *I* 及 *P* 值

Table 2　Global Moran′s *I* and *P* values of carbon emissions in four Chinese urban agglomerations

年份	长三角		京津冀		珠三角		成渝	
	Moran's *I*	*P* 值	Moran's *I*	*P* 值	Moran's *I*	*P* 值	Moran's *I*	*P* 值
2005 年	0.1825	0.0146	−0.1443	0.7349	0.1924	0.0942	−0.116	0.4511
2010 年	0.2046	0.011	−0.0559	0.8545	0.3872	0.0037	−0.0682	0.8703
2015 年	0.1019	0.1651	−0.1362	0.7785	0.4073	0.0024	−0.0878	0.7344
2020 年	0.1922	0.0184	−0.0484	0.8243	0.4138	0.0021	−0.0878	0.6281

通过对 2005—2020 年四大城市群碳排放时空格局分析,可以发现,4 个城市群碳排放呈逐年上升的趋势,其中,长三角、京津冀及珠三角城市间的碳排放量差异化有降低趋势,但成渝城市间的差距一直较大(图 3a).

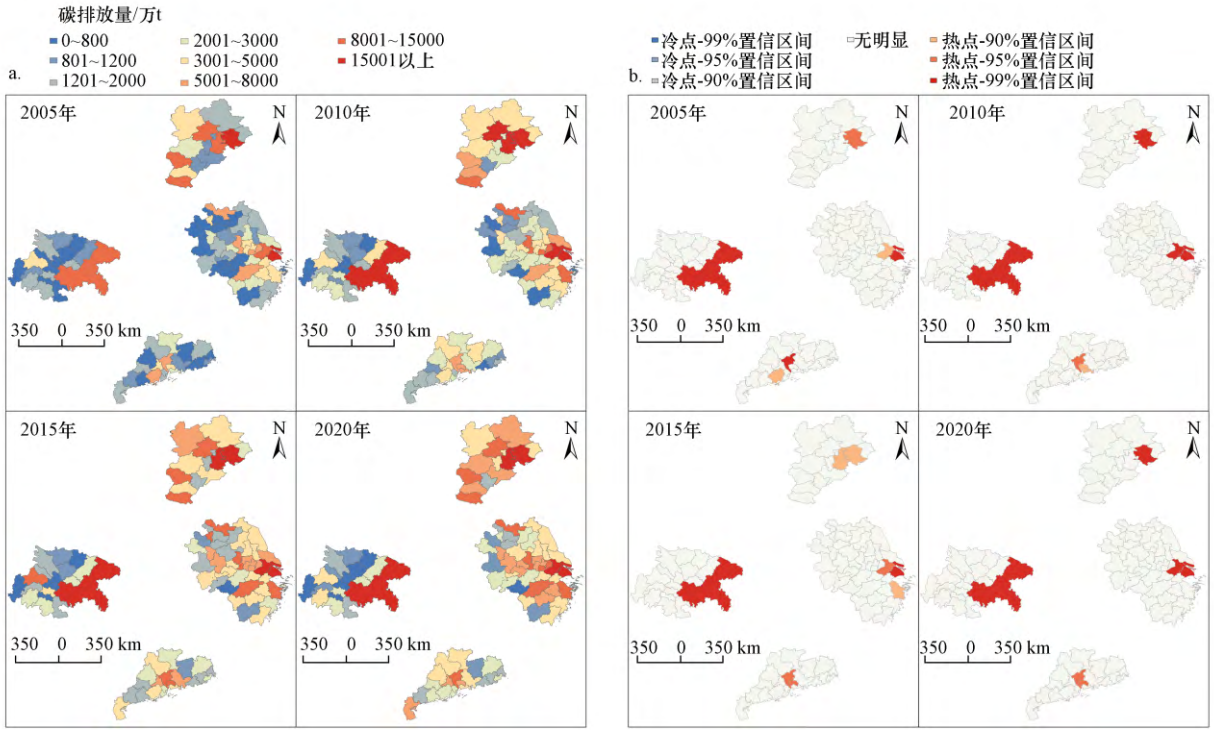


图 3　2005—2020 年中国四大城市群碳排放时空格局(a)及碳排放热点格局(b)

Fig.3　Spatial and temporal patterns of carbon emissions (a) and patterns of carbon emission hotspots (b) in China′s four major urban agglomerations, 2005—2020

对于长三角城市群来说,在 2005—2010 年,上海的碳排放量最高,空间格局呈现单中心聚集特征.在 2015—2020 年,原有的中心集聚区不断向外扩散,空间格局呈现出主核上海都市圈,次核南京、杭州、宁波及徐州的“一心多点”空间格局.值得注意的是,城市群碳排放量的空间分布格局与基本呈现出“都市圈-城市群”的层级关系,如上海、南京、苏州、无锡、常州、徐州、杭州、合肥、宁波的碳排放量较高,这些城市组成了长三角城市群的主要城市结构,并对长三角区域“一体化”和“高质量”的发展水平有至关重要的作用.

对于京津冀城市群来说,2005—2020 年城市碳排放时空格局呈现出城市群东部“北京-天津-唐山”3 个大城市和城市群西南区域“石家庄-邢台-邯郸”3 个主要城市的“双核心”空间聚集特征.这样的空间分布格局基本与京津冀地区的三大都市圈契合,分别为首都都市圈、天津都市圈和石家庄都市圈,但从时间变化来看,京津冀城市群城市之间的联系可能较弱,呈现部分城市联系较为紧密,整体联系较为松散的特征.

对于珠三角城市群而言,2005 年城市群碳排放量呈现向广州为中心的正向聚集的特征,2010 年逐步由“广州-佛山”这两个城市向外扩张,2015—2020 年形成以广州、佛山、东莞等几个大城市为核心聚集,并不断

向外溢出的空间特征.且这几个大城市组成的碳排放集中区域与中国提出的粤港澳大湾区战略发展规划的规划区域范围(2016年3月,国务院印发《关于深化泛珠三角区域合作的指导意见》,要求广州、深圳携手港澳,共同打造粤港澳大湾区,建设世界级城市群.2017年3月5日,十二届全国人大报告明确提出"要推动内地与港澳深化合作,研究制定粤港澳大湾区城市群发展规划.2019年2月,中共中央、国务院印发了《粤港澳大湾区发展规划纲要》)高度吻合.同时,该城市群西部城市湛江由于其地理位置是中国广东、广西和海南这3个省(区)经济内循环的一个重要支点,也是建设海南自贸港的前沿阵地,在2010年之后碳排放量增加较快.

对于成渝城市群而言,2005—2020年城市群基本呈现重庆、成都双核心空间特征,其中,成都市从2005—2015年碳排放核心特征不断加强,在2015年之后有所减弱(2018年2月11日习近平总书记来川视察时在成都首次提出"公园城市";2022年5月25日,成都市委、市政府印发《成都建设践行新发展理念的公园城市示范区行动计划(2021—2025年)》),重庆的碳排放聚集特征则一直很强势.且这两个城市之间的地区的碳排放量绝大部分是"冷点",说明两个城市并没有较好地形成向外扩散发展的趋势,成渝城市群开放和现代化起步相对较晚,其协同性还处在进一步加强的过程中.

进一步使用热点分析方法分析碳排放时空聚集特征(图3b),可以发现我国四大城市群碳排放虽均存在核心区域,但仍有一定的区别.具体表现为:2005—2020年长三角、京津冀、成渝城市群碳排放量有很明显的热点集聚区,而珠三角城市群则一直无较为明显的高值聚集区域.

长三角城市群碳排放的热点区域主要在东部区域,并且上海一直是热点;而京津冀城市群的热点区域则集中在北部区域,唐山市一直处于碳排量的高热点区,北京由热点区域变成非热点区域,说明唐山市碳排量一直较大,产业结构属于高碳结构产业体系,而北京的碳排放量增长速度低于其附近城市.两个城市群的碳排放高值集聚区分别主要位于上海都市圈、北京-天津都市圈,可见长三角东部上海区域和京津冀东部北京-天津-唐山区域的经济社会建设活动所产生的碳排放量的时空聚集性和对周围邻近空间的影响力已经远超区域内其他省会或者副省级城市;而珠三角城市群则一直无较为明显的高值聚集区域,说明珠三角城市群各个城市的碳排放量差异不够悬殊;而对于成渝城市群来说,尽管在过去的几十年里,重庆的工业经历了从传统的重工业向现代制造业和高技术产业转型的过程,但热点分析表明成渝城市群2005—2020年的碳排量热点区域一直是重庆市.

整体而言,长三角城市群一体化发展、珠三角城市群的高质量发展、京津冀城市群及成渝城市群的协同性发展还有较大的提升空间,这些城市群可以考虑将一些碳排放量较低的区域打造成碳汇核心,从而提升地区的可持续发展水平.

4.2 2005—2020年城市群碳排放影响因素分析

使用空间杜宾模型分析城市群碳排放影响因素,结果显示,长三角城市群对碳排放有显著直接效应的要素为地区人口规模、环保投入程度、工业污染情况,间接效应显著的有地区经济规模、社会消费水平、工业污染情况(表3).其中,人口规模增加会显著增加本市的碳排放,说明长三角地区人口增加会带来较多的能源消耗;工业污染情况对长三角城市群碳排放的直接效应和间接效应均正向显著,说明长三角地区产业能源消耗对于工业污染物原料需求量较大,且在消耗过程中易产生大量的碳排放;地区经济规模对碳排放具有显著的正向间接效应,表明长三角地区城市产业具有一定的外溢效应,城市间产业协作性较强;地区消费水平对碳排放具有显著的负向间接效应,表明随着本市社会消费品零售总额增加,本地消费市场的需求得到了满足,进而减少了对邻近城市产品的需求,从而间接减少了它们的生产和碳排放;环保投入程度对碳排放具有显著的负向直接效应,说明政府环境治理行为卓有成效,本市环境投资的增加带来了相应的技术提升和能源效率提升,从而减少本市碳排放.

珠三角城市群的分析结果显示(表3),对碳排放具有显著直接效应的要素为环保投入程度、环境重视程度、工业污染情况,间接效应显著的有地区经济规模、地区消费水平、工业烟尘污染.其中,环境重视程度和工业烟尘污染的直接效应正向显著,说明珠三角地区能源燃烧效率可能不高,产业在进行能源消耗时易同时产生固态悬浮物和CO_2,同时相应的环境规制策略可能不够完善,不能够很好地抑制碳排放,如当新的环境规制实施时,企业会出现一定的调整期,导致短期的反弹和规制绕过,或导致产业结构的变化等;地区

经济规模间接效应正向显著和社会消费水平间接效应负向显著与长三角地区一致,而工业烟尘污染间接效应负向显著,说明尽管珠三角地区城市间产业具有协作性和外溢性,但区域协同水平不如长三角地区.在这个地区,尽管一个城市产业集聚或扩张带来了工业烟尘污染的增加,但由于该地区部分城市的虹吸效应,出现了邻近产业向本市迁移的现象,这可能导致相同或类似产业的邻近城市逐渐放弃或减少生产活动,从而导致其碳排放降低.

表3　长三角城市群碳排放量影响因素空间回归模型结果

Table 3　Spatial regression model results of influencing factors on carbon emissions in the Yangtze River Delta urban agglomeration

变量	长三角			珠三角		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
地区经济规模	0.173	1.271**	1.443***	−0.914	7.077***	6.163**
	−0.245	−0.505	−0.510	−0.747	−2.607	−2.796
地区消费水平	0.062	−1.092**	−1.030**	0.332	−3.844**	−3.512**
	−0.191	−0.461	−0.499	−0.431	−1.645	−1.774
制造业规模	−0.115	−0.0867	−0.202	0.176	−0.113	0.0623
	−0.0786	−0.118	−0.144	−0.180	−0.379	−0.356
服务业规模	−0.120	0.0308	−0.0888	0.124	0.560	0.684
	−0.113	−0.153	−0.16	−0.284	−0.611	−0.66
地区人口规模	0.685***	−0.242	0.443	0.475	−1.041	−0.566
	−0.198	−0.415	−0.457	−0.618	−1.099	−1.315
环保投入程度	−0.160**	0.0481	−0.112	−0.115**	0.0113	−0.104
	−0.069	−0.175	−0.200	−0.0571	−0.140	−0.147
环境重视程度	−0.0175	−0.0489	−0.0665	0.1190*	0.103	0.222
	−0.0414	−0.0918	−0.1100	−0.0627	−0.125	−0.142
绿色创新能力	−0.0798	−0.0434	−0.123	0.52	−1.281	−0.761
	−0.0813	−0.18	−0.193	−0.427	−1.065	−1.245
工业污染情况	0.105*	0.228**	0.333**	−0.0749	0.293	0.218
	−0.0549	−0.113	−0.135	−0.141	−0.287	−0.369
工业烟尘污染	−0.0105	−0.0945	−0.105	0.106*	−0.628***	−0.522***
	−0.031	−0.081	−0.0841	−0.0613	−0.146	−0.158
R-squared		0.563			0.544	

注:***、**和*分别表示变量在1%、5%和10%的显著水平下显著.直接效应指的是变量对本城市的影响系数,间接效应指的是变量对其他城市的空间溢出系数,总效应就是每个城市解释变量的平均变化对所有城市被解释变量的影响.

5　讨论(Discussion)

5.1　功能结构特征对城市群时空演变格局的影响

研究结果表明,城市群的功能结构特征对其时空演变具有较大影响.以长三角和珠三角城市群为例,两地在改革开放初期便开始了快速的工业化和现代化进程,由于较早地接触到外资和先进技术,这些地区发展了一系列产业链和供应链,加强了内部的经济协同.且地理上相对集中,拥有较发达的交通网络,形成长三角的“上海+南京、杭州、苏州、无锡、合肥等多中心”的协同发展和珠三角的“主核广州-佛山-东莞-深圳不断聚集增强并向外溢出,次核湛江显现”的空间格局(图4).

对于京津冀城市群而言,尽管京津冀地理上相邻,但仍缺乏深度的交通与经济整合,并且北京地区的碳排量有向外疏解的趋势,逐渐从“北京-天津-唐山及石家庄-邢台-邯郸的双核发展”向“唐山主核及北京、天津、石家庄-邢台-邯郸多个次核”空间格局演变.

成渝城市群与前述的城市群相比,其开放和现代化进程相对较晚,碳排放空间格局呈现“重庆-成都主次双核”的模式,且两个城市间的卫星城市在协作和过渡方面尚未充分发挥作用,碳排放量普遍较低.其中,重庆对外扩展性相对而言较弱,而成都空间溢出效应相对较强.

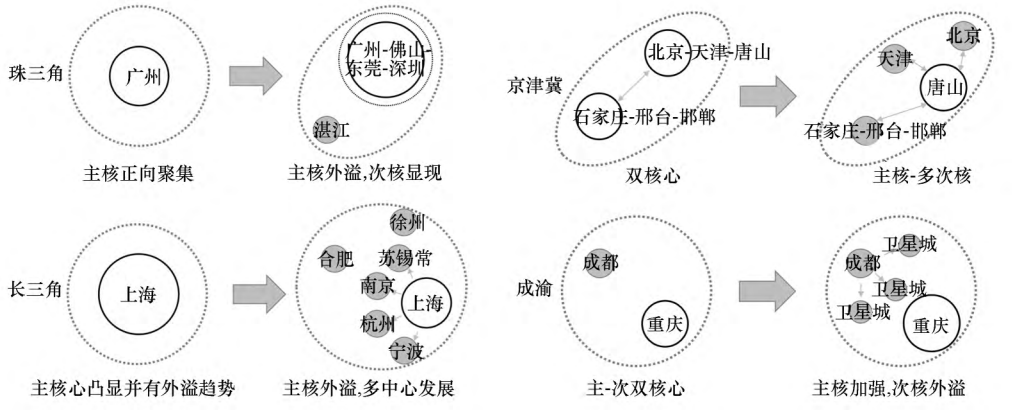


图4 四大城市群时空演变格局趋势示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the spatiotemporal evolution pattern trend of the four major urban agglomerations

5.2 合理的环境管理和城市间协作可以有效促进城市群可持续发展

合理的环境治理行为可以有效降低城市群的碳排放.分析发现,环保投入程度对城市群碳排放有显著的负相关效应.这说明当一个城市的政府或组织加大对环保的投入,制定合理的环境规制与监督,可以有效抑制城市的过度排放行为.为此,建议各级政府应持续强化和制定科学合理的环保政策,增加环境投资,鼓励技术创新,推动绿色生产方式,进而逐渐降低城市群的碳排放水平.

其次,城市群发展过程中应注意城市间经济社会等要素的协作与互补.分析发现,长三角和珠三角城市群均为地区经济规模间接效应正向显著和地区消费水平间接效应负向显著,表明这两个城市群内部一个城市的经济发展会促进邻近城市的碳排放,同时,消费水平的增加会抑制邻近城市的碳排放.具体而言,前者表明当一个城市经济发展,其产业活动会增加,从而导致更多的资源和原材料需求.而邻近城市由于地理邻近性和交通便利性,可能成为供应链的重要环节,因此其产业活动也随之增加,导致碳排放增长;另外,经济增长也可能带来技术和资本流动,这些流动到邻近城市可能进一步刺激其经济和产业活动.后者表明随着一个城市的消费市场达到饱和,对邻近城市产品的需求可能会减少,同时消费水平的提高通常意味着更高的消费品质和服务需求,导致本地生产模式的转变,减少高污染、高碳排放的产业,也使得附近城市在生产过程中采用更加环保的方式以满足消费者的需求,从而降低碳排放.

总体上,城市群的产业同时具有外溢与协作特性.因此,在城市群的规划与发展中,应更注重城市间的资源、技术与信息共享,强化产业链的协同与互补,鼓励城市间的产业协同合作,带来经济溢出和绿色技术溢出效应,提高资源有效利用率,确保各城市在经济与环保目标上实现共赢,同时维护整体的碳排放平衡.

5.3 可根据碳排放时空格局和影响机制来确定差异化减碳策略

针对各种类型的城市群,可以根据其独特的碳排放影响机制和时空演变特征来确定减碳策略.如对于发展较为成熟的长三角和珠三角城市群来说,可以根据空间格局的“多中心”特点,应强化各中心之间的经济与环保合作,共同制定与实施碳减排策略,减少重复建设,共享绿色资源与技术.同时,鉴于珠三角地区的“主核广州-佛山-东莞-深圳”的空间格局,应进一步优化物流与交通系统,采用绿色物流和公共交通,减少碳排放.另外,由于两地的“向外溢出”特性,应鼓励绿色技术从主中心向外扩散,带动周边地区的绿色发展.

对于京津冀城市群而言,由于该区域演变为多个次核的空间格局,应加强各次核间的碳排放管理合作,制定统一或相互协调的减碳策略.可以根据“唐山主核”的空间格局,加强绿色技术与产业的发展,鼓励政策与经济协同.另外,尽管北京更多地作为政治中心,但也可利用其资源优势,推动与天津、唐山等城市的经济与环保政策协同.

对于成渝城市群,可以基于“重庆-成都主次双核”的模式,两城之间应共同研发与推广绿色技术,强化低碳产业协同发展.其次可以利用卫星城市作为绿色连接点,鼓励卫星城市在重庆和成都之间发挥绿色桥梁的作用,如设立绿色物流中心、推广绿色交通工具等.并且强化成都的外溢效应,利用成都的空间溢出效应,

推动其绿色技术与经验向周边地区传播，带动整个成渝城市群的绿色发展.

6　结论和政策指示（Conclusions and policy directives）

城市群的碳排放时空特征与其功能性质有明显关联.以长三角和珠三角为例，其快速的工业化和外资接触导致了一整套产业链的形成和内部经济的协同增强.相比之下，京津冀虽地理邻近但在经济整合上相对落后，且其碳排放有向外部地区转移的趋势.而成渝城市群，其碳排放空间模式呈现为“重庆-成都”的双核模式，两市之间的交互性仍有待加强.

合理的环境治理对城市群碳排放降低起到了积极作用.环保投入程度与城市群碳排放呈现负相关关系，意味着加大环保投入可以有效控制城市的碳排放.但不科学的环境规制政策可能导致碳排放的转移，从而适得其反.建议政府应加大对科学合理环保政策的制定与实施，推动技术创新和绿色生产.

此外，城市群内部城市之间的经济社会协作与互补对碳排放有着复杂影响.例如，长三角和珠三角城市群中，一个城市的经济增长可能会带动周边城市的碳排放增长，而消费水平的提高则可能降低邻近城市的碳排放.这显示出城市经济发展与碳排放之间存在复杂的时空关联和互动机制，这也意味着必须充分考虑各城市群的碳排放时空格局和影响机制，从而制定差异化的减碳策略.

长三角地区应鼓励产业结构的优化和升级，重点发展清洁能源和低碳技术，同时加强区域内环境治理的协作与协调；应推进绿色基础设施建设，如公共交通和节能建筑，以降低城市碳足迹.京津冀地区应强化区域一体化，实现资源共享和环境联防联控，应加大清洁能源利用和节能减排技术应用，同时促进环境友好型城市基础设施建设，减少碳排放转移.珠三角地区应利用其经济发展优势，推进绿色产业和低碳技术的发展，同时加强与周边城市的经济互补和环境合作；同时完善环境法规和标准，加强跨城市环保协作，共同应对跨界碳排问题.成渝城市群在碳排放治理上应着重强化城市间的协作与交流，针对“重庆-成都”双核模式，应平衡两市间的发展，共同推动低碳产业和清洁能源的发展.建议在重庆和成都之间建立更为紧密的经济和环境合作机制，如共同研发和推广低碳技术.

总之，我国城市群的碳排放受多种因素影响，并存在复杂相互作用.未来如何在经济增长与环境保护间寻找平衡，实现碳排放逐步下降，仍然面临巨大挑战.需政府、企业和社会共同努力，推动技术和制度创新，从而达到可持续发展的目标.

参考文献（References）：

Bai Y，Deng X，Gibson J，*et al*.2019.How does urbanization affect residential CO_2 emissions？ An analysis on urban agglomerations of China[J].Journal of Cleaner Production,209(Feb.1):876-885

陈明星，程嘉梵，周园，等.2022.碳中和的缘起、实现路径与关键科学问题：气候变化与可持续城市化[J].自然资源学报,37(5):1233-1246

程番苑，石培基，张韦萍，等.2023.主体功能区视角下兰西城市群碳收支时空分异及碳补偿分区—基于DMSP/OLS和NPP/VIIRS夜间灯光数据[J].环境科学学报,43(11):398-410

Chen X，Qiu B，Sun S.2021.Polycentric spatial structure and energy efficiency：Evidence from China′s provincial panel data[J].Energy Policy,149:1-13

Cui X，Wei X，Liu W，*et al*.2019.Spatial and temporal analysis of carbon sources and sinks through land use/cover changes in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration region[J].Physics and Chemistry of the Earth,110:61-70

Dhakal S.2009.Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications[J].Energy Policy,37(11):4208-4219

Dong J，Li C.2022.Structure characteristics and influencing factors of China′s carbon emission spatial correlation network：A study based on the dimension of urban agglomerations[J].Science of the Total Environment,853:1-15

冯长春，赵燕菁，王富海，等.2022.面向碳中和的规划响应[J].城市规划,46(2):25-31

Fang C，Lin X.2009.The eco-environmental guarantee for China′s urbanization process[J].Journal of Geographical Sciences,19(1):95-106

Fang C，Yu D.2017.Urban agglomeration：An evolving concept of an emerging phenomenon[J].Landscape and Urban Planning,162:126-136

郭沛，梁栋.2022.低碳试点政策是否提高了城市碳排放效率—基于低碳试点城市的准自然实验研究[J].自然资源学报,37(7):1876-1892

Guo X，Fang C.2023.How does urbanization affect energy carbon emissions under the background of carbon neutrality？ [J].Journal of Environmental Management,327:1-10

Han F，Xie R，Lu Y，*et al*.2018.The effects of urban agglomeration economies on carbon emissions：Evidence from Chinese cities[J].Journal of Cleaner Production,172(PT.1):1096-1110

孔旻蔚,胡宏,张宏镭,等.2023.2000—2020年长三角地区城市低碳竞争力时空演化[J].地理研究,42(10):2713-2737

李志英,朱晓珊,杨丽,等.2023.成渝城市群紧凑度与碳排放强度时空演变及协调发展[J].环境科学,44(9):1-14

Liu K,Xue M,Peng M,*et al*.2020.Impact of spatial structure of urban agglomeration on carbon emissions:An analysis of the Shandong Peninsula,China [J].Technological Forecasting and Social Change,161:1-9

Liu K, Xue Y, Chen Z, *et al*. 2022. Economic spatial structure of China′s urban agglomerations: Regional differences, distribution dynamics, and convergence[J].Sustainable Cities and Society,87:1-14

陆杉,李雯.2023.长江中游城市群工业碳排放空间关联及其影响因素[J].环境科学与技术:1-14.DOI: 10.13227/j.hjkx.202307260

Mma B, Wei C C, Wca B, *et al*.2019.Whether carbon intensity in the commercial building sector decouples from economic development in the service industry? Empirical evidence from the top five urban agglomerations in China[J].Journal of Cleaner Production,222:193-205

Qian Y, Wang H, Wu J.2022.Spatiotemporal association of carbon dioxide emissions in China's urban agglomerations[J].Journal of Environmental Management,323:1-12

Shen W, Liang H, Dong L, *et al*.2021.Synergistic CO_2 reduction effects in Chinese urban agglomerations: Perspectives from social network analysis[J]. Science of the Total Environment,798:1-15

Shu H, Xiong P.2019.Reallocation planning of urban industrial land for structure optimization and emission reduction: A practical analysis of urban agglomeration in China′s Yangtze River Delta[J].Land Use Policy,81:604-623

Tiebout C M.1956.A pure theory of local expenditures[J].Journal of Political Economy,64(5):416-424

Wang S, Liu X, Zhou C, *et al*.2017.Examining the impacts of socioeconomic factors, urban form, and transportation networks on CO_2 emissions in China′s megacities[J].Applied Energy,185(1):189-200

Wang Y, Niu Y, Li M, *et al*.2022.Spatial structure and carbon emission of urban agglomerations: Spatiotemporal characteristics and driving forces[J]. Sustainable Cities and Society,78:1-10

Wang Y, Yin S, Fang X, *et al*.2022.Interaction of economic agglomeration, energy conservation and emission reduction: Evidence from three major urban agglomerations in China[J].Energy,241:1-13

Wei M,Cai Z,Song Y,*et al*.2024.Spatiotemporal evolutionary characteristics and driving forces of carbon emissions in three Chinese urban agglomerations [J]. Sustainable Cities and Society, 2024:105320

Xu L, Fan M, Yang L, *et al*. 2021. Heterogeneous green innovations and carbon emission performance: Evidence at China′s city level[J]. Energy Economics,99:1-16

Yang C, Xia R, Li Q, *et al*.2021.Comparing hillside urbanizations of Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta and Guangdong-Hong Kong-Macau greater Bay area urban agglomerations in China[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,102:1-9

Yang Y, Lu H, Liang D, *et al*.2022.Ecological sustainability and its driving factor of urban agglomerations in the Yangtze River Economic Belt based on three-dimensional ecological footprint analysis[J].Journal of Cleaner Production,330:1-10

Yao Y, Pan H, Cui X, *et al*.2022.Do compact cities have higher efficiencies of agglomeration economies? A dynamic panel model with compactness indicators[J].Land Use Policy,115:1-10

Yu X, Wu Z, Zheng H, *et al*.2020.How urban agglomeration improve the emission efficiency ? A spatial econometric analysis of the Yangtze River Delta urban agglomeration in China[J].Journal of Environmental Management,260:1-10

Yu Y, Dai Y, Xu L, *et al*.2023.A multi-level characteristic analysis of urban agglomeration energy-related carbon emission: A case study of the Pearl River Delta[J].Energy,263:1-12

张建鹏,陈诗一.2021.金融发展、环境规制与经济绿色转型[J].财经研究,47(11):78-93

Zhang X, Brandt M, Tong X, *et al*.2022.A large but transient carbon sink from urbanization and rural depopulation in China[J].Nature Sustainability,5 (4):321

Zhao Y, Chen R, Zang P, *et al*.2022.Spatiotemporal patterns of global carbon intensities and their driving forces[J].Science of the Total Environment,818: 1-13

Zhou Y, Chen M, Tang Z, *et al*.2021.Urbanization, land use change, and carbon emissions: Quantitative assessments for city-level carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J].Sustainable Cities and Society,66(3):102701