

分类号
U D C

密级
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

论文题目 人口集聚对城市碳排放的影响研究

研究生姓名: 田雨

指导教师姓名、职称: 张永凯 教授

学科、专业名称: 理论经济学 人口、资源与环境经济学

研究方向: 资源利用与区域发展

提交日期: 2024年6月5日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 田雨 签字日期： 2024年6月5日

导师签名： 张永凯 签字日期： 2024年6月5日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意（选择“同意”/“不同意”）以下事项：

- 学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；
- 学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 田雨 签字日期： 2024年6月5日

导师签名： 张永凯 签字日期： 2024年6月5日

Research on the Influence of Population Agglomeration on Urban Carbon Emission

Candidate : Tian Yu

Supervisor: Zhang Yongkai

摘 要

随着人口的快速流动与迁移,我国人口在空间上呈现明显的集聚态势。人口作为信息、技术和资本的载体,在区域内集聚能够改变城市的经济结构、产业布局和资源状况,对经济和环境产生重要影响。其中,碳排放是近年来讨论的热点话题,实现“双碳”目标是贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的内在要求,具有紧迫性和艰巨性。在此背景下,深入探究我国城市层面人口集聚对碳排放的影响及其传导路径,并分析不同特征城市间的异质性,对我国低碳城市建设与节能减排具有重要意义。

本文以 2006-2021 年中国 254 个地级及以上城市为研究对象,首先,依据已有研究成果与理论基础,构建人口集聚对城市碳排放影响的理论机制并提出研究假设。其次,考虑多方面因素选择恰当方法测度人口集聚和城市碳排放,并从时序变化、区域差异、空间关联三个角度对人口集聚和城市碳排放进行现状分析。最后,以 STIRPAT 模型作为基准回归模型,在通过多重模型检验的基础上,选用空间杜宾模型等计量经济学方法实证分析人口集聚对城市碳排放的非线性影响及其传导路径;并按照城市的区位、行政区划等级、规模大小、发展进程的不同将全样本城市进行划分,进一步探讨不同特征城市人口集聚对城市碳排放影响的异质性。研究结果显示:(1)人口集聚显著影响城市碳排放,并且呈“U”型非线性特征。(2)人口集聚会通过“人口集聚—产业结构升级—城市碳排放”、“人口集聚—基础设施建设—城市碳排放”两条路径影响城市碳排放。(3)不同特征城市人口集聚对碳排放的影响具有明显异质性。东部、中部地区人口集聚对城市碳排放均具有明显的抑制作用,而西部和东北地区人口集聚对城市碳排放的影响具有“U”型的非线性特征;直辖市和副省级市人口集聚对城市碳排放具有抑制作用,而地级市人口集聚对城市碳排放的抑制作用相对较差;大城市人口集聚对城市碳排放具有显著抑制作用,但超大特大城市人口集聚对城市碳排放的抑制作用相对较差,中小城市人口集聚对城市碳排放的影响具有“U”型的非线性特征;工业化发展阶段的的城市人口集聚对城市碳排放具有抑制作用,而后工业化阶段的的城市人口集聚对城市碳排放的抑制作用相对较差。

基于上述结论,本文从加强相邻区域协同管理、推动以人为本的新型城镇化、加大产业结构升级转型力度、实施符合自身城市特点的人口管理政策等角度提出

相关建议,为不同城市更大程度发挥人口集聚正外部性并实现节能减排提供启示和借鉴。

关键词: 人口集聚 城市碳排放 非线性影响 STIRPAT 模型 空间杜宾模型

Abstract

With the rapid flow and migration of the population, China's population presents an obvious gathering trend in space. As the carrier of information, technology and capital, population gathering in a region can change the economic structure, industrial layout and resource status of the city, and have an important impact on the economy and environment. Among them, carbon emission is a hot topic discussed in recent years, and the realization of the goal of "double carbon" is an inherent requirement for implementing the new development concept, building a new development pattern, and promoting high-quality development, which is urgent and arduous. In this context, it is of great significance to explore the impact of population agglomeration on carbon emission and its transmission path, and to explore the heterogeneity of cities with different characteristics, which is of great significance to the construction of low-carbon cities and energy conservation and carbon reduction in China.

This paper took 254 cities at prefecture level and above in China from 2006 to 2021 as the research object. First of all, based on the existing research results and theoretical basis, the theoretical mechanism of the impact of population agglomeration on urban carbon emissions is constructed and the research hypothesis is proposed. Secondly, considering various factors, we choose appropriate methods to measure population

agglomeration and urban carbon emissions, and analyze the spatial-temporal changes of population agglomeration and urban carbon emissions from three perspectives: time series change, regional difference and spatial correlation. Finally, the STIRPAT model is used as the benchmark regression model, and on the basis of passing the multiple model test, the Spatial Durbin Model, mediating effect model and other econometric methods are used to empirically analyze the nonlinear impact of population agglomeration on urban carbon emissions and its transmission path. And according to the location of the city's size and the development process, administrative levels, different cities divided the whole samples, further explore different characteristics of the urban population agglomeration heterogeneity influence on urban carbon emissions. The main conclusions are as follows: (1) Population agglomeration has a significant impact on urban carbon emissions, and it presents a U-shaped nonlinear characteristic. (2) Population agglomeration affects urban carbon emissions by affecting industrial structure upgrading and infrastructure construction. (3) The effects of population agglomeration on carbon emissions in cities with different characteristics have obvious heterogeneity. The population agglomeration in the eastern and central regions has a significant inhibitory effect on urban carbon emissions, while the population agglomeration in the western and northeastern regions has a U-shaped nonlinear effect on urban carbon emissions. The population agglomeration of municipalities

directly under the central government and sub-provincial cities has an inhibitory effect on urban carbon emission, while the population agglomeration of prefecture-level cities has a relatively poor inhibitory effect on urban carbon emission. The population agglomeration of large cities has a significant inhibitory effect on urban carbon emissions, but the population agglomeration of megacities has a relatively poor inhibitory effect on urban carbon emissions, and the population agglomeration of small and medium-sized cities has a U-shaped nonlinear characteristic. The population agglomeration in the stage of industrialization has an inhibitory effect on urban carbon emission, while the population agglomeration in the post-industrialization stage has a relatively poor inhibitory effect on urban carbon emission.

Based on the above conclusions, this paper puts forward relevant suggestions from the perspectives of strengthening the coordinated management of neighboring regions, promoting people-centered new-type urbanization, intensifying the upgrading and transformation of industrial structure, and implementing population management policies in line with their own urban characteristics, so as to provide inspiration and reference for different cities to realize energy conservation and emission reduction.

Keywords: Population agglomeration; Urban carbon emissions; Nonlinear effect; STIRPAT model; Spatial durbin model

目 录

1 绪 论	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 研究方法与内容.....	3
1.2.1 研究方法.....	3
1.2.2 研究内容.....	3
1.2.3 技术路线.....	4
1.3 国内外文献综述.....	6
1.3.1 关于人口集聚的研究.....	6
1.3.2 关于碳排放的研究.....	9
1.3.3 关于人口集聚对碳排放的影响研究.....	10
1.3.4 文献述评.....	12
1.4 可能的创新点与不足之处.....	12
2 理论分析与研究假设	14
2.1 理论基础.....	14
2.1.1 人口迁移理论.....	14
2.1.2 集聚经济理论.....	14
2.1.3 环境承载力理论.....	15
2.1.4 低碳经济理论.....	16
2.2 人口集聚对城市碳排放影响的作用机制及研究假设.....	16
2.2.1 人口集聚与城市碳排放.....	16
2.2.2 人口集聚、产业结构升级与城市碳排放.....	18
2.2.3 人口集聚、基础设施建设与城市碳排放.....	19
3 人口集聚与城市碳排放的测度及现状分析	21
3.1 人口集聚的测度及现状分析.....	21

3.1.1 人口集聚的测度.....	21
3.1.2 人口集聚的现状分析.....	21
3.2 城市碳排放的测度及现状分析.....	27
3.2.1 城市碳排放的测度.....	27
3.2.2 城市碳排放的现状分析.....	29
4 人口集聚对城市碳排放影响的实证分析.....	35
4.1 研究方法与模型构建.....	35
4.1.1 研究方法.....	35
4.1.2 模型构建.....	36
4.2 变量选取与数据说明.....	38
4.2.1 变量选取.....	38
4.2.2 数据说明.....	40
4.3 模型检验.....	41
4.3.1 多重共线性检验.....	41
4.3.2 非线性特征检验.....	41
4.3.3 空间计量模型的选择检验.....	42
4.4 实证结果与分析.....	44
4.4.1 非线性特征分析.....	44
4.4.2 传导路径分析.....	46
4.4.3 异质性分析.....	47
4.4.4 稳健性检验.....	54
5 研究结论与对策建议.....	58
5.1 研究结论.....	58
5.2 对策建议.....	59
参考文献.....	62
后记.....	68

1 绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

改革开放以来，我国经济快速发展，取得令人瞩目的成绩。与此同时，由于发展的不平衡性，人口不断流向经济发达地区和大城市，在空间上形成集聚态势。尽管通过“西部大开发”、“东北老工业基地振兴”、“中部崛起”等区域政策的引导，但我国人口仍然向部分区域集聚。具备经济、政治或地理优势的中心城市，往往在城市建设的各个方面展现出较高的综合水平，产生虹吸效应，自然地吸引人口和其他生产、功能要素的集聚。在增加中心城市人口规模的同时，造成周边城市的人口流失。比较历次人口普查数据，发现 2000 年以来全国人口流动规模和流动强度一直呈上升趋势，其中，2020 年流动人口中省内人口流动规模增长迅速，且具有明显的核心城市倾向（王桂新，2021；侯佳伟，2021）。现阶段，我国人口发展具有区域人口增减分化的趋势性特征，人口集聚现象突出。

自“全球变暖”被提出以来，环境问题就逐渐成为全世界关注的热点，我国也改变之前粗放式的发展方式，追求可持续发展与高质量发展，并于 2020 年提出“双碳”目标，积极为全球生态环境的保护贡献中国力量。作为生产与消费的聚集地，城市是能源消耗的主要场所，也是二氧化碳的主要排放地。尽管城市仅占据全球土地面积的 2%，却贡献了全球约 75% 的温室气体排放量。因此，未来要想降低全球的碳排放，就必须减少城市二氧化碳的排放（易艳春，2019）。在中国，节能减排的压力也主要集中在城市，自然资源保护协会的资料显示，中国城市碳排放占碳排放总量的 70% 以上。如何在保持经济稳步增长的同时，降低城市碳排放，寻求城市节能减排的有效路径至关重要。

人口发展是关系中华民族伟大复兴的大事，“双碳”目标的提出是党中央国务院基于国内和国际大局作出的重大战略决策，对中华民族的永续发展和人类命运共同体的构建具有重要意义。人口在区域内集聚能够改变城市的经济结构、产业布局和资源状况，对经济和环境产生深远影响。在此背景下，了解城市层面人

口集聚与碳排放的现状，探究两者间的关系及传导路径，并进一步分析不同特征城市间的异质性，旨在从人口集聚的视角寻求我国低碳城市建设和节能减排的有效路径。

1.1.2 研究意义

（1）理论意义

人口问题始终是人类社会共同面对的全局性、长期性、战略性问题，人口分布和结构的不同对经济社会的发展会产生不同的影响，了解人口与经济社会发展间的规律，有助于推动人口与社会的协调发展。一方面，本研究聚焦于城市层面，以人口迁移理论、集聚经济理论、环境承载力理论与低碳经济理论为指导基础，梳理和分析人口集聚与碳排放的相关研究，构建人口集聚对城市碳排放影响的理论机制，并以产业结构升级、基础设施建设为中心建立两条传导路径，有助于丰富城市层面人口集聚与碳排放的影响研究，进一步延伸人口集聚的环境效应研究；另一方面，根据城市特征的不同将全样本城市进行划分，分组探讨不同特征城市人口集聚对碳排放的影响，旨在进一步丰富当前城市人口集聚的相关研究，助力人口与社会的协调发展。

（2）现实意义

碳减排是我国现阶段的重要目标之一，城市作为人口聚集地区与温室气体主要排放区域，了解现阶段我国人口集聚与城市碳排放现状、人口集聚对城市碳排放的影响及其作用机制，有助于分析城市人口、资源与环境之间的关系，为低碳城市建设提供思路。一方面，已有研究的基础上，本文对人口集聚与城市碳排放指标进行科学测度，并从时序变化、区域差异和空间关联三个角度对其进行现状分析，有助于从整体上把握我国城市层面人口集聚和碳排放的现状和变化趋势；另一方面，从不同特征城市出发，探析人口集聚对城市碳排放影响的异质性，可为不同城市人口管理、规划建设、节能减排提供借鉴与参考。

1.2 研究方法与内容

1.2.1 研究方法

(1) 文献分析法

首先，确定人口集聚、碳排放等关键词后，通过中国知网、Elsevier 电子期刊全文数据库、Springer 电子期刊全文数据库等中文和外文文献查询网站搜索国内外相关文献。其次，通过阅读、整理和分析相关文献，了解人口集聚的测度、人口集聚所产生的效应及带来的各方面影响、城市碳排放产生的原因及测度方法、人口集聚对碳排放的影响等相关理论，梳理国内外文献综述，探寻人口集聚对碳排放影响的理论基础。最后，依据已有文献和理论基础，构建人口集聚对城市碳排放影响的理论机制。

(2) 计量模型法

首先，利用 Excel 制作图表对核心解释变量与被解释变量进行时序变化分析，并用泰尔指数、莫兰指数分析其区域差异与空间关联情况。其次，根据理论机制以 STIRPAT 模型作为基准回归模型，鉴于核心变量均具有显著空间相关性，在此基础上加入空间权重矩阵构建空间计量模型作为回归模型，并利用方差膨胀因子、门槛模型、LM 检验、LR 检验、Wald 检验等方法对其进行多重共线性检验、非线性特征检验与空间计量模型选择检验，选用空间杜宾模型实证分析人口集聚对城市碳排放影响的非线性特征、传导路径及其异质性。最后，利用替换核心解释变量、替换空间权重矩阵的方法进行稳健性检验。

(3) 比较分析法

从时间、空间两个维度对人口集聚与城市碳排放现状进行比较分析，深入探析人口集聚与城市碳排放的时序变化、区域差异以及空间关联情况。然后，从城市的区位、行政区划等级、规模、发展进程四个角度对研究对象进行分类比较分析，进一步检验不同特征城市人口集聚对碳排放的影响。

1.2.2 研究内容

本文的总体结构可分为五个部分，各部分的主要研究内容如下：

第一部分：绪论。首先，介绍研究背景与意义；然后，提出本研究所使用的研究方法与具体的研究内容；其次，梳理国内外文献综述，对人口集聚的测度与经济社会影响、碳排放的测度及其影响因素、人口集聚对碳排放影响的相关文献进行分析与述评；最后，指出可能存在的创新点与不足之处。

第二部分：理论分析与研究假设。主要介绍本文所涉及到的理论基础，即具体介绍所运用到的相关理论，包括人口迁移理论、集聚经济理论、环境承载力理论、低碳经济理论；然后，根据已有文献与理论基础，构建人口集聚对城市碳排放的作用机制，并提出对应研究假设。

第三部分：人口集聚与城市碳排放的测度及现状分析。根据理论要求、数据可获得性与文章的实际运用，用人口地理集中度和人口密度表征人口集聚程度，用人均碳排放量对城市碳排放情况进行具体表征，其中，城市碳排放总量的测度由直接能源消耗与间接能源消耗所产生的碳排放两部分加总获得。然后，从时序变化、区域差异、空间关联三个角度分析 2006-2021 年中国 254 个地级及以上城市人口集聚和城市碳排放的现状。

第四部分：人口集聚对城市碳排放影响的实证分析。首先，结合已有研究及文章需要，以 STIRPAT 模型为基础构建基准模型，并说明变量选取与数据来源情况。其次，利用方差膨胀因子、门槛模型、LM 检验、LR 检验、Wald 检验等方法对基准模型进行多重共线性检验、非线性特征检验与空间计量模型选择检验，确定回归模型与实证方法。最后，利用空间杜宾模型等计量经济学方法对作用机制进行实证检验，分析人口集聚对城市碳排放影响的非线性特征、传导路径、异质性，并利用替换核心解释变量、替换空间权重矩阵的方法进行稳健性检验。

第五部分：研究结论与对策建议。梳理实证结果，得出研究结论，并根据研究结论为不同城市更大程度发挥人口集聚的正外部性并达到节能减排的目标提出相关对策建议。

1.2.3 技术路线

本研究的技术路线如图 1.1 所示：

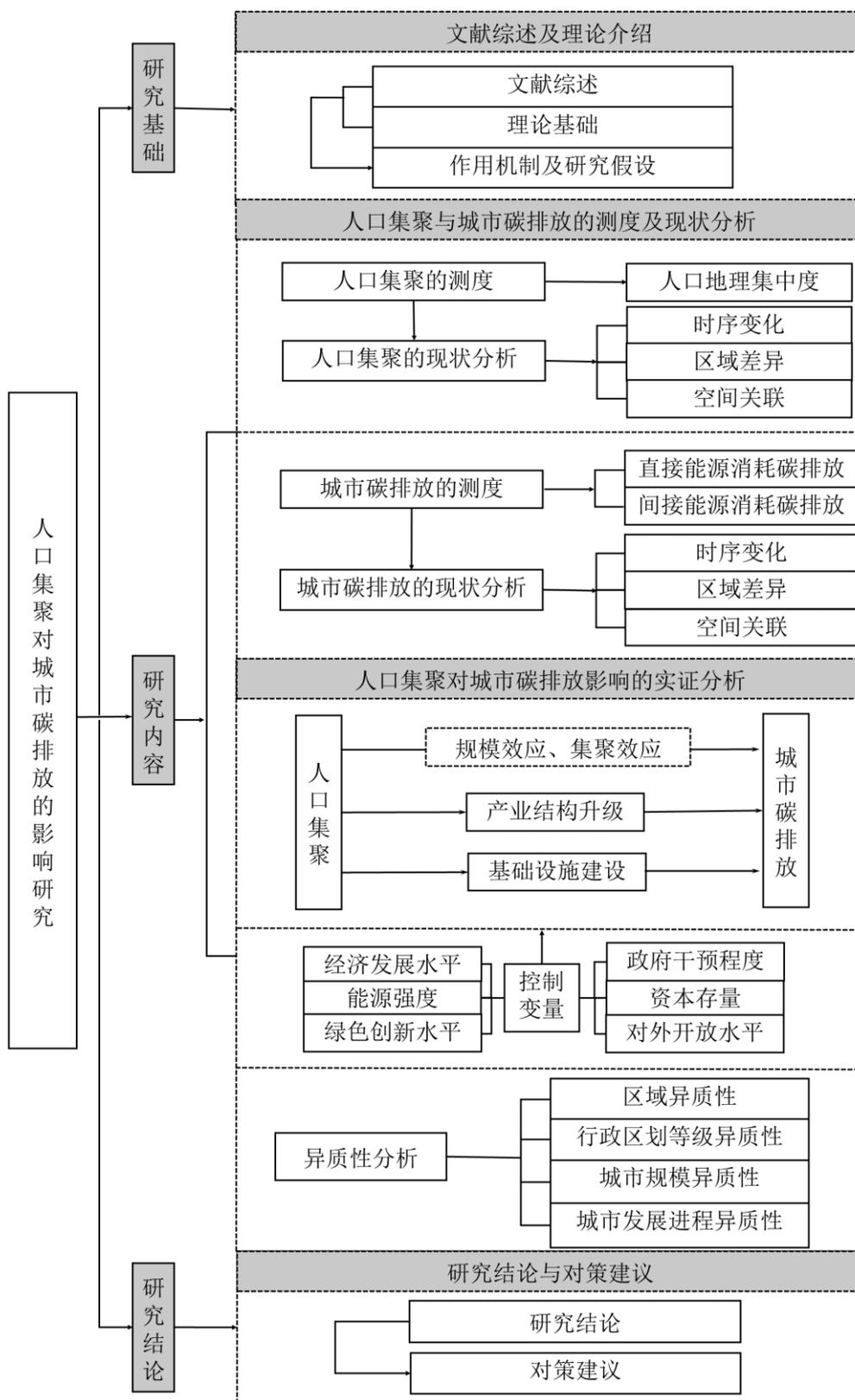


图 1.1 技术路线图

1.3 国内外文献综述

1.3.1 关于人口集聚的研究

人口的流动与迁移形成人口集聚，人口不断从农村向城市集聚、从小城市向周边经济发达城市、省会城市和直辖市集聚是多年来人口空间分布的主要趋势。随着我国高铁等交通基础设施的发展，人口流动频繁，人口集聚现象也愈加突出。对于人口集聚的研究，国内外学者主要使用不同的方法、角度对人口集聚的测度、形成因素、所带来的经济社会影响等方面展开分析，结合本文研究需要，本小节将重点梳理人口集聚的测度以及带来的经济社会影响相关文献。

(1) 人口集聚的测度

人口集聚的测度是进行人口集聚研究的基础，国内外学者主要从规模和比例两个角度对人口集聚进行测度。其中，有学者选择人口规模表示人口集聚程度，并考虑到不同统计年鉴中的常住人口指标存在差异并对其改进，利用 GDP 与人均 GDP 的比值进行测算（周玉龙和孙久文，2015）。但是相对而言，人口规模指标无法消除不同地区的差异性，不便于比较且无法精确表现出集聚态势，因此使用者较少。对于另一个角度比例方面，主要通过人口密度、地理集中度、区位熵指数、空间基尼系数等及其改进来表征人口集聚程度。其中最为基础的是运用人口密度表征人口集聚（张翠菊和张宗益，2016；何文举等，2019），人口密度能够衡量一个国家内的相对集聚水平，从而忽略了地理单位差异造成的空间偏差，更大的人口密度意味着更高的人口集聚。对于人口密度的测度，除了基础的常住人口与行政面积之比外，不同学者根据自身的具体研究也做了不同的改进。部分学者利用建成区面积替代行政区划面积以消除人口的内生性问题，还有的学者为了具体分析人口集聚效应，将区域面积细化为城市建城区面积和其他面积（项本武和张亚丽，2017），利用灯光数据获取连续年份城市建设面积替代行政区划面积构建新的人口集聚度指标（陈乐等，2018）等。除人口密度外，地理集中度、区位熵指数也是测度人口集聚的重要指标之一（闫东升，2017；梁永福等，2023）。还有学者利用空间集聚指标基尼系数测量空间人口集聚度，空间基尼系数由 Krugman（1991）提出，用来表示产业的空间集聚程度，其缺点是无法明确集聚的主要指向。同样，它的扩展指标空间集聚指数，由于数据采集的问题及直观意

义不强，也不被经常采用（易艳春等，2019）。

（2）人口集聚的经济社会影响

人作为生产生活的主要参与者，人口空间分布的改变一定程度上改变了我国劳动力供给与市场供需结构，进而影响经济社会发展。对于人口集聚的经济社会影响，所有影响几乎都是通过人口集聚产生的规模效应与集聚效应所造成的；多数研究关注于人口集聚所带来的经济效应，即：人口集聚通过影响经济、社会相关指标对经济发展产生的影响。还有部分研究则专注于人口集聚所带来的环境效应，即：人口集聚通过影响技术创新、能源消耗等与生态环境息息相关的指标对环境产生影响。因此，接下来将从人口集聚的经济效应与环境效应对人口集聚的经济社会影响展开描述。

通过梳理文献发现，人口集聚的经济效应主要集中于人口集聚对劳动力、产业升级、创业活跃度、科技水平等各具体经济指标的影响以及对经济增长的影响。首先，人口集聚会对劳动力自身产生影响。人口集聚通过扩大劳动力供给规模和提升劳动力人力资本两方面影响劳动力供给。人口集聚会带来集聚地人口规模的增大，提升劳动力的供给规模，推迟大中型城市的人口红利的消失（张同斌，2016）。由于区域面积具有长期稳定性，在人口规模持续增加的同时，人口密度也在增加；人口集聚所带来的人口集聚的规模性、人力资本的外部性与不同特征劳动力的互补性，均有助于集聚地人力资本的提升（陆铭，2016；李成友等，2018）。具体而言，人口集聚对劳动生产率存在显著的正向影响，并间接推动区域经济发展，但对于集聚人口及作用对象的特征不同所产生的影响也不同。其次，在人力资本提升的基础上，推动产业升级、创业活跃度与科技水平。大量研究表明人口集聚能够显著促进产业结构升级，人口集聚程度的不同是不同区域间产业结构的差距的主要原因之一。人口集聚会通过提升人力资本存量、推动偏向性技术进步以及政府的干预效应促进产业结构升级，并间接推动区域经济发展（许庆明等，2015；王玥，2018）。其中，人口集聚还对服务业的发展有着显著的促进作用，人口集聚程度越高，服务业发展越快并且形成一定的产业集聚，推动居民的服务业消费（钟粤俊等，2020）。人口集聚对城市创业活跃度具有显著的正向促进作用，人口集聚通过对劳动力供给的作用直接影响创业活跃度，并通过影响市场需求和基础设施建设间接影响创业活跃度，中介效应显著（于潇和徐英东，2022）。人口

集聚对创新具有显著的正向影响,可以通过沟通外部性显著提高了企业研发概率和增加了企业研发支出(王永进和张国峰,2015;陈淑云和杨建坤,2017)。最后,除了研究对影响经济的各具体指标的研究外,学者们还研究了人口集聚对直观的经济增长情况的影响。梳理已有文献发现,学者们关于对不同时间段、不同区域下人口集聚对经济增长影响的研究主要有两种观点。一种是人口集聚与经济增长呈倒“U”型关系,也就是说人口集聚达到一定程度之后会对经济增长产生负面影响,满足威廉姆森假说(王智勇,2018);另一种则是人口集聚对于区域经济的经济增长具有显著的正向驱动力,人口集聚会利用其规模效应、集聚效应推动人力资本提升、城市建设以及产业结构升级,从而推动区域经济持续增长(陈乐等,2018;杨东亮和任浩峰,2018;杨东亮和李朋骞,2019)。

除了对经济发展产生影响外,人口集聚还与生态环境有着密切关系。一方面,人口集聚会对生产生活所需要的能源利用情况产生影响,从而影响环境。人口集聚对于能源利用的影响主要体现在工业用能、人口居住区的交通用能、建筑用能以及服务用能四个方面,规模效应产生需求加大能源消耗,集聚效应降低生产成本、提升能源利用率降低能源消耗,人口集聚对于能源消耗呈正向影响(肖春燕,2015),但对能源效率具有非线性影响且呈阶段性变化特征(Gudipudi等,2016;Cheng等,2022;田成诗和陈雨,2022)。另一方面,人口集聚会对生产生活所产生的各种类型的废弃物产生影响,从而影响环境。人口集聚对生产生活污染的影响主要取决于集聚环境的整体正负外部效应的综合力量,根据边际收益递减规律,随着集聚水平的提高,环境正外部性会递减,即环境改善效果会减弱;而环境负外部性则会递增,即环境污染程度可能加剧。因此,随着人口集聚水平的提高,人口集聚对生产生活污染呈非线性特征(Otsuka,2018;肖周燕等,2022)。其中,人口集聚会加重集聚地区空气污染,甚至对经济可持续发展具有制约作用,并且由于气体具有扩散性,因此人口集聚对其产生的相关影响具有明显的空间溢出效应。人口集聚与环境污染之间关系的研究结果,主要可以归纳为以下三种:一是人口集聚导致环境污染愈发严重(梁伟等,2017;刘西涛和王盼,2022),二是人口集聚有利于遏制环境污染(Chen等,2020;张华明等,2021),三是人口集聚与环境污染之间存在复杂动态的非线性关系(徐辉和杨焱,2017;崔鑫生等,2019)。

1.3.2 关于碳排放的研究

近年来,气候异常、生态破坏等环境恶化问题引起了人们广泛关注,人们不再一味地追求经济的快速增长,实现经济和社会的可持续发展成为新的目标,全球变暖等环境问题的存在使得碳排放成为全球共同探讨的热点话题。对于碳排放的研究,国内外学者主要使用不同的方法、角度对碳排放的测度、影响因素、碳排放与经济发展间的关系等方面展开分析,结合本文研究需要,本小节将重点梳理碳排放的测度以及影响因素相关文献。

(1) 碳排放的测度

碳排放的测度一直是碳排放研究的重点和难点。二氧化碳作为生产生活主要的排放气体,在超过环境中树木所能吸收缓解的最大值时,会对整个地球环境造成巨大损害,但由于其作为气体的特殊性,只能通过其释放来源进行测度。2006年,联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC 发布《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》,该指南由 250 余名各国专家编撰完成,从能源活动、工业生产过程、农业、林业和土地利用变化、废弃物处置等温室气体排放源对其碳排放量的具体的计算方法进行说明。IPCC 碳排放量的测度方法,自出台以来便被各国学者广泛用于碳排放相关研究。我国学者多在 IPCC 指南基础上,结合 2011 年出台的《中国省级温室气体清单编制指南》计算各个省份碳排放量(邵帅等, 2022; 张卓群等, 2022; 谢云飞, 2022; 张恒硕等, 2022)。除此之外,国外所使用碳排放数据主要来自世界发展指标数据(OZCAN; 2013);国内部分研究则采用投入产出法、生命周期法和空间数据法计算碳排放量。具体而言:拥有详细能源数据的城市,多使用 IPCC 发布的 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版中的公式测算得到(柴志贤, 2013; 陈飞等, 2022);没有详细能源消费数据的城市,则多利用电能、热能、交通工具、建筑物等通过能源消耗所生成的二次消耗品的使用情况反推能源消耗情况,再结合对应的碳排放因子进行计算(吴建新和郭智勇, 2016; 王巧然, 2021; 葛立宇等, 2022; 李云燕和张硕, 2023);还有学者借用遥感数据对碳排放情况进行表征,直接利用夜间灯光数据情况表征各城市的碳排放量,或者将夜间灯光数据与根据能源消费具体值得出的省级碳排放量相结合得到各个城市的碳排放量(项本武和张亚丽, 2017; 杜海波等, 2021)。

(2) 碳排放的影响因素

目前,学者们在研究碳排放影响因素的问题上主要基于 Grossman 和 Krueger (1991) 的理论进行探讨。这一理论提出,经济增长通过规模效应、技术效应和结构效应三个途径对环境质量产生作用(张翠菊和张宗益,2016)。作为重要的环境指标,碳排放的研究也主要从这三个方面出发来探讨其影响。除此之外,部分研究还涉及到了路径依赖效应。对于城市碳排放的影响因素,因其自身特殊性的存在,学者们对城市碳排放的影响因素更加具体化和聚焦。城市碳排放主要来源于工业排放、家庭与商业排放、交通排放,排放来源的不同影响因素也不同。比如:工业排放主要取决于城市的产业结构和技术水平,第二产业的能耗相对高于第一产业与第三产业,故第二产业比重可能影响城市碳排放量,即:产业结构与技术创新水平是影响城市碳排放的主要因素之一(项本武和张亚丽,2017),鉴于以上原因,经济发展水平、投资、进出口贸易等经济因素(任晓松等,2020)以及人口结构、资源禀赋等社会结构(周健等,2015)也会影响城市碳排放。家庭与商业排放主要来源于日常的家庭消费与居民在衣食住行上对服务业的需求,受收入水平和自身教育程度等特征的影响较大,收入高的人群消费需求大,因此对家庭与商业排放的影响显著;而不同特征(性别、年龄、受教育程度等)的人群需求不同,产生的需求结构也有所差异,则对家庭与商业排放的影响也不同。交通排放则主要体现在出行所产生的碳排放,这一方面主要受城市居民、企业等空间分布特征的影响,人口与企业越集聚碳排放越少,反之越多;同时城市实际现有的交通工具数量是交通排放的直接影响因素,从而影响城市碳排放(项本武和张亚丽,2017)。除了上述由于城市碳排放的主要来源引申出来的影响因素外,还有一些为了缓解城市碳排放而存在的因素。许多地方为了保护环境生态,缓解温室效应,加大了植树造林力度与生态区的保护,对于城市而言,多体现在绿化面积的增多,公园数量与路边绿化的改善,从而对经济活动产生的碳排放起到中和缓解作用,因此绿地面积、公园数量等也是影响碳排放的主要因素(项本武和张亚丽,2017)。由于城市碳排放具有路径依赖性,因此碳排放的滞后项也是影响碳排放的主要因素。

1.3.3 关于人口集聚对碳排放的影响研究

从上述关于人口集聚与碳排放的文献梳理中,可以看出人口集聚会对环境污

染产生影响、人口因素是影响碳排放的重要因素之一，人口集聚与碳排放之间存在着密切联系。关于人口集聚对碳排放的影响研究，现有学者们多从城市空间规划、城市承载力、碳排放影响因素等不同角度，利用不同方法对不同区域层面展开分析，并且发现人口集聚对碳排放的影响多具有非线性的阶段性特征，但得到的结果却有所不同。柴志贤（2013）以省会城市为研究对象探讨城市发展与碳排放的关系，发现城市人口密度与人均碳排放呈“U”型关系。张翠菊和张宗益（2016）利用空间计量模型以 30 个省（自治区、直辖市）为样本研究中国各区域人口空间集聚对碳排放强度影响的差异，发现其影响在各区域间具有明显差异。何文举等（2019）也以 30 个省级行政单元为对象研究城市空间规划视角下人口集聚对碳排放的影响，发现人口集聚对碳排放的影响呈正“N”型走势：人口集聚度较低时，随着人口规模增大，建成区城市活动及交通出行量不断增加，对碳排放起到促进作用；超过第一个临界点时，人口集聚效应呈现，有利于资源有效配置和土地集约利用，对碳排放降低起到积极作用；集聚度超过第二个临界点时，拥挤效应明显，促进碳排放增长。李云燕和张硕（2021）在探讨城市碳排放的影响因素时发现人口集聚会引导生产要素集聚，推动产业升级和规模经济发展，抑制碳排放，但随着人口增长乏力其抑制作用会减弱。张华明等（2021）以 2009-2018 年中国 286 个地级市为研究对象，分析人口规模对城市碳排放的影响，发现两者间呈倒“U”型曲线关系，且东、中、西、南、北等区域间存在明显差异。陈飞等（2022）构建多项式函数关系及偏最小二乘法综合回归模型以上海市为例研究人口密度对空间碳绩效的影响，同样得出了正“N”型的非线性特征结果。孙猛和费不凡（2022）同样以 30 个省级行政单元为对象研究人口集聚对碳排放的空间溢出性，发现两者间具有显著空间溢出性，且呈倒“N”型曲线关系：随着人口集聚程度的不断提高，从人口集聚效应显著大于需求增加引致的碳排放规模效应，到拥挤效应变得越发突出而使得负外部性显著大于正外部性，再到技术进步和产业结构升级等集聚正外部性得到充分发挥对人均碳排放产生抑制效应。李健和张嘉怡（2023）利用双重固定效应模型以京津冀 13 个城市为对象探讨人口密集程度对碳排放的影响，发现该地区人口密集度与碳排放呈倒“U”型曲线关系，仅 5 个城市存在适当人口集聚水平对碳排放呈抑制作用。

1.3.4 文献述评

通过对人口集聚、碳排放以及人口集聚与碳排放的相关研究进行梳理,可以发现:关于人口集聚与碳排放的研究体系已经相对成熟。其中,人口集聚的测度方法趋于多样性和科学性;人口集聚通过规模效应与集聚效应对经济社会产生深远影响,其影响主要表现为经济和环境效应,对经济的影响主要具有正向促进与非线性影响两种结果,对环境的影响主要有促进、抑制和非线性影响三种结果。碳排放的测度也是在 IPCC 标准的基础上逐渐趋于多元化,利用更加科学的手段,结合统计年鉴与空间遥感数据,多角度表征碳排放情况;关于碳排放的影响因素研究,主要从碳排放的来源角度进行探析,发现经济、社会与管理等因素会对碳排放产生重要影响。人口集聚对碳排放影响的研究分析,现有学者们多从不同角度利用不同方法从不同区域层面展开,并且发现两者间具有显著非线性影响但其曲线特征不一致。

然而,该领域的相关研究仍存在不足之处:(1)从研究对象看,鉴于数据的可获得性,研究多集中于省级及以上区域;随着数据来源的多元化与科学化,研究重心慢慢转移至城市角度,但仅集中于单个特征城市或部分城市。(2)从研究视角看,人口集聚对城市碳排放的研究相对较少,对不同特征城市的比较研究更加鲜有;对于人口集聚的研究,多集中于人口集聚的经济效应,而较少专注于人口集聚的环境效应;对于碳排放影响因素的研究,多从经济角度展开,较少单独关注人口等社会因素。(3)从研究方法看,对于城市变量的测度、模型的选择多依据便利性原则,较少考虑到城市研究的特殊性。(4)从研究内容看,现有人口集聚与碳排放的研究,多关注于人口集聚对碳排放影响的结果,较少涉及人口集聚对碳排放影响的内在机制。因此,本文在梳理人口集聚与碳排放相关研究的基础上,利用 2006-2021 年中国 254 个地级及以上城市的面板数据,深入探析人口集聚对城市碳排放的影响和传导路径,并探讨不同城市特征的异质性,为城市的人口管理、发展规划、节能减排提供借鉴与参考。

1.4 可能的创新点与不足之处

本文的创新之处主要体现在以下两个方面:

(1) 从研究视角看, 专注于人口集聚的环境效应, 丰富人口集聚效应研究理论。现有研究对于人口集聚的研究, 多集中于人口集聚的经济效应, 从人口集聚直接对经济增长、经济发展到经济高质量发展的影响到对经济发展的各影响因素的影响, 而人口集聚的环境效应则较少。基于此, 本文聚焦于人口集聚对城市碳排放的影响研究, 剖析城市层面人口集聚所产生的环境影响及其作用机制。构建人口集聚对城市碳排放影响的作用机制, 并且将产业结构升级与基础设施建设纳入人口集聚对城市碳排放影响的理论框架, 有助于丰富人口集聚的环境效应研究, 助力城市节能减排。

(2) 从研究内容看, 专注于人口集聚对城市碳排放影响机制与异质性分析。现有人口集聚与碳排放的研究, 多关注于人口集聚对碳排放影响的结果, 较少涉及人口集聚对碳排放影响的内在机制与异质性。故本文以中国 254 个地级及以上城市作为研究对象, 在探析人口集聚对城市碳排放的影响的基础上, 实证检验人口集聚对城市碳排放的两条内在传导路径, 并对全样本城市进行分类, 探析不同特征城市人口集聚对城市碳排放影响的异质性。

本文也存在一定的不足之处, 具体表现在:

(1) 数据完整性可能存在不足。关于城市层面的数据, 存在样本量大、能够寻求的数据来源少、指标测度一致性差、数据处理工作量大等难点, 研究中无法一一排除原始数据中可能存在的记录错误等根源问题; 同时, 鉴于数据的可获得性, 无论是研究年限还是研究对象均存在缺失问题。无论是数据记录的错误, 还是研究时间与样本的不完整, 都会导致研究结果存在误差。

(2) 变量选取可能存在不足。碳排放影响因素众多, 并不是所有因素都能够用指标的形式进行测量, 数据难以获取; 同时, 由于自身理论的局限性, 可能遗漏某些影响因素。无论是无法得到相应数据, 还是无意中遗漏相关变量, 都会影响研究结果的准确性。

2 理论分析与研究假设

2.1 理论基础

2.1.1 人口迁移理论

人口迁移一般指具有“跨越行政界线、永久性改变居住地”特征的人口在空间上的流动，但不包括同一行政区域内暂时性的位置变化。从古典经济学到现代经济学，人口迁移一直是经济理论研究的重要领域之一。早在 1870 年边际革命以前的古典经济学时期，已经出现了与人口迁移相关的理论表述，1776 年，Adam Smith 提出劳动分工在推动生产规模扩大的同时会促使农村人口迁移至城市。除此之外，人口迁移还发生在三大产业之间。配第一克拉克定理曾指出，由于三大产业间的收入存在一定差异，劳动力会向高收入产业转移，并且随着人均国民收入增加，会出现劳动力从农业向工业制造业、再从工业制造业向服务业转移的趋势。Lewis 在 1954 年提出了二元经济模型，与配第一克拉克定理不同的是，更聚焦于发展中国家农业和工业部门间的劳动力转移情况。根据他的假设，如果一个国家的人口远远多于相应的自然资源供给，那么人口增加带来的产量增量极其有限，劳动力的边际生产率则会趋于零甚至是负值，若此时现代工业部门发展迅速且工资水平高于传统农业部门，传统农业部门的剩余劳动力就会流入现代工业部门。新古典主义经济学理论对人口迁移的研究主要从微观和宏观两个层面展开。在微观层面，通常假设个体追求效用最大化，人们为了追求自身资本效用的最大化而向其他区域迁移。在宏观层面，劳动力和资本等生产要素在区域间的配置失衡是导致人们作出迁移决策的主要原因，人们往往流入就业机会更多、工资更高的地区。人口迁移是人口集聚形成的重要原因，无论是人口由乡村迁移至城市，从农业部门迁移至工业部门、服务业部门，还是在不同城市间进行移动，都会影响人口的空间分布，形成人口集聚。

2.1.2 集聚经济理论

集聚经济这一概念最早由 Webber 于 1909 年提出，用于研究工业产业的集

聚机制。后来，该概念通常用于对人口、资本等生产要素以及产业生产活动聚集在一起所产生的经济效应，该效应包括内在和外在两部分，如生产要素集聚带来市场规模的扩大、规模经济效应的产生推动生产成本下降等。集聚经济的存在有助于推动城市的形成与规模的扩大，正是人口与产业在城市的集聚，长期以来，集聚经济才被经济学家所认可。经济地理学家则认为经济集聚效应产生了集聚经济，即：由于要素和功能在空间集聚存在正向的经济社会效益才有集聚经济的产生。新经济地理学相关理论指出，集聚机制会给集聚体带来共享中间投入品、知识溢出和要素匹配等正向效应，推动经济社会发展，因此，空间集聚也是引发城市形成、规模增加和区域发展的基本因素。起初，人口要素在空间上的集聚是依据地理优势优化配置的结果，人口集聚后带来市场供需规模的扩大、规模经济效应的形成，有效提升了劳动生产率，改善了人们的生产生活条件，进一步吸引更多的人口和其他要素、功能的集聚，形成人口集聚的共享、竞争与匹配效应，推动城市快速发展。

2.1.3 环境承载力理论

环境承载力是在承载力的基础上衍生而来的概念，最早可追溯到马尔萨斯的资源有限论，起初研究的焦点局限于生物种群的容纳极限，自 70 年代起广泛应用于环境管理与环境规划中，通常用来反映人类活动与生态环境间的相互作用关系。目前被广泛接受的定义是指在特定时期、状态或条件下，为维持人与自然环境间的协调发展，某地区环境所能够容纳的人类活动的阈值和强度。（Wang 等，2017）。不同条件下的环境承载力有所不同，首先，环境承载力具有一定的客观性，不同区域的地理特征不同并且该特征具有一定客观性，那么该区域的环境结构和功能也是客观存在不易改变的，也就是说，不同区域的环境承载力是有特定的基础阈值；其次，环境承载力具有主观性，环境承载力的测度与评价是主观的，使用的方法和指标不同环境承载力结果不同，其差异主要体现在同一时期和区域的环境承载力的不同上；环境承载力还具有区域性和时间性，区域性除了上述客观性特征导致外，还源于不同区域经济社会发展条件的不同，时间性则体现在变化上，随着时间变化影响环境承载力的因素发生变化导致其结果不同；最后，环境承载力具有动态性和可调控性，会随时间发生动态变化，并且能够通过生产力

的提升和生产方式的改善对环境承载力加以调控,使其朝向对人类有益的方向发展。经济社会的发展必须在环境承载力范围内,这是可持续发展的必然要求,人口在城市的集聚也必须在环境承载力范围内,一旦超过该范围,人口集聚则会发生拥挤效应,产生极大的负外部性;同时,应积极引导影响环境承载力的可变因素向有益方向发展,提高人口集聚承载力,更大程度发挥人口集聚正外部性。

2.1.4 低碳经济理论

低碳经济是指在可持续发展理念的指导下,通过技术和制度创新、产业转型、新能源开发等多种手段,提高能源利用率,改善能源结构,减少高碳能源消耗,从而减少温室气体排放,改善空气质量,实现经济发展与环境保护的双赢。这一概念最早出现在 2003 年的英国能源白皮书《我们能源的未来:创建低碳经济》,并在 2006 年的《斯特恩报告》中得到进一步阐述,被定义为一种由低碳产业与技术驱动的新经济形态,将为人类带来生活生产方式和思想价值上的颠覆性变革,这也是低碳经济的本质特征。作为一种新型经济形态,低碳经济能够在推动经济社会发展的同时,节能减排,减少能源污染,实现碳排放与经济脱钩。除此之外,低碳经济还具有创新性、全局性、全球性等特征,创新性体现在低碳经济以技术发展及其引发的再次革新作为经济发展的动力,如何提高效率是发展的重点;全局性体现在低碳经济的运作包括经济社会发展的各个环节,离不开个人、企业、政府每一个主体的努力;全球性体现在低碳经济需要所有国家齐心协力共同合作实现,地球是所有人的家园。低碳经济理念符合现阶段中国发展的现实要求,为国家长期发展提供了方向和理论依据,为“双碳”目标的实现提供了行动指南,寻求实现低碳经济发展的有效路径至关重要。

2.2 人口集聚对城市碳排放影响的作用机制及研究假设

2.2.1 人口集聚与城市碳排放

人口集聚是指人口从分布分散的广域空间向相对集中的紧凑空间聚敛的过程,既是一个动态发展概念又是一个过程,涉及到诸多领域在时间和空间双重维度驱动下不断变化,对城市碳排放的影响具备一定复杂性。

首先,人口集聚会带来规模效应,对城市碳排放产生双重影响。一方面,人口规模的增加,带来消费侧需求的增加,其中,商品需求增加会使得工业部门的碳排放增加,交通需求增加导致工业部门的碳排放增加的同时汽车尾气增加,住房需求的增加使得建筑用能增加(金瑞庭和王桂新,2013);同时,供给侧劳动力增加,推动经济发展,加剧城市碳排放。另一方面,带来人口结构多样化,消费侧需求多样化,加大服务业比重,有利于促进产业结构升级,推动节能减排;人口集聚地区一般存在高收入、高福利,高素质人才也会相应增多,对环境问题比较重视,环境政策落实比较容易,有利于碳排放的减少(彭希哲和朱勤,2010)。

其次,人口集聚会带来集聚效应,对城市碳排放产生双重影响。一方面,人口密度的增加,带来经济学上的规模经济效应,人口不断向城市集聚,降低了生产生活成本,大大减少交通、住宅、工业等排放的碳排放(田成诗和陈雨,2022);同时,还会产生强大的正外部性,人口集聚在小区域内,会产生学习溢出效应、竞争效应与匹配效应,有利于提高技术创新能力,改善能源利用率,甚至还能改善人们的日常生活方式和习惯,降低生活能源消耗,从而降低碳排放(陈淑云和杨建坤,2017)。另一方面,人口密度增加到一定程度,还会带来负外部性,造成拥挤效应,城市管理成本上升,规模经济达到瓶颈,从而增加碳排放(王兴杰等,2015;孙猛和费不凡,2022)。

最后,由于城市碳排放还存在区域本身的“路径依赖效应”。受自身的资源禀赋、产业结构与生活习俗影响,一个地区的发展路径植根于过去的一系列经济、社会和文化因素,具有惯性和锁定性,因此,现阶段碳排放量的多少也会受到之前碳排放量的显著影响。再结合上述人口集聚的规模效应与集聚效应对碳排放的影响,可以明显得出人口集聚对于碳排放的影响是非线性的且具有阶段性特征。

具体而言,借鉴学者们的研究经验将人口集聚对城市碳排放的影响的阶段性过程划分为3个阶段—初始发展阶段、快速发展阶段、成熟发展阶段(何文举等,2019;陈飞等,2022)。初始发展阶段,此时一般为城市建设初期阶段,城市建设刚具雏形,人口增长速度慢于建成区面积增长速度,人口集聚度较低,建成区城市活动及交通出行量不断增加,人口集聚的规模效应所带来的负外部性显著,碳排放随着集聚程度的提高而增加。快速发展阶段,人口集聚的规模效应和集聚效应的正外部性呈现,有利于资源有效配置和土地集约利用,对碳排放降低起到

积极作用。成熟发展阶段，此时由于城市发展建设宏观调控困难或缺乏宏观调控意识，人口增长速度快于建成区面积增长速度，人口集聚所产生的集聚效应的负外部性（拥挤效应）愈发突出，触碰到了城市环境承载力的压力线，甚至出现人口集聚的负外部性大于正外部性，碳排放增加；但此时主要取决于市场和政府的管控，城市自身存在自我调节或者通过政府进行调节，城市规模达到一定高度后会外溢，从而实现平衡（王俊和李佐军，2014）。城市规模扩大导致的承载压力、环境问题、社会矛盾实际上是在基础设施、公共服务、区域治理等方面政府供给与经济发展之间的不协调（陆铭，2017），随着城市基础设施的完善、社会制度及配套措施的建立健全，城市最终将在集聚—扩散效应下趋于平衡（王桂新，2021），因此，成熟发展阶段，人口集聚对城市碳排放的影响具有动态性，与城市建设规划息息相关。结合我国各城市发展的实际情况，研究阶段内我国各城市已度过城市建设初期阶段，主要处于城市化快速发展阶段与新型城镇化建设阶段，此时人口集聚对城市碳排放的影响可能主要发生在快速发展阶段和成熟发展阶段，具有“U”型的非线性特征。

基于以上分析，提出如下假设：

假设 1：人口集聚对城市碳排放的影响具有“U”型的非线性特征。

2.2.2 人口集聚、产业结构升级与城市碳排放

产业结构升级的主要内涵是指产业结构不断从低级形态向高级形转变的过程或趋势，主要表现为产业结构规模变大、水平变高、联系变紧。产业结构规模变大，意味着参与市场活动的产业数量变多、产业市场规模变大，社会分工更专业化；产业结构水平变高，意味着由劳动密集型产业转变为技术密集型产业，设备更先进、劳动者素质更高、管理水平得到有效改善，劳动生产率提高；产业结构变紧，意味着产业间各方面联系更加密切，交流更多（姜泽华和白艳，2006）。

人口集聚会通过影响产业结构升级的社会需求、科技进步、制度安排和资源供给等因素，提升产业结构规模、水平以及产业间的联系，促进产业结构升级。首先，社会需求是产业结构升级的市场导向，人口集聚带来的人口规模增加会直接扩大生存资料的需求，满足自身及其家人吃、穿、用、住、行等方面的需求；人口集聚带来的集聚效应中产生的学习、竞争、知识溢出效应，会扩大个人发展

资料的需求,满足劳动者全面发展体力和智力,提升个人技术水平所需要的需求;所带来的人口结构多样化及经济增长,会导致需求结构多样化,扩大享受资料的需求,满足劳动者社会需要之外的享受需求,同时收入水平的提高,个人消费需求结构趋向多层次和多样化,多层次的消费结构将会带动多层次的产业结构的递进升级(姜泽华和白艳,2006)。其次,人口集聚往往会带来资本等其他要素的集聚和流动,影响社会投资和资源供给,促进产业间生产要素的自由流动,提高产品转化速度(吴振华,2020);产业部门的运作离不开劳动力的供给,劳动力供给的增加以及传统农业部门剩余劳动力的转出能够有效推动现代产业部门的快速发展的扩张(李晓阳等,2020)。再者,科技进步是产业结构升级的直接动力,人口集聚产生的学习、竞争、知识溢出效应,有助于人力资本的积累和促进区域创新,推动科技进步,促进产业结构升级(于潇和王琪汇,2021);最后,人口规模的增加与人口密度的提高,会提升政府关注度,对该区域整体规划和政策倾斜力度也会有所变化,通过政府干预促进产业结构升级(王玥,2018)。

产业结构的优化升级对提高碳排放效率、抑制人均碳排放量起到正向作用。首先,产业结构升级意味着产业结构规模变大,社会分工更加专业化,有助于推动技术进步,提高能源利用率,抑制碳排放(万伦来和左悦,2020)。其次,产业结构升级意味着产业结构水平变高,生产要素从高消耗、低效率的生产部门转入低消耗、高效率的先进制造业和现代服务业等部门,生产要素在不同部门间的流动和重组促使产业结构更加合理化、清洁化(葛立宇等,2022),有助于改善能源消费结构和提高碳排放效率。最后,产业结构升级意味着产业结构联系变紧,有助于促进生产要素在不同产业间的合理流动,进而优化资源配置效率。这种优化将导致要素生产率提高和企业向绿色转型,抑制碳排放(金贵朝等,2023)。

因此,人口集聚可以通过促进产业结构优化升级,对提高碳排放效率、抑制人均碳排放量起到正向作用。基于以上分析,提出如下假设:

假设 2: 人口集聚对城市碳排放的影响存在“人口集聚—产业结构升级—城市碳排放”的传导路径。

2.2.3 人口集聚、基础设施建设与城市碳排放

基础设施是指为社会生产和居民生活提供公共服务的物质工程设施,是用于

保证国家或地区社会经济活动正常进行的公共服务系统。一个国家或地区的基础设施是否完善，是其经济是否可以长期持续稳定发展的重要基础。

人口集聚会通过规模效应、外部效应作用于基础设施建设，带动基础设施建设发展。人口集聚的规模效应会提高城市内部的基础设施建设水平（曹琳剑等，2019）。人口集聚程度上升，为提高城市内人口流动和沟通的效率，政府须积极开发城市内的交通基础设施（任喜萍和殷仲义，2019）；为保障流入人口的基本需求和利益，政府须提高公共服务质量；同时，人口集聚的规模效应要求政府在新基建布局时向人口集聚度高的城市倾斜，从而最大化新型信息基础设施的辐射作用（赵涛等，2020）。此外，人口集聚的外部效应使得政府积极改善城市对外的交通和信息通达性，完善的基础设施是人口集聚正外部性得以发挥的重要保障。

基础设施建设会在生产建设与使用两个阶段对碳排放产生双重影响。一方面，基础设施建设阶段会产生大量能源消耗，基础设施水平的提高会增加区域可达性，区域间贸易增加、交通往来增加，从而增加整体碳排放量，对碳排放产生促进作用（何文举等，2019）。另一方面，基础设施建设有利于居民、企业的共享，形成规模经济，降低生产生活成本，改变生产生活方式，抑制碳排放增长；同时，基础设施水平能够优化区域内资源流通与配置，增强企业间的紧密联系、人员交流和贸易往来，促进知识和技术的传播，优化产业结构、促进区域创新，抑制碳排放增长（Xie 等，2017；陈东景和刘卫毅，2023）。

因此，人口集聚可以通过完善基础设施建设，对城市碳排放产生影响。基于以上分析，提出如下假设：

假设 3：人口集聚对城市碳排放的影响存在“人口集聚—基础设施建设—城市碳排放”的传导路径。

3 人口集聚与城市碳排放的测度及现状分析

3.1 人口集聚的测度及现状分析

3.1.1 人口集聚的测度

考虑到数据的可获得性与具体应用情况，并且为了保证分析的稳健性，本文分别使用人口密度与人口地理集中度来表征人口集聚程度。其中，人口密度采用常住人口数量与区域面积的比值进行度量；常住人口利用市辖区的地区生产总值与人均生产总值的比值获得，从而消除年鉴记载中常住人口指标的差异性；利用建成区面积代替常用的行政区域面积作为区域面积，建成区面积表示成片建筑物的面积，比起可获得的行政区域面积、城市建设用地面积等指标更能表征人口集聚地区的面积，结合本文实际情况可进一步减少研究的误差。人口地理集中度表征人口集聚的具体形式为：常住人口数量占总研究区域的常住人口数量的比重与区域面积占总研究区域面积的比重之比，其中，常住人口数量与区域面积的测度同样采用市辖区的地区生产总值与人均生产总值的比值和建成区面积表示。具体测算公式如下：

$$PA_{i,t} = \frac{pop_{i,t}/\sum_{i=1}^n pop_{i,t}}{S_{i,t}/\sum_{i=1}^n S_{i,t}} \quad (3-1)$$

其中， $PA_{i,t}$ 表示 i 地区 t 年的人口地理集中度， $S_{i,t}$ 、 $pop_{i,t}$ 表示 i 地区 t 年的市辖区常住人口、建成区面积。人口地理集中度与人口密度相比更能表现出区域间的相对集聚程度，因此，本文实证部分主要利用人口地理集中度表示人口集聚程度，人口密度则用于稳健性检验分析。

3.1.2 人口集聚的现状分析

(1) 时序变化

为探究 2006-2021 年 254 个地级及以上城市的人口集聚时间变化情况，参考刘睿文等（2010）提出的人口集聚分类标准，将全样本城市按人口集聚程度划分为人口密集地区、人口均值地区、人口稀疏地区 3 大类，并进一步划分为：人口

高度、中度、低度密集区，人口密度均上、均下区，人口相对、绝对、极端稀疏区。但由于本文研究对象为城市的人口集聚程度，利用建成区面积测算，与文献测度方法不同，故对具体的划分数值标准加以修改，得到人口集聚程度的数量分布表（表 3.1）。

整体来看，研究期内，样本内城市大多处于人口中低度密集区以及均值区，位于人口高度密集区与人口极端稀疏区的城市数量较少，并且随时间变化城市人口集聚程度逐渐趋于中低度密集地区以及均值地区，处于一个良好的发展状态。具体来看，2006-2021 年，人口高度密集区分布在安徽、四川、广东和云南四省，其城市数量在前期与后期变化均较为稳定，但在 2013-2014 年期间有所减少；其中，城市核心区分布在四川和广东两地，其变化趋势与人口高度密集区基本一致。人口中度密集区广泛分布于我国 22 个省市自治区，广东、四川、安徽、河南、上海等地为其主要分布区域，其所含的城市数量随着时间推移呈波动式下降状态，由 2006 年的 41 个下降的 2021 年的 16 个，变化幅度较大。人口低度密集区广泛分布于我国 16 个省市自治区，四川、广东、湖南、重庆等地为其主要分布区域，其所含的城市数量呈先增加后减少的变化趋势，转折点在 2015 年，并且数量维持在 65-91 个区间范围内，除 2012、2019 年外均高于其他区域类别城市数量，即：我国多数城市均位于人口低度密集区。人口密度均上区广泛分布于我国 27 个省市自治区，浙江、河南以及天津、北京等地为其主要分布区域，其所含的城市数量随时间变化呈波动增长趋势，由 2006 年的 61 个城市增长为 2021 年的 78 个城市，是拥有城市数量第二多的地区。人口密度均下区广泛分布于我国 24 个省市自治区，辽宁、河南、安徽、山东为其主要分布区域，其所含的城市数量呈波动式变化，但均在 42-59 个范围内变化，比较稳定。人口相对稀疏区广泛分布于我国 21 个省市自治区，安徽、江西、黑龙江、辽宁、湖北为其主要分布区域，其所含城市数量呈波动减少趋势，由 2006 年的 17 个城市减少为 2021 年的 9 个城市；人口绝对稀疏地区主要分布在江西、甘肃、黑龙江、内蒙古等地，其所含城市数量维持在 6-12 个范围内，并呈波动变化状态；人口极端稀疏地区主要分布在黑龙江、宁夏、甘肃、内蒙古等地，其所含城市数量维持在 2-7 个范围内；其中，基本无人区主要分布在内蒙古自治区的鄂尔多斯市和甘肃省的嘉峪关市等地，其所含城市数量维持在 0-2 个范围内，是拥有城市数量最少的地区。

表 3.1 2006-2021 年 254 个地级及以上城市不同人口集聚程度数量分布表

人口集聚程度地区分类		人口集聚程度	2006	2007	2008	2009	2010	
人口密集地区	人口高度密集区	≥ 3	6	4	5	4	4	
	其中：城市核心区	≥ 4	2	2	3	3	3	
	人口中度密集区	1.5~3	41	43	42	41	33	
	人口低度密集区	1~1.5	65	68	67	66	74	
人口均值地区	人口密度均上区	0.8~1	61	54	57	62	60	
	人口密度均下区	0.6~0.8	56	57	54	52	56	
人口稀疏地区	人口相对稀疏区	0.5~0.6	17	13	15	15	13	
	人口绝对稀疏区	0.4~0.5	6	9	8	7	9	
	人口极端稀疏区	≤ 0.4	2	6	6	7	5	
	其中：基本无人区	≤ 0.3	0	2	1	2	1	
人口集聚程度地区分类		人口集聚程度	2011	2012	2013	2014	2015	
人口密集地区	人口高度密集区	≥ 3	5	5	3	2	2	
	其中：城市核心区	≥ 4	3	1	1	1	1	
	人口中度密集区	1.5~3	25	44	19	19	22	
	人口低度密集区	1~1.5	79	87	90	91	82	
人口均值地区	人口密度均上区	0.8~1	65	49	59	60	66	
	人口密度均下区	0.6~0.8	51	46	54	59	58	
人口稀疏地区	人口相对稀疏区	0.5~0.6	16	12	10	9	11	
	人口绝对稀疏区	0.4~0.5	9	8	12	7	7	
	人口极端稀疏区	≤ 0.4	4	3	7	7	6	
	其中：基本无人区	≤ 0.3	0	2	2	1	2	
人口集聚程度地区分类		人口集聚程度	2016	2017	2018	2019	2020	2021
人口密集地区	人口高度密集区	≥ 3	4	2	2	2	2	4
	其中：城市核心区	≥ 4	3	1	1	1	2	3
	人口中度密集区	1.5~3	33	22	25	22	16	33
	人口低度密集区	1~1.5	74	82	74	81	81	74
人口均值地区	人口密度均上区	0.8~1	60	73	81	68	78	60
	人口密度均下区	0.6~0.8	56	54	48	59	56	56
人口稀疏地区	人口相对稀疏区	0.5~0.6	13	11	12	12	9	13
	人口绝对稀疏区	0.4~0.5	9	7	7	7	8	9
	人口极端稀疏区	≤ 0.4	5	3	5	3	4	5
	其中：基本无人区	≤ 0.3	1	0	2	1	1	1

(2) 区域差异

为探究 2006-2021 年我国 254 个地级及以上城市人口集聚的区域差异情况，

依据国家统计局对区域的划分,将全样本城市划分为东、中、西、东北四大区域,并计算人口集聚的泰尔指数。泰尔指数是利用信息理论中熵的概念计算区域差异的一种方法,可分别测算区域差异、区域内差异、区域间差异及后两种差异对区域差异贡献的结果。测算方法如下:

$$T_c = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{n_i} \left[\frac{C_{ij}}{C} \times \ln \left(\frac{\frac{C_{ij}}{C}}{\frac{GDP_{ij}}{GDP}} \right) \right] \quad (3-2)$$

$$T_{br} = \sum_{i=1}^7 \left[\frac{C_i}{C} \times \ln \left(\frac{\frac{C_i}{C}}{\frac{GDP_i}{GDP}} \right) \right] \quad (3-3)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^{n_i} \left[\frac{C_{ij}}{C_i} \times \ln \left(\frac{\frac{C_{ij}}{C_i}}{\frac{GDP_{ij}}{GDP_i}} \right) \right] \quad (3-4)$$

$$T_{wr} = \sum_{i=1}^7 \frac{C_i}{C} \sum_{j=1}^{n_i} \left[\frac{C_{ij}}{C_i} \times \ln \left(\frac{\frac{C_{ij}}{C_i}}{\frac{GDP_{ij}}{GDP_i}} \right) \right] \quad (3-5)$$

其中, GDP 表示研究区域总的地区生产总值, C 表示需要计算区域差异的变量, GDP_i 表示第 i 个区域的地区生产总值, GDP_{ij} 表示第 i 个区域中第 j 个城市的地区生产总值; T_c 表示变量的总区域差异, T_{br} 表示变量的区域与区域间差异, T_{wr} 表示变量的区域内部差异, T_i 表示变量的第 i 个区域内城市间的差异。

从 254 个地级及以上城市人口集聚的总区域差异来看(表 3.2),研究期内,人口集聚的泰尔指数呈波动式下降状态,从 2006 年的 1.012 降至 2021 年的 0.761,即:人口集聚的总区域差异整体呈缩小趋势。具体而言,人口集聚的泰尔指数在 2006-2012 年间处于下降趋势,由 2006 年的 1.012 降至 2012 年的 0.854,2013 年突增至 1.027,此时人口集聚的总区域差异最大,随后一直处于下降状态。

从四大区域的区域间差异与区域内差异来看(表 3.2),2006-2021 年间,区域间差异贡献占比呈波动式下降趋势,波动范围在 13.87%-21.50%;区域内差异贡献占比呈波动式增长趋势,波动范围在 78.50%-86.13%。比较两类区域差异,可以看出,人口集聚的总区域差异主要源于四大区域内城市间的差异,而四大区域间的人口集聚区域差异则很小,也就是说,现阶段人口流动主要出现在四大区域内部,多属于短距离流动。

表 3.2 2006-2021 年 254 个地级及以上城市人口集聚的泰尔指数

年份	人口集聚		
	区域差异	区域内贡献	区域间贡献
2006	1.012	80.11%	19.89%
2007	1.008	78.50%	21.50%
2008	1.011	79.56%	20.44%
2009	0.961	81.53%	18.47%
2010	0.929	81.67%	18.33%
2011	0.888	83.63%	16.37%
2012	0.854	83.23%	16.77%
2013	1.027	84.04%	15.96%
2014	0.845	85.94%	14.06%
2015	0.822	85.48%	14.52%
2016	0.816	86.13%	13.87%
2017	0.805	85.05%	14.95%
2018	0.802	85.53%	14.47%
2019	0.798	84.47%	15.53%
2020	0.776	84.68%	15.32%
2021	0.761	84.91%	15.09%

从四大区域内各城市间的人口集聚区域差异来看（图 3.1），2006-2021 年四大区域人口集聚的泰尔指数均呈波动式下降趋势，各城市间的人口集聚差异在缩小，其中，东部、西部和东北地区内部的区域差异相对较大，而中部地区内部的区域差异则相对较小。这可能是因为各城市间收入的差异、公共福利的保障、地理位置和环境的适宜度等是人口流动或迁移的重要原因，而中部地区各城市无论是从地理位置还是从经济发展来看均处于相对均衡的状态，虽然有个别省份城市发展较好，但在全国范围内仍处于比较落后的状态，人口流动相对较少，因此相较于其他三个地区，中部地区人口集聚的区域差异相对较小。具体来看，研究期内，东部地区人口集聚的泰尔指数从 0.937 下降至 0.744，中部地区从 0.557 下降至 0.485，西部地区从 0.881 下降至 0.700，东北地区从 0.896 下降至 0.598；相比较而言，东北和东部地区下降幅度较大，中部地区下降幅度最小；其中，2021 年，四大区域人口集聚的泰尔指数从大到小依次为东部、西部、东北、中部地区。

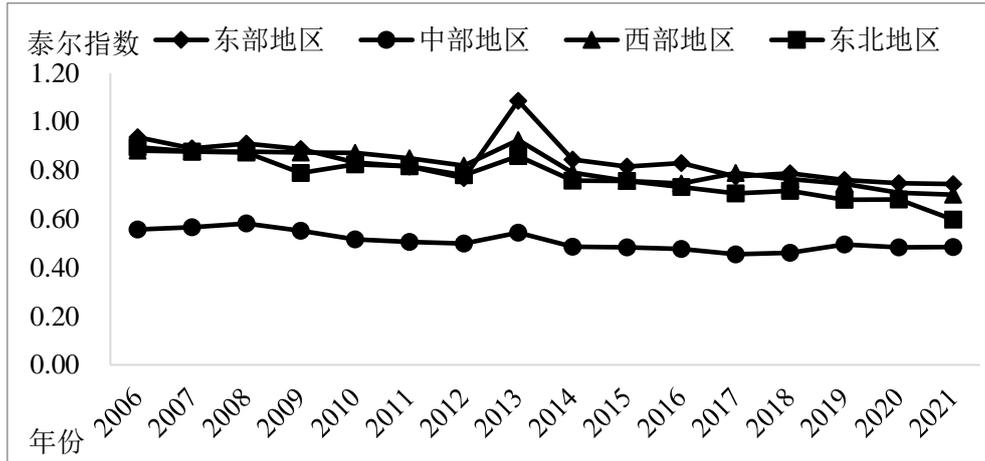


图 3.1 2006-2021 年四大区域人口集聚的泰尔指数变化情况

(3) 空间关联

为探究 2006-2021 年我国 254 个地级及以上城市人口集聚的空间关联情况，运用空间自相关模型，选择 Stata14.2 软件测算人口集聚的莫兰指数。莫兰指数可分为全局莫兰指数与局部莫兰指数，全局莫兰指数可用来判断某个变量是否存在明显的空间自相关性，局部莫兰指数则能够在确定存在空间自相关性的前提下进一步分析具体的相关情况。

全局莫兰指数测算结果见表 3.3，结果显示：全局莫兰指数均大于 0，且均通过显著性检验，并呈现波动上升趋势，由 2006 年的 0.052 上升至 2021 年的 0.072。表明人口集聚具有显著的空间关联效应，并且关联性不断增加，我国各区域间人口流动频繁。

表 3.3 2006-2021 年中国 254 个地级及以上城市人口集聚的全局莫兰指数

Year	2006	2007	2008	2009	2010	
Moran's I	0.052***	0.049***	0.049***	0.045***	0.053***	
Year	2011	2012	2013	2014	2015	
Moran's I	0.052***	0.042***	0.033***	0.063***	0.057***	
Year	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Moran's I	0.075***	0.071***	0.075***	0.052***	0.078***	0.072***

注：***、**、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验。

为识别人口集聚空间关联的具体情况，绘制 2006 年、2011 年、2016 年、

2021 年人口集聚的局部莫兰散点图（图 3.2），并将散点图平面区域划分为高高聚集区（第一象限）、高低聚集区（第二象限）、低低聚集区（第三象限）、低高聚集区（第四象限）4 个区域。结果显示：各城市散点主要分布在第一象限和第三象限，并且随时间变化第一象限和第三象限散点逐渐增多，但逐渐趋于原点。表明人口集聚的聚集效应主要发生在高高聚集区与低低聚集区，且我国人口集聚在地理空间上的局部空间聚集特征不断加强，但其显著性在逐渐降低。

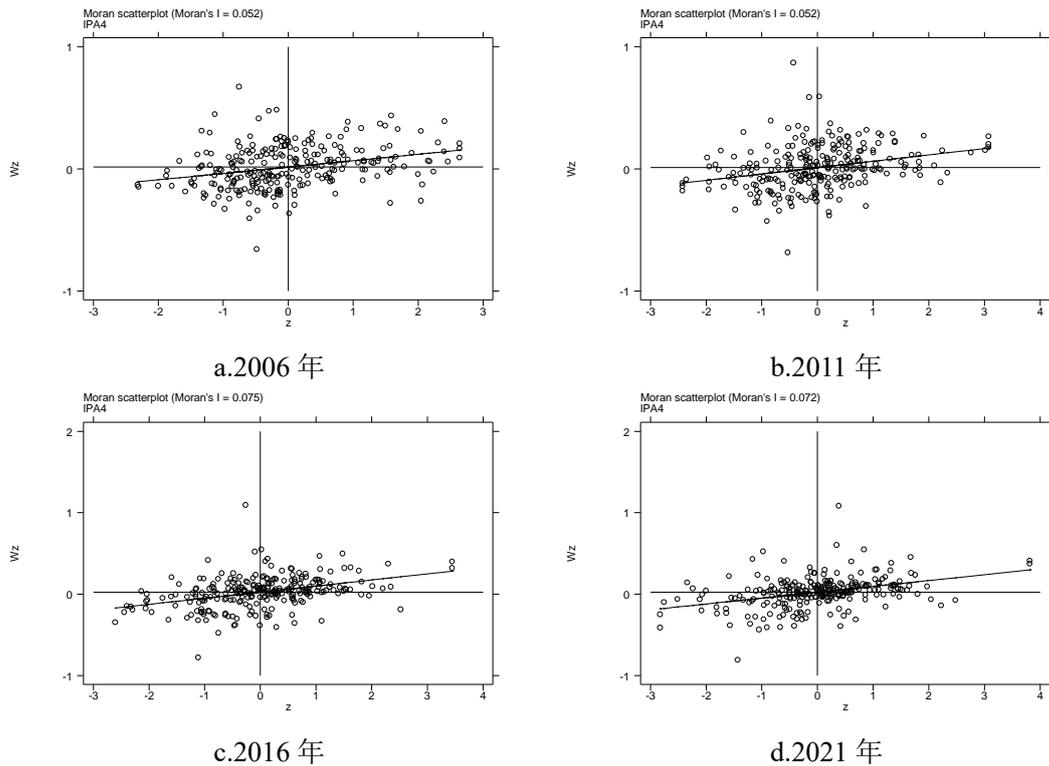


图 3.2 2006、2011、2016、2021 年中国 254 个地级及以上城市人口集聚的局部莫兰散点图

3.2 城市碳排放的测度及现状分析

3.2.1 城市碳排放的测度

对于城市碳排放的测度，本文借鉴吴建新和郭志勇(2016)的做法，使用 IPCC 发布的《2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》中的公式，结合直接能源消耗与间接能源消耗所产生的碳排放计算所得。首先，把城市碳排放的测算按照消耗来源主要划分为市辖区内液化石油气消耗所产生的碳排放、人工或天然气消

耗所产生的碳排放、电力使用消耗所产生的碳排放、热力生产的原煤消耗所产生的碳排放四大类。其次，分别计算四种来源下所产生的城市碳排放。最后，求和得到一个城市总的碳排放量。计算方法如下：

$$CE_1 = \frac{44}{12} \times AD_1 \times NCV_1 \times EF_1 \times O_1 \quad (3-6)$$

$$CE_2 = \frac{44}{12} \times AD_2 \times NCV_2 \times EF_2 \times O_2 \quad (3-7)$$

$$CE_3 = AD_3 \times PCF_i \quad (3-8)$$

$$CE_4 = \frac{AD_4}{CIB} \times \frac{44}{12} \times EF_4 \times O_4 \quad (3-9)$$

$$CE = CE_1 + CE_2 + CE_3 + CE_4 \quad (3-10)$$

其中， CE_1 — CE_4 不同碳排放来源所产生的碳排放量， AD_1 — AD_4 分别为市辖区液化石油气、天然气、电力、热力消耗量，液化石油气、天然气、电力消耗量源于《中国城市统计年鉴》，热力消耗量源于《中国城市建设统计年鉴》， NCV_1 、 NCV_2 分别指液化石油气、天然气的平均低位热值， EF_1 、 EF_2 、 EF_4 分别指液化石油气、天然气、原煤的单位热值含碳量， O_1 、 O_2 、 O_4 分别指液化石油气、天然气、原煤的碳氧化率，平均低位热值、单位热值含碳量、碳氧化率的具体值源于《中国能源统计折标准煤参考系数》、《省级温室气体清单编制指南》， PCF_i 指不同区域电网的碳排放因子，主要源于《中国区域电网基准线排放因子结果》， CIB 指燃煤工业锅炉热效率（取 70%）。

在对各城市碳排放量计算之后，多数学者仍会根据具体研究情况对其测度结果进行改进。人均碳排放量是指平均每个人所消耗的碳排放量，相较于直接利用碳排放总量进行研究，具有一定的客观性，人口规模增大必然会导致碳排放总量增大，但并不意味人口空间分布变化导致的部分地区人口增多会导致整体碳排放量的增大，因此，人均碳排放具有相对性的特征，使用较为广泛。本文基于数据的可获得性与研究的具体情形，使用人均碳排放量作为城市碳排放的具体表征。

3.2.2 城市碳排放的现状分析

(1) 时序变化

为探究 2006-2021 年 254 个地级及以上城市的人均碳排放时间变化情况，分别计算 2006-2021 年全样本城市、东部、中部、西部及东北地区的人均碳排放，并分区域、分来源进行比较分析，具体结果见图 3.3、图 3.4。

从全样本城市来看(图 3.3)，研究期内，人均碳排放整体呈增长趋势，从 2006 年的 52234.89 吨/万人增长至 2021 年的 64265.03 吨/万人。具体来看，2006-2016 年间，除 2013 年突增外，其余年份均呈平稳增长的趋势；2016-2019 年人均碳排放处于快速增长期，增长速度相较 2006-2016 年有所增加；受疫情影响，生产生活能源消耗大大减少，2020、2021 年人均碳排放相较于 2019 年快速下降，稳定在 64400 吨/万人左右。

从四大区域来看(图 3.3)，2006-2021 年东部、中部、西部地区人均碳排放变化趋势与全样本城市的人均碳排放变化趋势基本一致，整体上均有所增长，2006-2016 年其余时间均处于稳步增长阶段，2016-2019 年处于快速增长阶段，受疫情影响，疫情爆发后突降，2020、2021 年处于基本不变状态；但不同的是，东部地区 2013 年突增，也是造成全样本城市 2013 年人均碳排放突增的主要原因；东北地区人均碳排放的变化幅度则相对较小，但是其稳步增长阶段、快速增长阶段以及受疫情影响所带来的变化与其他区域是一致的。相比较而言，东北地区因自身地理位置与产业结构因素，人均碳排放稳居第一位，且高于全样本城市的人均碳排放；虽然东部地区生产生活活动相较于东北地区活跃，但是其生产产业多以轻工业、制造业、服务业为主，科技发展水平也相对较高，因此，东部地区人均碳排放低于东北地区，处于第二位；中部与西部地区的人均碳排放较为相近，均低于另两个区域。

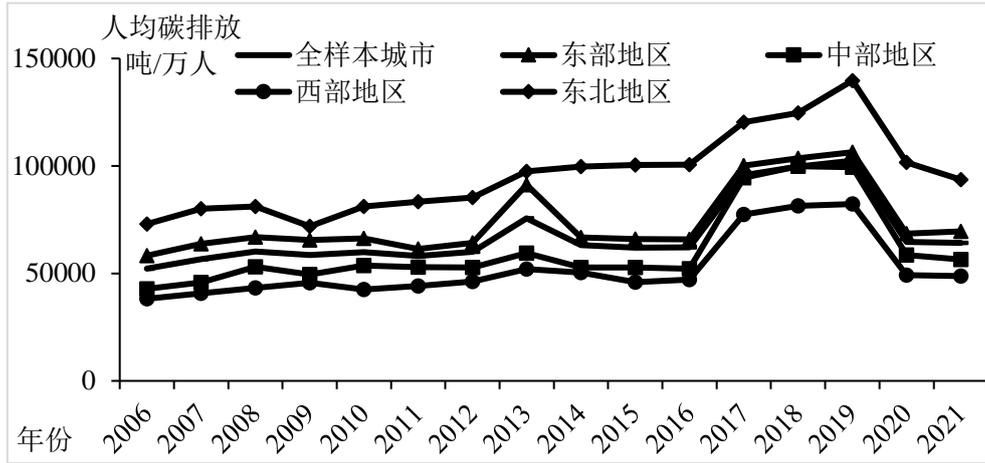


图 3.3 2006-2021 年分区域城市碳排放变化情况

从城市碳排放测度的四个来源来看（图 3.4），电力使用所产生的人均碳排放是最多的，且远远高于其他三个方面，结合图 3.3 和图 3.4 可以发现，各区域人均碳排放的变化趋势与电力使用产生的人均碳排放的变化趋势相一致，主要原因可能是城市建设的生产生活各个方面都需要使用电，电力是能源消耗、产生碳排放的主要来源。其中，2016-2018 年第二和第三产业全社会用电量增加幅度相对较大，因此，电力碳排放增长幅度相对较大；2019 年之后受疫情影响，生产娱乐活动大大减少，电力碳排放大幅下降。热力生产所产生的人均碳排放居于第二位，整体处于波动增长的状态，从 2006 年的 6324.3 吨/万人增长至 7296.46 吨/万人，并且其值并未受到疫情的影响；消耗人工或天然气所产生的人均碳排放居于第三位，整体也处于波动增长的状态，从 2006 年的 4294.3 吨/万人增长至 2021 年的 5188.3 吨/万人；消耗液化石油气所产生的人均碳排放最少，且远远低于其他三方面，整体处于稳步下降的状态，由 2006 年的 811.01 吨/万人下降至 2021 年的 440.66 吨/万人。

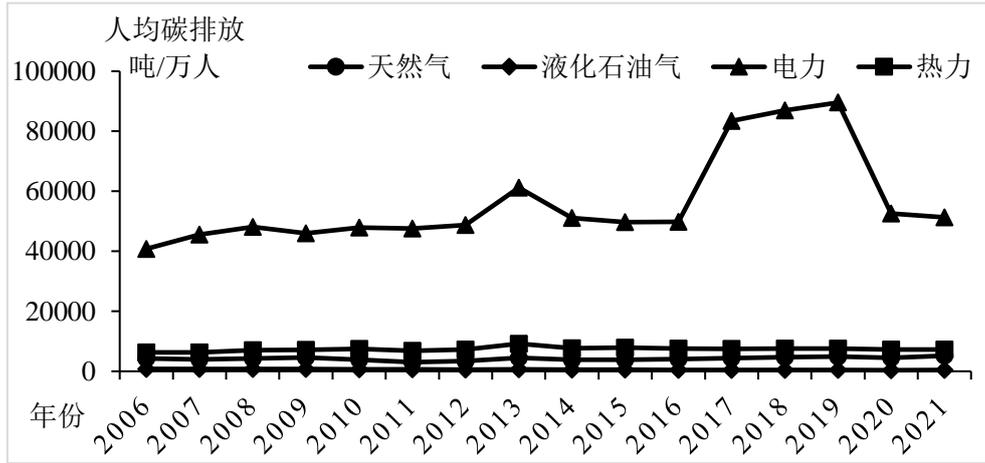


图 3.4 2006-2021 年分来源城市碳排放变化情况

(2) 区域差异

为探究 2006-2021 年我国 254 个地级及以上城市人均碳排放的区域差异情况，将全样本城市划分为东、中、西、东北四大区域，并计算人均碳排放的泰尔指数。具体结果见表 3.4、图 3.5。

从 254 个地级及以上城市人均碳排放的总区域差异来看（表 3.4），研究期内，人均碳排放的泰尔指数呈波动式增长状态，从 2006 年的 0.766 增长至 2021 年的 1.072，即：人均碳排放量的总区域差异整体呈扩大趋势。具体而言，人均碳排放的泰尔指数在 2006-2014 年间处于上升趋势，由 2006 年的 0.766 增长至 2014 年的 1.091，2015 年突降至 0.714，此时人均碳排放的总区域差异最小，2017 年至 2021 年在 1.050 附近稳定波动。

从四大区域的区域间差异与区域内差异来看（表 3.4），2006-2021 年间，区域间差异贡献占比呈波动式下降趋势，波动范围在 12.00%-20.73%；区域内差异贡献占比呈波动式增长趋势，波动范围在 79.27%-88.00%。比较两类区域差异，可以看出，人均碳排放的总区域差异主要源于四大区域内城市间的差异，而四大区域之间的差异则很小。

表 3.4 2006-2021 年 254 个地级及以上城市人均碳排放的泰尔指数

年份	人均碳排放		
	区域差异	区域内贡献	区域间贡献
2006	0.766	79.27%	20.73%
2007	0.798	79.32%	20.68%
2008	0.819	79.47%	20.53%
2009	0.977	80.61%	19.39%
2010	0.822	80.87%	19.13%
2011	0.882	80.82%	19.18%
2012	0.994	81.74%	18.26%
2013	0.912	88.00%	12.00%
2014	1.091	83.39%	16.61%
2015	0.714	81.56%	18.44%
2016	1.059	83.65%	16.35%
2017	1.031	86.64%	13.36%
2018	1.041	86.81%	13.19%
2019	1.027	86.24%	13.76%
2020	1.055	85.03%	14.97%
2021	1.072	84.29%	15.71%

从四大区域内各城市间的人均碳排放区域差异来看（图 3.5），2006-2021 年四大区域人均碳排放的泰尔指数均呈波动式上升趋势，各城市间的人均碳排放差异在扩大，其中，西部地区内部的区域差异相对较大，而东部、中部和东北地区内部的区域差异则相对较小。这可能是因为西部地区经济发展相对缓慢，经济的主要发展着力点位于省会城市与具有丰富旅游资源的城市，各城市间生产生活活动数量差异大，所需要的石油天然气、电力、热力也会存在较大差异；与西部地区相比，东部、中部和东北地区则内部发展相对协调，人均碳排放的区域差异相对较小。具体来看，东部地区人均碳排放的泰尔指数从 0.303 增长至 0.745，中部地区从 0.473 增长至 0.544，西部地区从 1.213 增长至 1.470，东北地区从 0.422 增长至 0.675；相比较而言，东部地区增长幅度最大，中部地区增长幅度最小。2021 年，四大区域人均碳排放的泰尔指数从大到小依次为西部、东部、东北、中部地区。

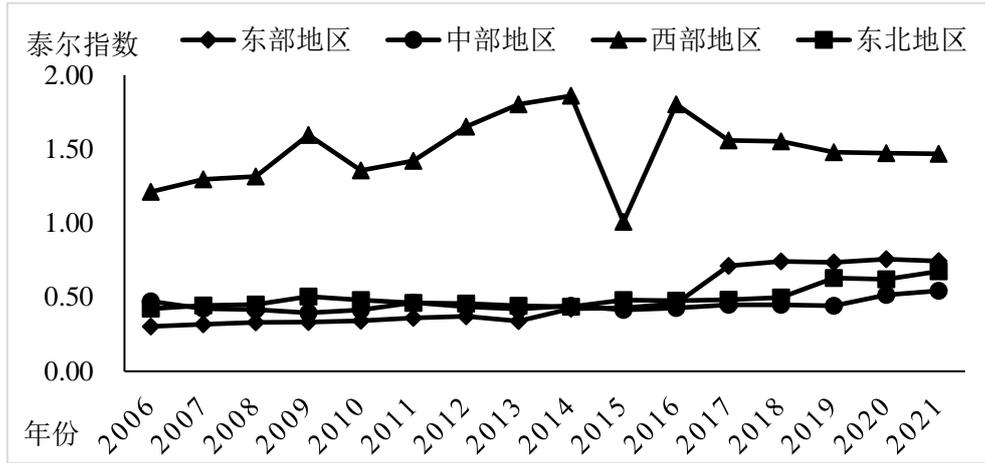


图 3.5 2006-2021 年四大区域人均碳排放的泰尔指数变化情况

(3) 空间关联

为探究 2006-2021 年我国 254 个地级及以上城市人均碳排放的空间关联情况，运用空间自相关模型，选择 Stata14.2 软件测算人均碳排放的莫兰指数。

全局莫兰指数测算结果见表 3.5，结果显示：全局莫兰指数均大于 0，且均通过显著性检验，并呈现波动上升趋势，由 2006 年的 0.077 上升至 2021 年的 0.114。表明人均碳排放具有显著的空间关联效应，并且关联性不断增加。

表 3.5 2006-2021 年中国 254 个地级及以上城市人均碳排放的全局莫兰指数

year	2006	2007	2008	2009	2010	
Moran's I	0.077***	0.076***	0.076***	0.058***	0.072***	
year	2011	2012	2013	2014	2015	
Moran's I	0.079***	0.084***	0.087***	0.104***	0.123***	
year	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Moran's I	0.117***	0.059***	0.064***	0.063***	0.098***	0.114***

注：***、**、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验。

为识别人均碳排放空间关联的具体情况，绘制 2006 年、2011 年、2016 年、2021 年人均碳排放的局部莫兰散点图（图 3.6），并将散点图平面区域划分为高高聚集区（第一象限）、高低聚集区（第二象限）、低低聚集区（第三象限）、低高聚集区（第四象限）4 个区域。结果显示：各城市散点主要分布在第一象限和第三象限，随时间变化散点位置先逐步向原点靠近而后远离原点。表明人均碳排

放的聚集效应主要发生在低低聚集区与高高聚集区，我国人均碳排在地理空间上具有显著的局部空间聚集特征，其显著性先减弱后增强。

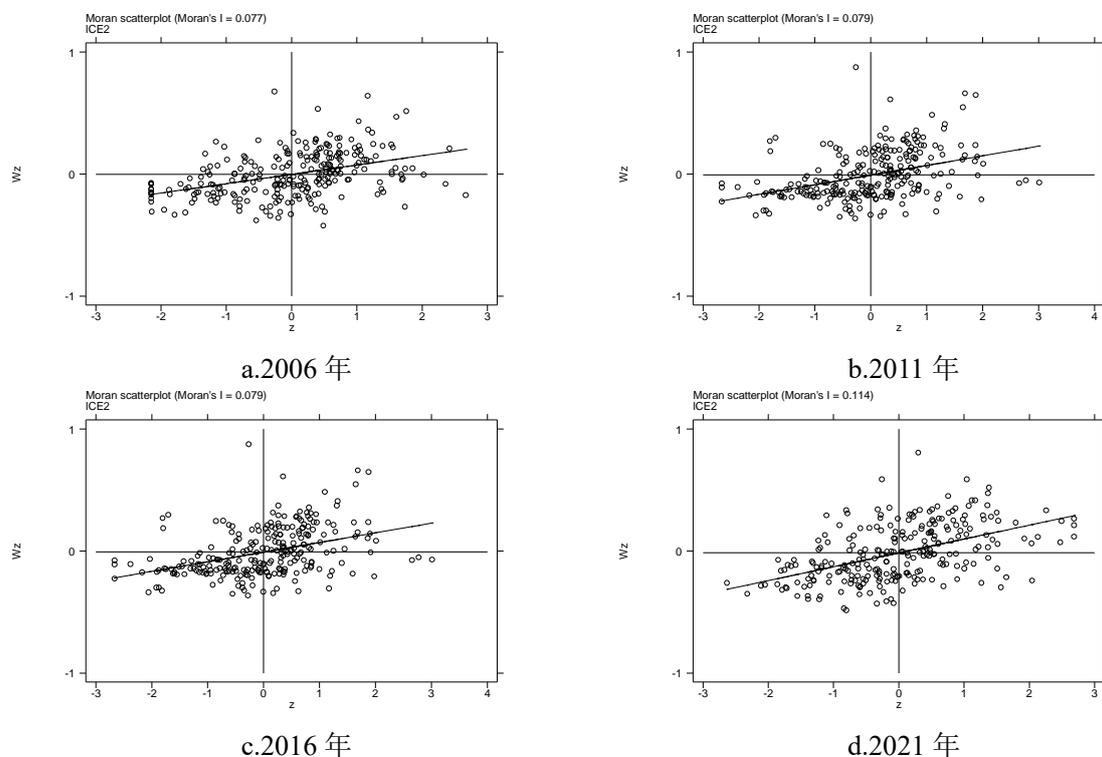


图 3.6 2006、2011、2016、2021 年中国 254 个地级及以上城市人均碳排放的局部莫兰散点

图

4 人口集聚对城市碳排放影响的实证分析

4.1 研究方法与模型构建

4.1.1 研究方法

为探究人口集聚对城市碳排放的影响及其内在机制，本文以 IPAT 的扩展模型 STIRPAT 模型取对数为基准回归模型。IPAT 模型是被广泛应用于人口环境压力的模型，模型基础形式为： $I=P \times A \times T$ ，其中人口（P）、富裕程度（A）和技术水平（T）是影响环境压力的主要因素。但是，该模型需满足一个前提假设：各自变量对环境因变量产生等比例的影响，显然与实际条件相矛盾，人文社会因素对环境的影响往往是错综复杂的，因此，该模型具备一定的局限性。Dietz 和 Rosa（1994）基于此提出 IPAT 的扩展模型 STIRPAT 模型，不仅延续了 IPAT 模型用来解释人口、财富程度、技术条件对环境压力的影响，还可以引入其他相关因素，更好的解释人口因素对环境的影响，也被广泛应用在人口、经济与环境问题研究中（刘西涛和王盼，2022；张思思等，2023）。

许多研究发现人口集聚对碳排放的影响具有明显的空间效应（孙猛和费不凡，2022），这与人口集聚与碳排放的本质特征息息相关。人口的集聚是由于人口的机械增长与自然增长，其中人口的机械增长是主要原因，由于各种原因人口从一个城市迁至另一个城市，且多流向距离较近的更发达地区，是一个动态的过程，因此，人口集聚一般具有显著的空间相关性。同样，碳排放是二氧化碳和其它温室气体排放的总称，具有气体易扩散的性质，地区间会发生较为频繁的“碳转移”，也具有显著的空间相关性（张华明等，2021）。人口集聚与城市碳排放的空间相关性在第三部分和第四部分的现状分析中也得到了验证，鉴于这种人口集聚与城市碳排放的自身特性，在 STIRPAT 模型的基础上结合空间计量模型进行实证分析。空间计量模型主要有三种常见形式（Elhorst，2014）：一是加入被解释变量滞后项的空间滞后模型 SLM，适用于被解释变量之间存在较强的路径依赖性的情形；二是加入误差扰动项滞后项的空间误差模型 SEM，适用于存在未考虑到的控制变量的情形；三是同时加入被解释变量滞后项、误差扰动项滞后项的空间杜

宾模型 SDM，适用于被解释变量之间存在较强路径依赖性、以及存在未考虑到的其他影响因素的情形。结合本文研究的具体情形，城市碳排放具有显著的路径依赖型，再加上影响环境的因素众多且指标难以测量，必然会存在控制变量遗漏的情形，理论上选择空间杜宾模型作为本文的实证分析方法。该方法不仅适用于本研究的具体情形，还能有效解决存在的内生性问题。

4.1.2 模型构建

基于 2006-2021 年中国 254 个地级及以上城市的平衡面板数据，为验证人口集聚对城市碳排放的影响及其内在机制，首先构建 IPAT 的扩展模型 STIRPAT 模型作为基准回归模型：

$$I = \alpha P^\beta A^\gamma T^\delta \varepsilon \quad (4-1)$$

其中，I 表示环境压力，P 表示人口因素，A 表示财富程度，T 表示技术水平， α 、 β 、 γ 、 δ 为变量系数， ε 为模型误差。

将方程两边取自然对数得：

$$\ln I = \ln \alpha + \beta \ln P + \gamma \ln A + \delta \ln T + \varepsilon \quad (4-2)$$

依据本文需要，将环境压力用人均碳排放（CE）来表示，人口因素用本文的核心解释变量人口集聚（PA）来表示，财富程度用经济发展水平（ED）来表示，技术水平用能源强度（EC）来表示，并加入控制变量绿色创新水平（GI）、资本存量（PC）、对外开放水平（FDI）、政府干预程度（GID）。同时，为检验人口集聚对城市碳排放的非线性关系，在模型中加入人口集聚的多次项（此处以二次项为例： $\ln PA_{it}$ ）。

$$\begin{aligned} \ln CE_{it} = \ln \alpha + \beta_1 \ln PA_{it} + \beta_2 \ln^2 PA_{it} + \gamma \ln ED_{it} + \delta \ln EC_{it} + \zeta_1 \ln GI_{it} \\ + \zeta_2 \ln PC_{it} + \zeta_3 \ln FDI_{it} + \zeta_4 \ln GID_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (4-3)$$

在此基础上，加入空间距离权重矩阵、被解释变量滞后项与误差项滞后项，分别建立空间滞后模型、空间误差模型与空间杜宾模型：

$$\begin{aligned} \ln CE_{it} = \ln \alpha + \rho \sum_{j=1, j \neq i}^N \omega_{ij} \ln CE_{j,t-1} + \beta_1 \ln PA_{it} + \beta_2 \ln^2 PA_{it} \\ + \gamma \ln ED_{it} + \delta \ln EC_{it} + \zeta_1 \ln GI_{it} + \zeta_2 \ln PC_{it} + \zeta_3 \ln FDI_{it} \\ + \zeta_4 \ln GID_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (4-4)$$

$$\ln E_{it} = \ln \alpha + \beta_1 \ln PA_{it} + \beta_2 \ln PA_{it} + \gamma \ln ED_{it} + \delta \ln EC_{it} + \zeta_1 \ln GI_{it} + \zeta_2 \ln PC_{it} + \zeta_3 \ln FDI_{it} + \zeta_4 \ln GID_{it} + \lambda \sum_{j=1, j \neq i}^N \omega_{ij} \varepsilon_{j,t-1} + \varepsilon_{it} \quad (4-5)$$

$$\ln CE_{it} = \ln \alpha + \rho \sum_{j=1, j \neq i}^N \omega_{ij} \ln CE_{j,t-1} + \beta_1 \ln PA_{it} + \beta_2 \ln PA_{it} + \gamma \ln ED_{it} + \delta \ln EC_{it} + \zeta_1 \ln GI_{it} + \zeta_2 \ln PC_{it} + \zeta_3 \ln FDI_{it} + \zeta_4 \ln GID_{it} + \theta \sum_{j=1}^N \omega_{ij} Z_{ijt} + \lambda \sum_{j=1, j \neq i}^N \omega_{ij} \varepsilon_{j,t-1} + \varepsilon_{it} \quad (4-6)$$

其中， ρ 表示空间滞后系数；为简化空间杜宾模型公式，用Z表示所有自变量，用于添加空间滞后项； ω_{ij} 表示空间距离权重矩阵（本文选用空间反距离权重矩阵）。

为检验人口集聚对城市碳排放的内在传导路径，人口集聚可能通过作用于产业结构升级、基础设施建设影响城市碳排放。Baron 和 Kenny（1986）提出的逐步法，分别对核心解释变量与中介变量间的关系、控制现有解释变量（包括核心解释变量）的前提下中介变量与被解释变量间的关系进行显著性检验，通过则说明中介效应存在。但由于该方法可能存在统计功效较低与估计偏误等问题，因此，本文根据江艇（2022）经验进行两阶段回归验证本文的两条传导路径。在验证人口集聚与城市碳排放影响关系的基础上，把重点放在验证人口集聚与产业结构升级、基础设施建设间的影响研究上，通过理论部分验证产业结构、基础设施建设对城市碳排放的影响（刘斌，2022）。基于此，以空间杜宾模型为例，以产业结构升级为例，建立以下模型：

$$\ln IS_{it} = \ln \alpha + \rho \sum_{j=1, j \neq i}^N \omega_{ij} \ln IS_{j,t-1} + \beta \ln PA_{it} + \gamma \ln ED_{it} + \delta \ln EC_{it} + \zeta_1 \ln GI_{it} + \zeta_2 \ln PC_{it} + \zeta_3 \ln FDI_{it} + \zeta_4 \ln GID_{it} + \theta \sum_{j=1}^N \omega_{ij} Z_{ijt} + \lambda \sum_{j=1, j \neq i}^N \omega_{ij} \varepsilon_{j,t-1} + \varepsilon_{it} \quad (4-7)$$

4.2 变量选取与数据说明

4.2.1 变量选取

被解释变量：人均碳排放（CE）。用城市碳排放总量与市辖区常住人口的比值表征，具体测算方法见章节 3.2.1。人均碳排放是指平摊在每个人身上所产生的碳排放量，相比碳排放总量，能够更好地反应人口集聚对节能减排的影响。

核心解释变量：人口集聚（PA）。用人口地理集中度表示人口集聚程度，具体测算方法见章节 3.1.1，并且用人口密度作为替换变量进行后续的稳健性检验。相较于人口规模、城镇户籍人口与非农人口比重等其他人口集聚的测度方法，人口地理集中度与人口密度更能精确表现出集聚态势，且具有广泛适用性。

中介变量：产业结构升级（IS）与基础设施建设（IL）。产业结构的变化与能源结构有着密不可分的联系，第三产业占较高的产业布局往往具有更低的能源消耗、污染排泄与碳排放，选用市辖区第三产业生产总值占市辖区生产总值的比重表征产业结构升级（周迪和刘奕淳，2020）；基础设施建设能够优化区域内资源流通与配置，增强企业间的紧密联系，充分发挥人口的集聚效益，进而为人口集聚实现正外部性提供有力支撑；为更准确表达基础设施建设情况，选用熵值法测度出来的综合指标进行表征，将基础设施建设分解为交通、信息和生态基础设施建设 3 个方面，其中，交通基础设施建设包含道路密度、每万人拥有出租汽车和公共汽电车车辆数，信息基础设施建设包含年邮电业务量，生态环境基础设施建设包含生活垃圾无害处理率和建成区绿化覆盖率（陈银娥和孙琼，2016）。

控制变量：结合基准回归模型需要、避免多重共线性、数据的可获得性等多方面因素，在城市碳排放的影响因素中选择经济发展水平（ED）、能源强度（EC）、绿色创新水平（GI）、政府干预程度（GID）、资本存量（PC）、对外开放水平（FDI）作为本研究控制变量。经济发展水平（ED），用人均 GDP 来表征（张悦等，2022），并用 GDP 指数以 2006 年为基期进行平减，经济发展是产生碳排放的主要原因，也是富裕程度的主要象征，往往经济发展水平越高的地区，人民的平均富裕程度与产生的碳排放也相对较高。能源强度（EC）用能源消费量与地区生产总值的比值进行表征，能源消费量利用市辖区内产生的人工或天然气、液化石油气、全社会用电量、热力所需的原煤四种能源消耗量与对应的折标准煤系数计算所得（田

成诗和陈雨, 2022); 能源强度是指生产单位 GDP 所需的能源消费量, 是技术水平的结果表征, 技术水平越高, 能源强度越低, 相较于技术投入更能体现一个地区的技术发展水平。绿色创新水平 (GI), 用绿色专利授权量来表征 (周迪和刘奕淳, 2020), 一个地区的绿色创新水平越高代表拥有高水平的绿色生产技术和清洁能源技术可能性越大, 有助于提高碳排放效率。政府干预程度 (GID), 用地方财政一般预算支出占市辖区生产总值的比重进行表征 (田成诗和陈雨, 2022), 地方政府不仅可以通过制定节能减排的相关政策设定企业进入门槛、引导企业绿色创新, 还能通过为城市公共福利保障等方面提供资金支持, 对城市建设产生影响, 作用于城市碳排放。资本存量 (PC), 参考张军等的永续盘存法计算获得, 并利用固定资产投资价格指数以 2006 年为基期进行平减 (徐英启等, 2022), 物质资本条件是生产生活的重要基础, 物质资本条件水平与生产生活的活跃度有着密切联系, 进而影响城市碳排放的高低。对外开放水平 (FDI), 用当年实际利用外资金额与地区生产总值的比值进行表征 (徐英启等, 2022), 需注意单位的转换; 对外开放可通过引入外来的产业、资金、技术影响城市碳排放, 一方面, 跨国公司可能会将高污染低标准产业转移进来, 提高碳排放 (刘西涛和王盼, 2022), 另一方面, 可通过对新设外资企业设立更高的环保标准, 引入国外更高水平更环保的技术水平与生产方式, 降低碳排放。相关变量的定义及说明如表 4.1 所示:

表 4.1 变量类型与说明

变量类型	变量名称	变量符号	变量解释
被解释变量	人均碳排放	CE	城市碳排放量/市辖区常住人口
核心解释变量	人口集聚	PA	人口地理集中度
中介变量	产业结构升级	IS	市辖区第三产业生产总值/市辖区 GDP
	基础设施建设	IL	包含交通、信息、生态环境的综合指标体系
控制变量	经济发展水平	ED	市辖区人均 GDP
	能源强度	EC	能源消费量/市辖区 GDP
	绿色创新水平	GI	绿色专利授权量
	政府干预程度	GID	地方财政一般预算支出/市辖区 GDP
	资本存量	PC	永续盘存法计算得出
	对外开放水平	FDI	市辖区实际利用外资金额/GDP

4.2.2 数据说明

本文选取 2006-2021 年所有地级及以上城市数据作为本文的研究对象，但在数据的收集与处理过程中，鉴于指标及对应数据的可获得性，剔除了哈密市、吐鲁番市等 43 个数据缺失严重地区，最终样本为 254 个地级及以上城市，包含 4 个直辖市、15 个副省级城市、235 个地级市。其中，城市碳排放计算时的热力数据来源于《中国城市建设统计年鉴》，各种能源的净发热值、碳排放系数、碳氧化因子等数据源于《中国能源统计折标准煤参考系数》、《省级温室气体清单编制指南》、《中国区域电网基准线排放因子结果》；其余数据源于《中国城市统计年鉴》、国家统计局网站，其中部分缺失数据源于对应的各省、各市统计年鉴，其余数据缺失采用插值法补充完整（田成诗和陈雨，2022），以便进行后续的方程回归。为保证数据的可比性，对以货币计量的指标均以 2006 年为基期进行价格平减；为避免极端值对模型估计的影响，对连续变量进行 1%和 99%的缩尾处理（刘西涛和王盼，2022）；并且模型设计中对所有变量取对数，消除数据异方差与量纲。相关变量描述性统计如表 4.2 所示。

表 4.2 相关变量描述性统计

变量	名称	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
lnCE	人均碳排放	4064	10.984	0.756	8.976	12.855
lnPA	人口集聚	4064	-0.034	0.408	-1.053	1.239
lnIS	产业结构升级	4064	3.795	0.263	3.048	4.324
lnIL	基础设施建设	4064	-2.885	0.378	-4.015	-1.392
lnED	经济发展水平	4064	10.558	0.618	9.005	12.010
lnEC	能源强度	4064	10.200	0.673	8.888	11.961
lnGI	绿色创新水平	4064	2.523	1.777	0.000	7.215
lnGID	政府干预程度	4064	2.667	0.465	1.390	3.873
lnPC	资本存量	4064	17.655	0.962	15.527	19.885
lnFDI	对外开放水平	4064	-4.472	1.316	-8.542	-2.254

4.3 模型检验

4.3.1 多重共线性检验

本文所采取的因变量多为经济环境相关指标，相关性较强，为避免多重共线性，在进行实证分析前利用方差膨胀因子 VIF 对所有自变量进行多重共线性检验，VIF 小于 10，即表示不存在多重共线性。核心解释变量及控制变量方差膨胀因子如表 4.3 所示，可以看出所有变量的 VIF 值均小于 10，所构建的回归模型不存在多重共线性。

表 4.3 核心解释变量及控制变量方差膨胀因子

变量	VIF	1/VIF
人口集聚	1.60	0.626
经济发展水平	2.36	0.424
能源强度	1.34	0.747
绿色创新水平	3.73	0.268
资本存量	3.53	0.283
政府干预程度	1.10	0.905
对外开放水平	1.09	0.917
均值	2.11	

4.3.2 非线性特征检验

为确定人口集聚对城市碳排放的影响是否具有非线性特征，利用门槛模型提前进行实证检验，从而确定回归模型中核心解释变量的形式，进行后续实证分析。首先，进行单门槛模型检验，如果单门槛模型检验通过，则说明存在单门槛，即：具有存在一个极值点的非线性特征，反之，不存在非线性特征，不再进行后续检验；其次，通过单门槛检验后进行双门槛模型检验，若检验通过，则说明存在双门槛，即：具有存在两个极值点的非线性特征，反之，只具有存在一个极值点的非线性特征；一直重复以上步骤，就能够准确得知变量间是否存在非线性特征以及存在什么样的非线性特征。表 4.4 为门槛模型检验具体结果，其中，单门槛模型检验 p 值小于 0.1，通过了门槛模型检验，但双门槛模型检验、三门槛模型检

验 p 值分别为 0.2567、0.8100，大于 0.1，未通过门槛模型检验，说明人口集聚对城市碳排放影响具有显著的非线性特征，并且为具有单门槛的非线性特征。因此，后续利用空间计量模型实证分析时，在回归模型中需加入人口集聚的二次项验证其非线性特征。

表 4.4 门槛模型检验

门槛数	F 值	P 值	BS 次数	临界值		
				10%	5%	1%
单门槛	31.64	0.0167	300	18.1908	23.2405	32.1295
双门槛	11.41	0.2567	300	15.6337	19.4646	26.3318
三门槛	4.26	0.8100	300	15.4911	19.0819	29.0223

4.3.3 空间计量模型的选择检验

根据前文对被解释变量和核心解释变量的空间相关性检验以及模型构建的理论结果，可以得知本文适用模型为空间杜宾模型，但仍需通过一系列空间模型检验，从而确定所需的空间计量模型。

首先，利用 LM 检验和稳健的 LM 检验判断基准回归模型是否具有空间误差效应与空间滞后效应。表 4.5 是对基准模型分别进行 LM 检验和稳健的 LM 检验的结果，结果显示在 LM 检验和 Robust-LM 检验下 p 值均通过了 10% 的显著性，说明存在空间误差效应和空间滞后效应，拒绝使用混合面板回归，并且初步选择空间杜宾模型。

表 4.5 LM 检验和稳健的 LM 检验结果

	LM-lag	Robust LM-lag	LM-error	Robust LM-error
t 统计量	44.261***	3.487*	470.213***	429.439***
p 值	0.000	0.062	0.000	0.000
结果	通过检验	通过检验	通过检验	通过检验

注：***、**、* 分别表示通过 1%、5%、10% 水平下的显著性检验，括号内为稳健标准误。

其次，利用 LR 检验和 WALD 检验判断初步选择的空間杜宾模型是否可退

化为空间滞后模型和空间误差模型，即在确定变量间存在空间相关性前提下，进一步验证空间杜宾模型的适用度，若不能退化则采用带有空间滞后项和空间误差项的空间杜宾模型，反之则选择退化后的模型。检验结果如表 4.6 所示，LR、Wald 滞后检验与误差检验结果 p 值均通过了 1% 的显著性，故本文选择空间杜宾模型进行后续的实证分析。

表 4.6 LR 检验和 WALS 检验结果

	Wald	LR	Wald	LR
	Spatial	Spatial	Spatial	Spatial
	lag	lag	error	error
t 统计量	55.96***	262.67***	21.21***	203.62***
p 值	0.007	0.000	0.000	0.000
结果	通过检验	通过检验	通过检验	通过检验

注：***、**、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验，括号内为稳健标准误。

最后，依据 Hausman 检验和 LR 检验判断空间杜宾模型实证应用时具体使用随机效应模型、时间效应模型、空间效应模型还是双重固定效应模型。从表 4.7 可以看出，Hausman 检验结果通过了 1% 的显著性水平检验，拒绝为随机效应模型的原假设，采用固定效应模型。对于选择何种固定效应的 LR 检验，在两种检验 p 值均小于 0.1 的情况下，采用双向固定效应模型；结果显示固定时间效应和空间效应的 LR 检验 p 值小于 0.1，故本文采用双向固定效应的空间杜宾模型。

表 4.7 Hausman 检验和 LR 检验结果

	Hausman	LR	LR
		Time Fixed	Spatial Fixed
t 统计量	48.35***	5718.65***	39.51***
p 值	0.000	0.000	0.002
结果	通过检验	通过检验	通过检验

注：***、**、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验，括号内为稳健标准误。

4.4 实证结果与分析

4.4.1 非线性特征分析

根据章节 4.3 模型检验结果,采用同时固定空间和时间效应的空间杜宾模型进行回归,并且本文在利用空间杜宾模型回归基础上,再利用随机效应模型和固定效应模型的回归结果进行对比,3 种模型的回归结果见表 4.8。

从模型效果来看,人均碳排放的空间自回归系数 ρ 通过了 5%水平的显著性检验,并且对应系数值为正,表明 2006-2021 年间本研究的 254 个地级市及以上城市碳排放在空间上具有显著的正向溢出效应,具体而言,本地的人均碳排放增加会造成相邻地区的人均碳排放增加,反之则会减少。进一步验证了城市碳排放存在明显的空间自相关性与空间溢出效应以及使用双向固定效应的空间杜宾模型的合理性。

从核心解释变量来看,3 种模型的核心解释变量二次项系数为正,且均在 1%的水平下显著,表明在本研究中人口集聚与城市碳排放为“U”型非线性关系,且该趋势非常稳健,验证了假设 1。具体而言,当人口集聚程度未超过拐点时,人口集聚对城市碳排放产生抑制效应,此时城市处于快速增长阶段,人口集聚效应呈现,有利于资源有效配置和土地集约利用,所产生的正外部性大于负外部性,因此人口集聚程度提升会降低城市碳排放;当人口集聚程度超过拐点时,城市拥挤效应显著,公共服务及基础设施负荷加重,城市运行效率降低,人口集聚所产生的负外部性大于正外部性,使得城市碳排放随着人口集聚程度的增加而增加。以双向固定效应的空间杜宾模型为参考标准,人口集聚对城市碳排放的非线性影响的拐点值为 1.181,人口集聚对数化范围为 (-1.053, 1.239),可以发现,研究期内大多数城市仍在拐点左侧,超过拐点的城市相对较少,人口集聚对城市碳排放多为抑制作用,仍未对环境产生严重危害;而针对少数超过拐点的城市,可能是因为城市建设速度未跟上人口增长速度导致建成区面积相对狭小,拥挤效应明显,之后发展应注意城市人口与基础建设的协调发展,优化人口集聚程度,更大程度发挥人口集聚正外部性。

从控制变量来看,除政府干预程度在 3 种模型检验下对城市碳排放的影响不确定外,经济发展水平、能源强度、绿色创新水平、资本存量、对外开放水平均

对城市碳排放产生影响。接下来主要以同时固定空间效应与时间效应的空间杜宾模型为参考标准，解释控制变量对城市碳排放的影响。能源强度系数为正且通过 1%水平的显著性检验，表明生产单位 GDP 所消耗的能源越多，也就是说技术水平越低，则人均碳排放越高，能源强度也与其具有显著的正向相关性，提高生产技术水平是减少城市碳排放的有效路径之一；经济发展水平系数为正且通过了 1%水平的显著性检验，表明经济发展水平与城市碳排放具有显著的正向相关性，经济发展水平提升会加剧城市碳排放，如何实现经济发展与碳排放的脱钩仍然是之后经济研究的重要工作；绿色创新水平为负且通过 1%水平的显著性检验，表明绿色创新水平对城市碳排放具有显著的抑制作用，提高绿色创新水平，仍然是建设低碳城市的主要措施之一；资本存量系数为正且通过了 1%水平的显著性检验，拥有的物质资本存量越多，所产生的人均碳排放越高，两者间具有显著的正向相关性；对外开放水平为正且通过了 1%水平的显著性检验，验证了“污染天堂”假说，跨国公司向中国转移了高耗能高污染的产业，从而导致中国碳排放增加(徐英启等，2022)，设立严格标准，提升外资准入门槛，是推动城市节能减排的一条重要路径。

表 4.8 FE、RE、SDM 模型回归结果

	(1) FE	(2) RE	(3) SDM
人口集聚	-0.1202*** (0.0163)	-0.1059*** (0.0157)	-0.1816*** (0.0164)
人口集聚二次项	0.0929*** (0.0169)	0.0883*** (0.0166)	0.0764*** (0.0157)
能源强度	0.9554*** (0.0076)	0.9459*** (0.0074)	0.9032*** (0.0081)
经济发展水平	0.8325*** (0.0149)	0.8352*** (0.0141)	0.7625*** (0.0162)
绿色创新水平	-0.0100** (0.0042)	-0.0088** (0.0041)	-0.0160*** (0.0047)
资本存量	0.0182* (0.0108)	0.0200* (0.0103)	0.0550*** (0.0177)
政府干预程度	0.0079 (0.0095)	0.0035 (0.0092)	-0.0121 (0.0096)
对外开放水平	0.0036	0.0053	0.0097***

续表 4.8 FE、RE、SDM 模型回归结果

	(1)	(2)	(3)
	FE	RE	SDM
常数项	(0.0033) -7.8715*** (0.1670)	(0.0033) -7.8176*** (0.1662)	(0.0033)
ρ			0.3981*** (0.0895)
sigma2_e			0.0230*** (0.0005)
样本量	4064	4064	4064
R ²	0.8829	0.8829	0.3494

注：***、**、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验，括号内为稳健标准误。

4.4.2 传导路径分析

在明确人口集聚对城市碳排放存在非线性影响的基础上，基于假设 2 和假设 3，继续使用同时固定时间和空间效应的空间杜宾模型，深入挖掘人口集聚对城市碳排放影响的传导路径，两条传导路径的结果见表 4.9。

从第一条传导路径“人口集聚—产业结构升级—城市碳排放”来看，模型(1)为同时固定时间和空间效应的空间杜宾模型下的人口集聚对产业结构升级影响的回归结果，可以发现：在不改变现有控制变量的情况下，产业结构升级的空间自相关性显著，适用于本模型；人口集聚的系数为正且通过了 1%水平的显著性检验，表明人口集聚对产业结构升级为正向促进关系，人口集聚程度的提高会推动产业结构升级。为进一步验证两者间的关系，向模型中加入人口集聚二次项进行实证分析，得出模型(2)，可以看出人口集聚一次项系数仍然为正且通过了 1%水平的显著性检验，但二次项系数为正且不显著，表明人口集聚能够显著推动产业结构升级，扩大产业规模，提升产业结构水平，加强产业间的联系，间接提升技术水平与能源利用率，改善能源结构，提高碳排放效率，优化资源配置效率，从而抑制城市碳排放。于是，可以得出：人口集聚会通过推动产业结构升级而起到抑制城市碳排放的作用，假设 2 得证。

从第二条传导路径“人口集聚—基础设施建设—城市碳排放”来看，模型(3)

为同时固定时间和空间效应的空间杜宾模型下的人口集聚对基础设施建设影响的回归结果，可以得出：在不改变现有控制变量的情况下，基础设施建设的空间自相关性显著，适用于本模型；人口集聚的系数为正且通过了 5%水平的显著性检验，表明人口集聚对基础设施建设为正向促进关系，人口集聚度的提高会改善基础设施建设。为进一步验证两者间的关系，向模型中加入人口集聚二次项，再次进行实证分析，得出模型（4），可以看出人口集聚一次项系数仍然为正且通过了 5%水平的显著性检验，但二次项系数为正且不显著，表明人口集聚对基础设施建设的影响为正向促进作用。人口集聚程度的提升，能够改善城市内部及周围的基础设施建设水平，提高沟通效率与资源配置效率，促进知识和技术传播，抑制碳排放，但是与之而来的建设需求、贸易和交通往来的增加会促进碳排放。于是，可以得出：人口集聚会通过改善基础设施建设而影响城市碳排放，假设 3 得证。

表 4.9 传导路径回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	产业结构升级	产业结构升级	基础设施建设	基础设施建设
人口集聚	0.0363*** (0.0120)	0.0349*** (0.0120)	0.0452** (0.0185)	0.0459** (0.0185)
人口集聚二次项		0.0022 (0.0115)		0.0181 (0.0177)
控制变量	控制	控制	控制	控制
ρ	0.7511*** (0.0521)	0.7403*** (0.0537)	0.4204*** (0.0887)	0.4098*** (0.0896)
σ^2_e	0.0123*** (0.0003)	0.0122*** (0.0003)	0.0293*** (0.0007)	0.0293*** (0.0007)
样本量	4064	4064	4064	4064
R^2	0.3173	0.3144	0.2873	0.2988

注：***、**、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验，括号内为稳健标准误。

4.4.3 异质性分析

前文已对人口集聚对城市碳排放的非线性影响及传导路径展开了分析，但本研究共包含 254 个地级及以上城市，城市特征不同，人口集聚对城市碳排放的影

响也会有所不同。因此,为深入分析不同特征城市人口集聚对城市碳排放影响的异质性,利用城市区域位置、行政区划等级、规模、发展进程的不同对全样本城市进行划分,并对不同特征城市人口集聚做描述性统计,便于后续异质性回归结果分析,结果见表 4.10;在此基础上,依次加入人口集聚一次项、二次项到空间杜宾模型进行分组回归,结果分别见表 4.11-表 4.14。

表 4.10 不同特征城市人口集聚描述性统计

划分依据	不同特征城市	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
区域位置	东部地区	1,328	0.021	0.413	-0.936	1.673
	中部地区	1,168	-0.052	0.374	-0.820	0.963
	西部地区	1,040	0.036	0.462	-1.244	1.146
	东北地区	528	-0.262	0.306	-1.053	0.672
行政区划等级	直辖市和副省级市	304	-0.035	0.257	-0.639	0.634
	地级市	3,760	-0.034	0.419	-1.057	1.271
城市规模	特大超大城市	448	0.064	0.472	-0.685	1.784
	大城市	2,176	0.003	0.376	-0.854	1.132
	中小城市	1,440	-0.118	0.433	-1.210	0.976
城市发展进程	后工业化阶段城市	2,976	-0.030	0.385	-1.035	1.012
	工业化阶段城市	1,088	-0.039	0.485	-1.083	1.745

不同区域的城市,其地理位置优势、资源禀赋、产业结构等各个方面均有所不同,为科学反映我国不同区域的社会经济发展状况的不同,探讨位于不同经济区域的城市人口集聚对城市碳排放的不同影响,依据国家统计局进行区域经济发展统计的标准,将全样本城市划分为东、中、西、东北四大经济区域。从区域位置来看(表 4.11),模型(1)为只加入人口集聚一次项的、以东部地区城市为样本的空间杜宾模型回归结果,其中,人口集聚一次项系数为负且通过了 1%水平的显著性检验;并且加入了二次项后的模型(2)人口集聚一次项系数仍显著为负,人口集聚二次项系数则不显著,表明东部地区人口集聚对城市碳排放具有明显的抑制作用。模型(3)为只加入人口集聚一次项的、以中部地区城市为样本的空间杜宾模型回归结果,其中,人口集聚一次项系数为负且通过了 1%水平的显著性检验;加入了二次项后的模型(4)人口集聚一次项系数同样仍显著为负,人口集聚二次项系数则不显著,表明中部地区人口集聚对城市碳排放也具有明显的抑制作用,人口集聚所产生的正外部性大于负外部性。模型(5)为只加入人

口集聚一次项的、以西部地区城市为样本的空间杜宾模型回归结果，其中，人口集聚一次项系数为负且通过了 1%水平的显著性检验；加入了二次项后的模型(6)，人口集聚一次项系数为负、二次项系数为正且均通过了 5%水平的显著性检验，表明西部地区人口集聚对城市碳排放的影响与全样本城市一致，具有“U”型的非线性特征，拐点值为 0.247，人口集聚程度未超过拐点时，人口集聚对城市碳排放的影响呈抑制作用，超过拐点时，人口集聚对城市碳排放的负外部性大于正外部性，两者呈正向相关关系。模型(7)为只加入人口集聚一次项的、以东北地区所有城市为样本的空间杜宾模型回归结果，其中，人口集聚一次项系数为负且通过了 1%水平的显著性检验；加入了二次项后的模型(8)，人口集聚一次项系数为负、二次项系数为正且均通过了 1%水平的显著性检验，表明东北地区人口集聚对城市碳排放的影响与全样本城市一致，具有“U”型的非线性特征，拐点值为 0.512，人口集聚程度未超过拐点时，人口集聚对城市碳排放的影响呈抑制作用，超过拐点时，人口集聚对城市碳排放的负外部性大于正外部性，两者呈正向相关关系。相比较而言，东部和中部地区人口集聚对城市碳排放均为抑制作用，且东部、中部地区人口集聚最大值分别为 1.673、0.963，而西部和东北地区人口集聚与城市碳排放为“U”型非线性关系，其拐点值分别为 0.247 和 0.512，表明东部、中部、西部、东北地区四个区域因环境特征功能、经济发展条件的不同，人口集聚所发挥的正外部性效果的不同，人口集聚对城市碳排放影响的“U”型曲线拐点值也不同，即：所能承载的人口集聚程度也不同，其中，西部地区受地理生态环境限制，人口集聚拐点值最小，所能承受的人口集聚程度最低，东北地区次之，东部和中部地区所能承载的人口集聚程度相对较高，还未到拐点值，也就是说现阶段东部和中部地区人口集聚对城市碳排放带来的抑制作用更为确定显著，人口在东部和中部地区集聚更能发挥其正外部性，带动产业结构升级和技术发展，助力“双碳”目标的实现。

表 4.11 区域异质性回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	东部地区	东部地区	中部地区	中部地区	西部地区	西部地区	东北地区	东北地区
人口集聚	-0.1644*** (0.0222)	-0.1562*** (0.0229)	-0.2250*** (0.0280)	-0.2232*** (0.0280)	-0.1000*** (0.0378)	-0.0943** (0.0376)	-0.2875*** (0.0511)	-0.2401*** (0.0484)
人口集聚二次项		-0.0252 (0.0179)		-0.0052 (0.0314)		0.1912*** (0.0348)		0.2347*** (0.0703)
能源强度	0.9063*** (0.0124)	0.9066*** (0.0123)	0.8946*** (0.0128)	0.8946*** (0.0128)	0.9219*** (0.1652)	0.9336*** (0.0165)	0.8918*** (0.0287)	0.8787*** (0.0286)
经济发展水平	0.8032*** (0.0243)	0.8087*** (0.0244)	0.7705*** (0.0273)	0.7690*** (0.0279)	0.8257*** (0.0398)	0.8504*** (0.0402)	0.6723*** (0.0435)	0.6551*** (0.0433)
绿色创新水平	-0.0088 (0.0079)	-0.0090 (0.0079)	-0.0041 (0.0068)	-0.0041 (0.0068)	-0.0093 (0.0113)	-0.0085 (0.0112)	-0.0566*** (0.0129)	-0.0610*** (0.0128)
资本存量	0.0160 (0.0289)	0.0166 (0.0289)	0.0477 (0.0365)	0.0479 (0.0368)	0.1357*** (0.0392)	0.1517*** (0.0388)	0.0578 (0.0399)	0.0706* (0.0396)
政府干预程度	0.0050 (0.0198)	0.0054 (0.0197)	0.0028 (0.0145)	0.0025 (0.0145)	-0.0670*** (0.0210)	-0.0735*** (0.0207)	-0.0086 (0.0197)	-0.0080 (0.0195)
对外开放水平	0.0196*** (0.0056)	0.0192*** (0.0056)	0.0177*** (0.0069)	0.0175** (0.0069)	-0.0101 (0.0065)	-0.0073 (0.0064)	0.0247*** (0.0064)	0.0229*** (0.0064)
样本量	1328	1328	1168	1168	1040	1040	528	528
R ²	0.8731	0.8535	0.3676	0.4528	0.7836	0.6650	0.8196	0.8200

注：***、**、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验，括号内为稳健标准误。

从行政区划等级来看（表 4.12），模型（1）为只加入人口集聚一次项的、以直辖市与副省级市为样本的空间杜宾模型回归结果，其中，人口集聚一次项系数为负且通过了 1%水平的显著性检验；但是加入了二次项后的模型（2）人口集聚二次项系数则不显著，表明直辖市和副省级城市人口集聚对城市碳排放具有明显的抑制作用，人口集聚所产生的正外部性大于负外部性。模型（3）为只加入人口集聚一次项的、以地级市为样本的空间杜宾模型回归结果，其中，人口集聚一次项系数为负且通过了 1%水平的显著性检验，加入了二次项后的模型（4）人口集聚一次项系数为负、二次项系数为正且均通过了 1%水平的显著性检验，但人口集聚拐点值为 1.312，地级市人口集聚对数化范围为（-1.057，1.271），均处于拐点值左侧，也就是说，尽管地级市人口集聚对城市碳排放呈现“U”型非线性趋势，但现阶段大多数地级市仍处于抑制阶段，表明地级市的人口集聚对城市碳排放主要起到抑制作用。相比较而言，直辖市和副省级市、地级市人口集聚对城

市碳排放均具有抑制作用，但是直辖市和副省级市的抑制作用更大且更显著。主要原因可能是直辖市、副省级市和地级市的城市行政管理能力不同（狭义的城市行政管理主要指城市政府对城市的公共事业、公共设施和公共事务进行管理，广义上还包括国家政权对全国的城市体系进行统一的规划和布局），直辖市和副省级市是各省级行政单位所在地，能够更快的进行城市结构和规模的调整，拥有更好的硬软件设施发挥人口集聚的正外部性，缓解人口集聚所带来的负外部性。

表 4.12 行政区划等级异质性回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	直辖市和副省级市	直辖市和副省级市	地级市	地级市
人口集聚	-0.2086*** (0.0441)	-0.2056*** (0.0454)	-0.1806*** (0.0169)	-0.1845*** (0.0169)
人口集聚二次项		-0.0111 (0.0677)		0.0703*** (0.0158)
能源强度	0.6075*** (0.0238)	0.6104*** (0.0239)	0.9043*** (0.0084)	0.9065*** (0.0084)
经济发展水平	0.7457*** (0.0502)	0.7488*** (0.0503)	0.7534*** (0.0166)	0.7484*** (0.0166)
绿色创新水平	-0.0141 (0.0202)	-0.0134 (0.0207)	-0.0157*** (0.0049)	-0.0154*** (0.0048)
资本存量	-0.1325*** (0.0371)	-0.1366*** (0.0372)	0.0271 (0.0191)	0.0333* (0.0191)
政府干预程度	-0.1157*** (0.0288)	-0.1139*** (0.0295)	-0.0165* (0.0098)	-0.0164* (0.0098)
对外开放水平	0.0364*** (0.0118)	0.0379*** (0.0121)	0.0101*** (0.0033)	0.0103*** (0.0033)
样本量	304	304	3760	3760
R ²	0.1817	0.1876	0.7192	0.7448

注：***、**、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验，括号内为稳健标准误。

不同规模下的城市人口集聚对碳排放的影响也不同，依据《国务院关于调整城市规模划分标准的通知》（国发[2014]51号），按市辖区常住人口将全样本城市划分为超大、特大、大、中等和小城市五个等级，鉴于超大城市与小城市数量相对较少，为便于分析本研究将五个等级合并为三个等级：超大特大城市（超大城市与特大城市相结合，常住人口 500 万以上的城市）、大城市（常住人口 100—

500 万的城市)、中小城市(中等城市与小城市相结合,常住人口小于 100 万的城市)。从城市规模来看(表 4.13),模型(1)为只加入人口集聚一次项的、以所有超大特大城市为样本的空间杜宾模型回归结果,其中,人口集聚一次项系数为负且在 10%水平下显著;加入了二次项后的模型(2)人口集聚一次项系数仍为负并且显著性有所提高,但人口集聚二次项系数不显著,表明超大特大城市人口集聚对城市碳排放具有抑制作用。模型(3)为只加入人口集聚一次项的、以所有大城市为样本的空间杜宾模型回归结果,其中,人口集聚一次项系数为负且通过了 1%水平的显著性检验;加入了二次项后的模型(4)人口集聚一次项系数仍显著为负,但人口集聚二次项系数不显著,表明大城市人口集聚也能够有效抑制城市碳排放。模型(5)为只加入人口集聚一次项的、以所有中小城市为样本的空间杜宾模型回归结果,其中,人口集聚一次项系数为负且通过了 1%水平的显著性检验;加入了二次项后的模型(6)人口集聚一次项系数为负、二次项系数为正且均通过了 1%水平的显著性检验,并且中小城市人口集聚对数化范围为(-1.210, 0.976),其拐点值为 0.664,中小城市人口集聚对城市碳排放的影响具有“U”型的非线性特征。相比较而言,大城市人口集聚对城市碳排放的抑制作用更大更显著,而超大特大城市次之,中小城市人口集聚与城市碳排放则为“U”型非线性关系。可能原因是超大特大城市已经积累了巨大的人口规模,人口集聚程度持续提升将会带来城市管理成本上升、规模经济达到瓶颈等拥挤效应,不利于经济发展和当地生态环境,因此超大特大城市人口集聚效果比大城市差。对于中小城市而言,虽然从系数大小来看中小城市人口集聚对城市碳排放带来的影响最大,但是由于自身城市硬软件较差,无法承载太高的人口集聚程度,部分城市存在显著拥挤效应,人口集聚正外部性小于负外部性。

表 4.13 城市规模异质性回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	超大特大城市	超大特大城市	大城市	大城市	中小城市	中小城市
人口集聚	-0.0727* (0.0389)	-0.0871** (0.0416)	-0.1232*** (0.0178)	-0.1286*** (0.0180)	-0.2504*** (0.0333)	-0.2073*** (0.0346)
人口集聚二次项		0.0269 (0.0273)		0.0298 (0.0183)		0.1560*** (0.0322)
能源强度	0.6869***	0.6799***	0.9210***	0.9217***	0.8734***	0.8780***

续表 4.13 城市规模异质性回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	超大特大城市	超大特大城市	大城市	大城市	中小城市	中小城市
	(0.0231)	(0.0237)	(0.0090)	(0.0090)	(0.0151)	(0.0150)
经济发展水平	0.7870***	0.7818***	0.7892***	0.7863***	0.6797***	0.6779***
	(0.0451)	(0.0464)	(0.0167)	(0.0168)	(0.0349)	(0.0348)
绿色创新水平	-0.0302**	-0.0278*	0.0027	0.0031	-0.0200**	-0.0217**
	(0.0152)	(0.0153)	(0.0052)	(0.0052)	(0.0088)	(0.0088)
资本存量	0.0135	0.0140	0.0015	0.050	0.0523	0.0649**
	(0.0315)	(0.0314)	(0.0217)	(0.0218)	(0.0333)	(0.0331)
政府干预程度	-0.0154	-0.0159	0.0100	0.0095	-0.0352**	-0.0353**
	(0.0261)	(0.0261)	(0.0104)	(0.0104)	(0.0172)	(0.0171)
对外开放水平	0.0230**	0.0229**	0.0114***	0.0116***	0.0097*	0.0098*
	(0.0110)	(0.0109)	(0.0036)	(0.0036)	(0.0056)	(0.0055)
样本量	448	448	2176	2176	1440	1440
R ²	0.4080	0.3314	0.4874	0.4986	0.8435	0.8529

注：***、**、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验，括号内为稳健标准误。

城市发展具有阶段性特征，本研究借鉴邓仲良等（2020）对城市发展阶段的划分方法，将城市发展阶段划分为工业化阶段与后工业化阶段，其划分依据为第二产业生产总值占第三产业生产总值的比重，若大于 1 为后工业化阶段城市，反之，则为工业化阶段城市。从城市发展进程特征来看（表 4.14），模型（1）为只加入人口集聚一次项的、以发展阶段处于后工业化阶段的的城市为样本的空间杜宾模型回归结果，其中，人口集聚一次项系数为负且通过了 1%水平的显著性检验；加入了二次项后的模型（2）人口集聚一次项系数为负、二次项系数为正且均通过了 1%水平的显著性检验，拐点值为 1.184，人口集聚对数化范围为（-1.035，1.012），表明处于后工业化阶段的的城市人口集聚对城市碳排放的影响表现为抑制作用。模型（3）为只加入人口集聚一次项的、以发展阶段处于工业化阶段的的城市为样本的空间杜宾模型回归结果，其中，人口集聚一次项系数为负且通过了 1%水平的显著性检验，但是加入了二次项后的模型（4）人口集聚二次项系数则不显著，表明处于工业化阶段的的城市人口集聚对城市碳排放具有明显的抑制作用，人口集聚所产生的正外部性大于负外部性。相比较而言，工业化发展阶段和后工业化发展阶段的的城市人口集聚对碳排放均具有抑制作用，但后工业化发展阶段城

市人口集聚拐点值为 1.184，工业化发展阶段城市人口集聚对数化最大值为 1.745，工业化发展阶段城市的抑制作用更显著且人口集聚承载程度更高。可能是因为工业化发展阶段的的城市，产业结构较差，此时人口集聚程度提高带来的正外部性更有效，从而达到抑制碳排放的作用；而后工业化阶段的的城市，第三产业占比高于第二产业，产业结构更为优化，人口集聚通过产业结构升级所发挥的正外部性效果相对较差，“U”型拐点的到来快于工业化阶段城市。

表 4.14 城市发展进程异质性回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	后工业化阶段城市	后工业化阶段城市	工业化阶段城市	工业化阶段城市
人口集聚	-0.1870*** (0.0197)	-0.1803*** (0.0198)	-0.0982*** (0.0271)	-0.1054*** (0.0297)
人口集聚二次项		0.0761*** (0.0209)		0.0107 (0.0196)
能源强度	0.8923*** (0.0100)	0.8953*** (0.0101)	0.9541*** (0.0119)	0.9536*** (0.0120)
经济发展水平	0.7588*** (0.0193)	0.7573*** (0.0193)	0.8667*** (0.0296)	0.8623*** (0.0304)
绿色创新水平	-0.0158*** (0.0057)	-0.0159*** (0.0057)	-0.0068** (0.0038)	-0.0067** (0.0038)
资本存量	0.0470** (0.0221)	0.0556** (0.0222)	0.0047 (0.0285)	0.0050 (0.0285)
政府干预程度	-0.0221* (0.0114)	-0.0221* (0.0114)	0.0216 (0.0163)	0.0214 (0.0164)
对外开放水平	0.0093** (0.0040)	0.0099** (0.0040)	0.0005 (0.0046)	0.0004 (0.0046)
样本量	2976	2976	1088	1088
R ²	0.1283	0.1379	0.9085	0.9069

注：***、**、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验，括号内为稳健标准误。

4.4.4 稳健性检验

在分析过程中本文已通过多模型对比回归方法初步验证了回归结果稳健性，本节将采用目前研究中常用的 2 种稳健性检验方法验证研究结论的稳健性。一是

替换核心解释变量测度方法,用人口密度代替人口地理集中度验证回归结果的稳健性;二是替换空间权重矩阵,用空间经济地理距离权重矩阵替代空间反距离权重矩阵,验证空间计量模型回归结果的稳健性,具体结果见表 4.15-表 4.17。

表 4.15 为替换核心解释变量的基准回归稳健性检验结果。将人口集聚的测度方法由人口地理集中度替换为人口密度,可以发现,替换核心解释变量后,人均碳排放的空间自回归系数值仍为正且通过了 1%水平的显著性检验,3 种模型人口集聚二次项系数仍显著为正,控制变量系数符号及显著性也未发生较大变化。

表 4.15 替换核心解释变量的基准回归稳健性检验结果

	(1)	(2)	(3)
	FE	RE	SDM
人口集聚	-2.0227*** (0.2969)	-1.9076*** (0.2931)	-1.6450*** (0.2791)
人口集聚二次项	0.0981*** (0.0155)	0.0932*** (0.0153)	0.0767*** (0.0146)
能源强度	0.9547*** (0.0076)	0.9448*** (0.0074)	0.9037*** (0.0081)
经济发展水平	0.8029*** (0.0158)	0.8112*** (0.0149)	0.7609*** (0.0162)
绿色创新水平	-0.0124*** (0.0041)	-0.0108*** (0.0041)	-0.0164*** (0.0047)
资本存量	0.0211** (0.0107)	0.0226** (0.0102)	0.0561*** (0.0177)
政府干预程度	0.0065 (0.0094)	0.0012 (0.0092)	-0.0109 (0.0096)
对外开放水平	0.0038 (0.0033)	0.0057* (0.0032)	0.0096*** (0.0033)
常数项	2.7606* (1.4216)	2.1214 (1.4028)	
ρ			0.3874*** (0.0904)
σ^2_e			0.0230*** (0.0005)
样本量	4064	4064	4064
R^2	0.8840	0.8839	0.4123

注: ***, **、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验,括号内为稳健标准误。

表 4.16 为替换空间权重矩阵的基准回归稳健性检验结果。利用空间经济地理距离权重矩阵替换空间反距离权重矩阵,可以发现,替换空间权重矩阵后,被解释变量的空间自回归系数值仍大于 0 且通过了 1%水平下的显著性检验,回归结果中关键变量系数的符号以及显著性也未发生明显变化。

表 4.16 替换空间权重矩阵的基准回归稳健性检验结果

	(1)	(2)	(3)
	FE	RE	SDM
人口集聚	-0.1202*** (0.0163)	-0.1059*** (0.0157)	-0.1654*** (0.0166)
人口集聚二次项	0.0929*** (0.0169)	0.0883*** (0.0166)	0.1066*** (0.0160)
能源强度	0.9554*** (0.0076)	0.9459*** (0.0074)	0.8957*** (0.0083)
经济发展水平	0.8325*** (0.0149)	0.8352*** (0.0141)	0.7564*** (0.0164)
绿色创新水平	-0.0100** (0.0042)	-0.0088** (0.0041)	-0.0146*** (0.0046)
资本存量	0.0182* (0.0108)	0.0200* (0.0103)	0.0010 (0.0167)
政府干预程度	0.0079 (0.0095)	0.0035 (0.0092)	-0.0097 (0.0094)
对外开放水平	0.0036 (0.0033)	0.0053 (0.0033)	0.0075** (0.0032)
常数项	-7.8715*** (0.1670)	-7.8176*** (0.1662)	
ρ			0.1044*** (0.0310)
σ^2_e			0.0230*** (0.0005)
样本量	4064	4064	4064
R^2	0.8829	0.8829	0.8091

注: ***, **、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验,括号内为稳健标准误。

表 4.17 为传导路径稳健性检验回归结果。其中,模型(1)和(2)为替换核心解释变量后得到的结果,将人口集聚的测度方法由人口地理集中度替换为人口

密度,人口集聚对产业结构升级与城市基础设施建设的影响仍然为正向的并且在1%的水平下显著;模型(3)和(4)为替换空间权重矩阵后得到的结果,将空间反距离权重矩阵替换为空间经济地理距离权重矩阵,发现人口集聚对产业结构升级与城市基础设施建设的影响仍然显著为正。因此,本文的研究结论相对稳健。

表 4.17 传导路径稳健性检验回归结果

	替换核心解释变量		替换空间权重矩阵	
	(1)	(2)	(3)	(4)
	产业结构升级	基础设施建设	产业结构升级	基础设施建设
人口集聚	0.0368*** (0.0120)	0.0443** (0.0185)	0.0309** (0.0123)	0.0483** (0.0187)
控制变量	控制	控制	控制	控制
ρ	0.7498*** (0.0522)	0.4203*** (0.0887)	0.1093*** (0.0300)	0.1166*** (0.0292)
sigma2_e	0.0123*** (0.0003)	0.0293*** (0.0007)	0.0128*** (0.0003)	0.0295*** (0.0007)
样本量	4064	4064	4064	4064
R^2	0.3539	0.3120	0.2961	0.2538

注: ***, **、*分别表示通过 1%、5%、10%水平下的显著性检验,括号内为稳健标准误。

5 研究结论与对策建议

5.1 研究结论

本文以 2006-2021 年中国 254 个地级及以上城市的面板数据为基础，首先，借鉴已有研究成果与理论基础，构建人口集聚对城市碳排放影响的理论机制并提出研究假设。其次，考虑多方面因素选择恰当方法测度人口集聚和城市碳排放，并从时序变化、区域差异、空间关联三个角度分析人口集聚和城市碳排放的现状。最后，以 STIRPAT 模型作为基准回归模型，在通过多重模型检验的基础上，选用空间杜宾模型等计量经济学方法实证分析人口集聚对城市碳排放的非线性影响及其传导路径；并按照城市的区位、行政区划等级、规模大小、发展进程的不同将全样本城市进行划分，进一步探讨不同特征城市人口集聚对城市碳排放影响的异质性。主要结论如下：

(1) 人口集聚会显著影响城市碳排放，并且呈“U”型非线性特征。研究期内，我国城市主要处在快速发展阶段和成熟发展阶段，快速发展阶段，也就是当人口集聚度未超过拐点时，人口集聚的规模效应和集聚效应的正外部性呈现，有利于资源有效配置和土地集约利用，对碳排放降低起到积极作用；当人口集聚度超过拐点时，城市发展建设宏观调控困难或缺乏宏观调控意识，人口增长速度快于建成区面积增长速度，城市拥挤效应显著，触碰到了城市环境承载力的压力线，甚至出现人口集聚的负外部性大于正外部性，碳排放增加；但现阶段大多数城市仍在拐点左侧，超过拐点的城市相对较少，人口集聚仍未对环境产生太大危害。

(2) 人口集聚会通过“人口集聚—产业结构升级—城市碳排放”、“人口集聚—基础设施建设—城市碳排放”两条路径影响城市碳排放。人口集聚通过影响产业结构升级的社会需求、科技进步、制度安排和资源供给等因素，提升产业结构规模、水平以及产业间的联系，促进产业结构升级，从而使得社会分工更加专业化、产业结构更加合理化和清洁化、优化资源配置效率，进而抑制碳排放。同时，人口集聚会通过改善城市内部的基础设施建设水平与外部的交通和信息可达性，提高人口流动和沟通的效率，优化资源配置，并产生学习效应、竞争效应，促进区域创新，抑制碳排放增长；但是，基础设施的建设会产生大量能源消耗，

并且区域可达性的提升会增加贸易和交通往来，从而增加碳排放总量。

(3) 不同特征城市人口集聚对碳排放的影响具有明显异质性。从不同区域来看，东部和中部地区人口集聚对城市碳排放均具有明显的抑制作用，而西部与东北地区受地理位置、产业结构、经济发展水平等因素的影响，所能承受的人口集聚程度较低，人口集聚与城市碳排放呈“U”型曲线关系；从行政区划等级来看，直辖市和副省级市人口集聚对城市碳排放具有显著抑制作用，而地级市由于存在城市行政管理权限和能力相对较低、城市建设和结构调整响应速度较慢、硬软件设施相对较差等问题，人口集聚对城市碳排放的抑制作用相对较差；从城市规模来看，大城市人口集聚对城市碳排放具有显著抑制作用，但超大特大城市已经积累了巨大的人口规模，人口集聚程度持续提升将会带来城市管理成本上升、规模经济达到瓶颈等拥挤效应，人口集聚对城市碳排放的抑制作用较差，而中小城市由于自身城市硬软件较差，无法承载太高的人口集聚程度，部分城市存在显著拥挤效应，人口集聚与城市碳排放呈“U”型曲线关系；从城市发展进程来看，工业化发展阶段的的城市人口集聚对城市碳排放具有抑制作用，而后工业化阶段的的城市第三产业占比高于第二产业，产业结构更为优化，人口集聚通过产业结构升级所发挥的正外部性效果相对较差，人口集聚对城市碳排放抑制作用相对较差。

5.2 对策建议

基于上述结论，本文提出以下对策建议，旨在为不同城市更大程度发挥人口集聚的正外部性并达到节能减排的目标提供借鉴与参考：

(1) 加强相邻区域协同管理，共同推动“碳减排”。城市碳排放具有显著空间相关性，人口集聚对城市碳排放的影响也具有显著的空间溢出效应，实现区域协同治理，是降低城市碳排放、实现“双碳”目标的重要措施。首先，建立共享资源机制和信息交流平台，实现数据共享和资源的有效利用，优化区域内资源配置，起到区域带动作用，促进技术共享和共同发展。其次，建立跨区域的环境保护合作机制，制定有约束力的管理和工作机制，明确细化相关责任主体和责任分工，确保规划、标准、监测、执法的一致性和可持续性，共同维护区域生态环境。最后，制定科学合理的跨区域政策和奖惩机制，根据区域协作目标制定动态考评体系，并实现全过程流程化管控，结合考评结果和实际经济发展状况给予补贴、

奖惩，有效推动相关政策落实。

(2) 推动以人为本的新型城镇化，实现城市可持续发展。现阶段我国城市层面人口集聚对碳排放的影响表现为“U”型的非线性影响，也就是说存在一个适度的城市人口集聚水平，推动以人为本的新型城镇化，能够有效调节人口和城市建设间的关系，维持城市适度人口集聚水平，从而实现经济发展和生态环境的双赢；同时，还能加大人口集聚的正外部性，提升城市人口集聚的容纳水平，推迟人口集聚拐点值的出现。一是，注重城市建设的综合规划，实现人口、土地、经济、环境等多角度考虑，优化区域、城乡用地结构，建设用地计划向发展潜力大、人口吸引力强的重点区域倾斜。二是，注重城市建设用地利用率的提升，降低新增用地比重，有控制的进行新增用地投放；优先盘活存量用地，通过立体开发、循环复合利用等多个方法，使地上地下空间、破旧房区和低效能区得到有效开发改造；优化用地结构，生产用地集中化，生活生态用地交错化，形成集约高效的生产、幸福宜居的生活和绿色美丽的生态空间，增强城市承载力。三是，注重管理理念的转变，从加强管理转向提升服务，完善各部门间协作机制，增强基本公共服务保障能力，对影响市民需求的相关问题作出快速响应和及时调整。

(3) 加大产业结构转型升级力度，推动低碳绿色产业发展。人口集聚能够通过推动产业结构升级，降低城市碳排放。如何最大化人口集聚对产业结构升级的影响，做好政策保障，加大产业结构升级力度，提高能源利用效率，是城市低碳发展过程中不可忽视的重要一环。一方面要加强战略性新兴产业培育，合理利用人口集聚所带来的资本、人口等重要要素，捕捉市场需求多样性背后蕴含的商机，推动传统产业现代化、智能化发展，与社会需求和数字经济协同发展，实现智能化和数字化低碳转型。另一方面要加大相关政策支持，加大技术研发资金支持，提供贷款、补贴金融支持，降低企业升级转型的成本，鼓励企业增加技术投入，促进产学研合作，推动技术成果转化，实现产业结构升级。

(4) 实施符合自身城市特点的人口管理政策，通过人口集聚实现经济发展和节能减排的双赢。对于不同特征城市，人口集聚对城市碳排放的影响具有显著异质性，只有实施符合自身城市特点的人口管理政策，才能在推动经济发展的同时助力“双碳”目标的实现。大城市和处于工业化发展阶段的的城市，人口集聚能够有效抑制城市碳排放，在进行人口管理时应重“聚人口”而轻“引人才”，以

人为本，提升当地社会公共服务水平，优化人口落户政策，吸引人口流入，发挥人口集聚提升带来的经济增长和碳减排效应；而对于超大特大城市和处于城市化发展阶段的城市，人口集聚对城市碳排放的抑制作用相对减弱甚至不明显，则应重“引人才”而轻“聚人口”，更加注重人才的引进与培养，加大人才引进力度，制定相关人才引进政策，配套人才培养和晋升体系，发挥人才效用。

参考文献

- [1] Baron R.M., Kenny D.A. The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: conceptual, strategic, and statistical considerations[J]. *Journal of Personality and Social Psychology*,1986,51(6):1173-1182.
- [2] Chen J., Wang B., Huang S., et al. The Influence of Increased Population Density in China on Air Pollution[J]. *Science of the Total Environment*,2020,735:139456.
- [3] Cheng L., Mi Z., Sudmant A., et al. Bigger Cities Better Climate? Results from an Analysis of Urban Areas in China[J]. *Energy Economics*,2022,107:105872.
- [4] Dietz T., Rosa E.A. Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence and Technology[J]. *Human Ecology Review*,1994,1(2):277-300.
- [5] Elhorst J.P. *Spatial econometrics: from cross-sectional data to spatial panels*[M]. Heidelberg: Springer,2014.
- [6] Grossman G.M., Krueger A.B. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement[J]. *National Bureau of Economic Research*,1991,(11):3914.
- [7] Gudipudi R., Fluschnik T., Ros A.G.C., et al. City Density and CO₂ Efficiency[J]. *Energy Policy*,2016,91:352-361.
- [8] Krugman P. *Geography and Trade*[M]. Washington, USA,1991.
- [9] Lewis W.A. Economic Development with Unlimited Supplies of Labour[J]. *The Manchester School*,1954,22(2):139-191.
- [10] Otsuka A. Regional Determinants of Energy Efficiency: Residential Energy Demand in Japan[J]. *Energies*,2018,11:1557.
- [11] Ozcan B. The nexus between carbon emissions, energy consumption and economic growth in middle East countries: a panel data analysis[J]. *Energy policy*,2013,62:1138-1147.
- [12] Wang S., Li K., Liang S., et al. An integrated method for the control factor identification of resources and environmental carrying capacity in coastal zones: A case study in Qingdao, China[J]. *Ocean & Coastal Management*,2017,142:90-97.
- [13] Weber A. *Theory of the Location of Industries*[M]. Berlin, Germany,1909.

- [14] Xie R., Fang J., Liu C. The effects of transportation infrastructure on urban carbon emissions[J]. *Applied Energy*,2017,196:199-207.
- [15] 曹琳剑,王杰,王欢欢,等.京津冀基础设施建设与人口集聚耦合演进分析——基于推拉理论解析[J].*地理科学*,2019,39(8):1256-1264.
- [16] 柴志贤.密度效应、发展水平与中国城市碳排放[J].*经济问题*,2013,(3):25-31.
- [17] 陈东景,刘卫毅.人口集聚与生态福利绩效:效应与机制[J].*西北人口*,2023,44(3):12-26.
- [18] 陈飞,沈世芳,李永贺,等.城市密度对空间碳绩效的影响——以上海市为例[J].*城市问题*,2022,(2):96-103.
- [19] 陈乐,李郁,姚尧,等.人口集聚对中国城市经济增长的影响分析[J].*地理学报*,2018,73(6):1107-1120.
- [20] 陈淑云,杨建坤.人口集聚能促进区域技术创新吗——对 2005-2014 年省级面板数据的实证研究[J].*科技进步与对策*,2017,34(5):45-51.
- [21] 陈银娥,孙琼.中国基础设施发展水平测算及影响因素——基于省级面板数据的实证研究[J].*经济地理*,2016,36(8):23-30.
- [22] 崔鑫生,韩萌,方志.动态演进的倒"U"型环境库兹涅茨曲线[J].*中国人口·资源与环境*,2019,29(9):74-82.
- [23] 邓仲良,张可云.中国经济增长的空间分异为何存在?——一个空间经济学的解释[J].*经济研究*,2020,55(4):20-36.
- [24] 杜海波,魏伟,张学渊,等.黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据[J].*地理研究*,2021,40(7):2051-2065.
- [25] 葛立宇,莫龙炯,黄念兵.数字经济发展、产业结构升级与城市碳排放[J].*现代财经(天津财经大学学报)*,2022,42(10):20-37.
- [26] 何文举,张华峰,陈雄超,等.中国省域人口密度、产业集聚与碳排放的实证研究——基于集聚经济、拥挤效应及空间效应的视角[J].*南开经济研究*,2019,(2):207-225.
- [27] 侯佳伟.从七次全国人口普查看我国人口发展新特点及新趋势[J].*学术论坛*,2021,44(5):1-14.

- [28] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济, 2022, (5): 100-120.
- [29] 姜泽华, 白艳. 产业结构升级的内涵与影响因素分析[J]. 当代经济研究, 2006, (10): 53-56.
- [30] 金贵朝, 王国梁, 何怡然. 数字化水平、产业结构调整与区域碳减排[J]. 统计与决策, 2023, 39(3): 27-32.
- [31] 金瑞庭, 王桂新. 中国人口城市化与碳排放关系的实证研究——基于 1978 年-2009 年时间序列数据的计量检验[J]. 人口与发展, 2013, 19(1): 38-43.
- [32] 李成友, 孙涛, 焦勇. 要素禀赋、工资差距与人力资本形成[J]. 经济研究, 2018, 53(10): 113-126.
- [33] 李健, 张嘉怡. 人口集聚视角下环境规制对碳排放的影响研究——基于京津冀 13 个城市面板数据[J]. 西北人口, 2023, 44(4): 54-63.
- [34] 李晓阳, 鄢晓凤, 罗超平, 等. 长三角人口集聚与产业结构高级化的互动关系研究[J]. 华东经济管理, 2020, 34(1): 18-27.
- [35] 李云燕, 张硕. 中国城市碳排放强度时空演变与影响因素的时空异质性[J]. 中国环境科学, 2023, 43(6): 3244-3254.
- [36] 梁伟, 杨明, 李新刚. 集聚与城市雾霾污染的交互影响[J]. 城市问题, 2017, (9): 83-93.
- [37] 梁永福, 游少莹, 刘宝欣. 人口集聚、人力资源匹配与产业升级[J]. 西北人口, 2023, 44(05): 84-97.
- [38] 刘斌, 甄洋. 数字贸易规则与研发要素跨境流动[J]. 中国工业经济, 2022, (7): 65-83.
- [39] 刘睿文, 封志明, 杨艳昭, 等. 基于人口集聚度的中国人口集疏格局[J]. 地理科学进展, 2010, 29(10): 1171-1177.
- [40] 刘西涛, 王盼. 人口集聚、空气污染与经济可持续发展——基于中国 266 个地级以上城市的空间计量分析[J]. 科学决策, 2022, (11): 81-93.
- [41] 陆铭. 城市、区域和国家发展——空间政治经济学的现在与未来[J]. 经济学(季刊), 2017, 16(4): 1499-1532.
- [42] 陆铭. 教育、城市与大国发展——中国跨越中等收入陷阱的区域战略[J]. 学术

- 月刊,2016,48(1):75-86.
- [43] 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.
- [44] 任喜萍,殷仲义.中国省域人口集聚、公共资源配置与服务业发展时空耦合及驱动因素[J].中国人口·资源与环境,2019,29(12):77-86.
- [45] 任晓松,刘宇佳,赵国浩.经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制[J].中国人口·资源与环境,2020,30(4):95-106.
- [46] 邵帅,范美婷,杨莉莉.经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J].管理世界,2022,38(2):46-69.
- [47] 孙猛,费不凡.人口集聚与碳排放:基于空间溢出效应视角的经验考察[J].人口学刊,2022,44(5):72-85.
- [48] 田成诗,陈雨.人口虹吸、集聚与城市能源效率——以沪苏浙皖地区为例[J].统计研究,2022,39(5):93-106.
- [49] 万伦来,左悦.产城融合对区域碳排放的影响——基于经济转型升级的中介作用[J].安徽大学学报(哲学社会科学版),2020,44(5):114-123.
- [50] 王风云.京津冀人口集聚对能源消费的影响[J].人口与经济,2020,(2):12-25.
- [51] 王桂新.中国人口流动与城镇化新动向的考察——基于第七次人口普查公布数据的初步解读[J].人口与经济,2021,(5):36-55.
- [52] 王俊,李佐军.拥挤效应、经济增长与最优城市规模[J].中国人口·资源与环境,2014,24(7):45-51.
- [53] 王巧然.城市化对碳生产率的阶段性效应及其区域分异特征研究——来自中国地级市的证据[J].技术经济,2021,40(12):61-73.
- [54] 王兴杰,谢高地,岳书平.经济增长和人口集聚对城市环境空气质量的影响及区域分异——以第一阶段实施新空气质量标准的 74 个城市为例[J].经济地理,2015,35(2):71-76.
- [55] 王永进,张国峰.人口集聚、沟通外部性与企业自主创新[J].财贸经济,2015,(5):132-146.
- [56] 王玥.人口集聚会促进产业结构升级吗? ——基于中国 285 个城市的实证研

- 究[J].安徽大学学报(哲学社会科学版),2018,42(3):133-139.
- [57] 王智勇.人口集聚与区域经济增长——对威廉姆森假说的一个检验[J].南京社会科学,2018,(3):60-69.
- [58] 吴建新,郭智勇.基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析[J].统计研究,2016,33(1):54-60.
- [59] 吴振华.城市化、人力资本集聚与产业结构调整[J].经济体制改革,2020,(1):59-65.
- [60] 项本武,张亚丽.基于环境友好视角的中国最优城市规模研究——来自DMSP/OLS 夜间灯光数据的经验证据[J].中国地质大学学报(社会科学版),2017,17(3):74-84.
- [61] 肖周燕,李慧慧,孙乐.人口与工业集聚对生产和生活污染的影响及空间溢出[J].长江流域资源与环境,2022,31(4):851-861.
- [62] 肖周燕.中国人口空间聚集对生产和生活污染的影响差异[J].中国人口·资源与环境,2015,25(3):128-134.
- [63] 谢云飞.数字经济对区域碳排放强度的影响效应及作用机制[J].当代经济管理,2022,44(2):68-78.
- [64] 徐辉,杨焯.人口和产业集聚对环境污染的影响——以中国的 100 个城市为例[J].城市问题,2017,(1):53-60.
- [65] 徐英启,程钰,王晶晶等.中国低碳试点城市碳排放效率时空演变与影响因素[J].自然资源学报,2022,37(5):1261-1276.
- [66] 许庆明,胡晨光,刘道学.城市群人口集聚梯度与产业结构优化升级——中国长三角地区与日本、韩国的比较[J].中国人口科学,2015,(1):29-37.
- [67] 闫东升,何甜,陈雯.人口聚集、经济扩散及其不一致状况——来自长江三角洲的经验研究[J].经济地理,2017,37(9):47-56.
- [68] 杨东亮,李朋骞.人口集聚的经济效应: 基于工具变量的实证研究[J].人口学刊,2019,41(3):28-37.
- [69] 杨东亮,任浩锋.中国人口集聚对区域经济发展的影响研究[J].人口学刊,2018,40(3):30-41.
- [70] 易艳春,高爽,关卫军.产业集聚、城市人口规模与二氧化碳排放[J].西北人

- 口,2019,40(1):50-60.
- [71] 于潇,王琪汇.人口集聚、人才集聚与人力资本效率——基于流动人口的视角[J].经济问题探索,2021,(11):67-80.
- [72] 于潇,徐英东.人口集聚对创业活跃度的影响:考虑集聚动态的效应与路径[J].中国人口·资源与环境,2022,32(9):151-163.
- [73] 张翠菊,张宗益.产业和人口的空间集聚对中国区域碳排放强度的影响[J].技术经济,2016,35(1):71-77.
- [74] 张恒硕,李绍萍,彭民.中国农村能源消费碳排放区域非均衡性及驱动因素动态识别[J].中国农村经济,2022,(1):112-134.
- [75] 张思思,马晓钰,熊江玲等.人口集聚对城市韧性的影响探究[J].西北人口,2023,44(1):76-90.
- [76] 张同斌.从数量型“人口红利”到质量型“人力资本红利——兼论中国经济增长的动力转换机制[J].经济科学,2016,(5):5-17.
- [77] 张悦,王晶晶,程钰.中国工业碳排放绩效时空特征及技术创新影响机制[J].资源科学,2022,44(7):1435-1448.
- [78] 张卓群,张涛,冯冬发.中国碳排放强度的区域差异、动态演进及收敛性研究[J].数量经济技术经济研究,2022,39(4):67-87.
- [79] 赵涛,张智,梁上坤.数字经济、创业活跃度与高质量发展:来自中国城市的经验证据[J].管理世界,2020,36(10):65-76.
- [80] 钟粤俊,陆铭,奚锡灿.集聚与服务业发展——基于人口空间分布的视角[J].管理世界,2020,36(11):35-49.
- [81] 周迪,刘奕淳.中国碳交易试点政策对城市碳排放绩效的影响及机制[J].中国环境科学,2020,40(1):453-464.
- [82] 周健,王淑婧,高琴,等.人口特征、经济增长与碳排放的关系研究[J].武汉大学学报(哲学社会科学版),2015,68(2):94-101.
- [83] 周玉龙,孙久文.产业发展从人口集聚中受益了吗?——基于 2005-2011 年城市面板数据的经验研究[J].中国经济问题,2015,(2):74-85.

后记

这三年的研究生生活，宛如一场转瞬即逝的时光流淌。依稀记得当初被录取时的喜悦，以及刚开学时对新环境、新学校和新同学的好奇心和探索欲。回首这段时光，无论是初年的基础理论学习、论文系统撰写的初次尝试，还是随后的专业知识深造、期刊论文的书写，以及最近一年毕业论文的艰辛创作和未来职业的探索，都是我生命中宝贵的历程，塑造着未来的自我。

首先，我要衷心感谢我的导师张永凯教授。在论文写作上，张老师时刻与我们保持沟通，提供了许多宝贵的建议，从选题到文章思路再到修改，都给予了充分的指导，鼓励我们深入阅读文献并完成论文。在生活上，张老师时刻关注大家近况，关心大家的身心健康，是温暖的大家长。在学业上，张老师坚持每周组织组会，答疑解惑，甚至经常在深夜为我们指导论文，是一位值得尊敬的导师、我们学习的榜样。祝愿张老师工作顺利、身体健康。

其次，我要感谢在读研期间给予过帮助的老师、同学和朋友们。感谢疫情期间老师们的无私奉献和课程上的悉心教诲，均让我受益匪浅。感谢师兄师姐、师弟师妹们在论文写作和生活上的耐心指导和帮助，虽然因为各种原因沟通时间有限，但真的很想念在一起的每一分每一秒。感谢王玲、董宇、杨泽赟和毕潇梅同学在学业和生活上的合作与支持，一起探索兰州美食美景，共绘了许多美好回忆。希望大家都能迎来美好的未来，心想事成，平安喜乐。

最后，感谢我的父母、家人和男友。谢谢你们一直以来的支持、鼓励和陪伴。因为有你们做我坚实的后盾，我才能勇往直前，不断挑战自我，实现自我。

黄河之滨一金城兰州，不仅有着美丽的风景和诱人的美食，更有兰州财经大学浓厚的学术氛围和优秀的教师团队。这些珍贵的经历将永远留存在我的心中，希望兰财、兰财经济学院日益繁荣。