

基于面板数据模型的环渤海区域碳排放达峰机制分析

田子怡¹, 王传会¹, 刘 虎²

¹曲阜师范大学经济学院, 山东 日照

²日照市交通运输局, 山东 日照

收稿日期: 2024年3月7日; 录用日期: 2024年3月26日; 发布日期: 2024年4月16日

摘要

随着全球气候变化问题的日益严峻, 各国都在寻求减少碳排放的有效途径。中国作为世界上最大的碳排放国, 其实现碳排放达峰的目标对全球碳减排至关重要。本文聚焦于环渤海区域, 采用面板数据模型, 结合经济增长、能源消耗、产业结构、人口规模、技术进步等因素对碳排放的影响, 分析并探讨了这些因素在不同省份和城市间的差异性以及环渤海区域碳排放达峰机制。研究发现, 环渤海区域的碳排放与经济增长之间存在“倒U形”关系, 与能源消耗、产业结构和人口规模之间存在正向关系, 而与技术进步之间存在负向相关。同时, 区域内不同省份在碳排放强度、能源消耗和产业结构方面存在显著差异, 这对制定区域性减排策略具有重要意义。此外, 本文基于模型结果还提出了相应的政策建议, 包括优化能源结构、促进产业升级转型、加强技术创新和实施差异化的区域减排策略, 这对实现环渤海区域乃至全国低碳发展具有重要意义。

关键词

环渤海区域, 碳排放, 面板数据模型, 影响因素, 碳达峰

Analysis of Carbon Emission Peaking Mechanism in the Bohai Rim Region Based on Panel Data Model

Ziyi Tian¹, Chuanhui Wang¹, Hu Liu²

¹School of Economics, Qufu Normal University, Rizhao Shandong

²Rizhao City Transportation Bureau, Rizhao Shandong

Received: Mar. 7th, 2024; accepted: Mar. 26th, 2024; published: Apr. 16th, 2024

Abstract

As the severity of global climate change intensifies, countries worldwide are seeking effective ways to reduce carbon emissions. China, as the largest carbon emitter globally, plays a crucial role in the global effort to peak and reduce carbon emissions. This study focuses on the Bohai Rim region and employs a panel data model to analyze the impacts of economic growth, energy consumption, industrial structure, population size, and technological progress on carbon emissions. It explores the variations of these factors across different provinces and cities and their mechanisms in peaking carbon emissions in the Bohai Rim area. The findings indicate a “reverse U-shaped” relationship between carbon emissions and economic growth in the region. There is a positive correlation with energy consumption, industrial structure and population size, and a negative correlation with technological progress in the Bohai Rim region. Significant regional differences in carbon emission intensity, energy consumption, and industrial structure within the area highlight the importance of tailored regional emission reduction strategies. Furthermore, the study proposes policy recommendations based on its findings, including optimizing energy structure, promoting industrial upgrading, enhancing technological innovation, and implementing differentiated regional emission reduction strategies, which are vital for achieving low-carbon development in the Bohai Rim region and nationwide.

Keywords

The Bohai Rim Region, Carbon Emissions, Panel Data Model, Influencing Factors, Carbon Peak

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

全球气候变化是当今世界面临的最严峻的环境挑战之一，其对生态系统、经济发展和人类福祉的影响日益显著。作为全球气候变化的主要影响因素之一，碳排放的控制和减少已成为国际社会的共同关注点。中国，作为世界上最大的碳排放国，其在全球减排努力中扮演着关键角色。中国政府已承诺于 2030 年前实现碳排放达峰，并努力实现 2060 年碳中和目标。在这一背景下，探究我国各区域碳排放达峰机制具有重要的理论和实践意义。

环渤海区域，包含京津冀协同区、辽宁老工业基地、内蒙古和山西资源型地区、山东省碳排放大省，是中国北方最重要的经济圈之一。这一区域不仅在中国的政治、经济、文化和科技发展中占据重要地位，而且是中国重要的工业基地和能源消费大户。随着经济的快速发展，环渤海区域的能源消耗和碳排放量也迅速增长，对区域乃至全国的环境质量和气候变化目标产生了显著影响。然而，环渤海区域在碳排放和经济发展之间的平衡问题上面临着独特的挑战。一方面，环渤海区域内的重工业和能源密集型产业对碳排放的贡献较大；另一方面，环渤海区域内的经济转型和产业升级对减少碳排放提出了新的要求。因此，深入分析环渤海区域的碳排放特征和达峰机制，对于制定有效的区域减排策略和实现国家碳中和目标具有重要意义。

1.2. 研究意义

本文旨在通过面板数据模型，分析环渤海区域碳排放的影响因素以及这些因素在不同省份和城市间的差异性，探讨碳排放达峰机制，并提出相应的政策建议，具有一定的研究意义，下面将围绕其理论意义及实际意义展开。

第一，运用产业经济学、能源经济学、计量经济学等学科的理论和方法，比较分析环渤海区域间碳排放量，探究实现环渤海区域碳排放达峰机制。并且通过构建的环渤海区域碳排放达峰机制模型能够丰富区域乃至全国低碳经济问题的研究方法，能够促进区域碳排放总量控制机制的有序建立，为实现区域低碳发展提供理论支持。

第二，基于低碳发展的迫切需要，通过预测环渤海区域碳排放峰值的大小和时间，分析各影响因素对环渤海区域碳排放达峰的影响，为实现环渤海区域碳排放达峰及制定相关政策提供数据支持。同时可以促进各区域乃至全国经济的持续健康发展和实现生态文明。

鉴于中国在全球碳排放中的重要地位，环渤海区域碳排放的有效控制对于全球气候变化的应对具有重要意义。还可以为其他国家和地区提供宝贵的经验和启示，特别是对于那些面临类似工业结构和环境挑战的地区，通过分享环渤海区域的案例研究，可以帮助其他国家更好地理解和应对碳排放问题。

2. 文献综述

2.1. 基于碳排放影响因素的相关研究

国内外学者多采用计量经济模型方法碳排放的影响因素，主要研究了碳排放量与经济、人口、技术进步、相关政策等变量之间的关系。Casler 和 Rose (1998)与 Davis 等(2003)研究发现能源消费结构和能源效率的变化是影响美国碳排放变化的主要因素[1] [2]。Ang 和 Pandiyan (1997)研究发现中国 20 世纪 80 年代制造业碳强度的下降主要是由子部门能源强度的变化引起的[3]。Ilhan 和 Ali (2013)研究认为，随着能源消耗的降低，碳排放减少[4]。公维凤等(2021)认为不同驱动因素的碳排放量弹性系数存在差异，经济快速增长是各省(区)碳排放量增加的主要驱动因素，碳排放与经济增长之间存在明显的倒 U 形库兹涅茨曲线[5]。崔艳芳和张国兴(2023)研究发现人口规模、人均 GDP、城镇化率和单位 GDP 能耗对碳排放量的增加有促进作用，产业结构优化对碳排放量的增加有抑制作用；不同情景下的资源型城市碳排放量差异较大[6]。邓光耀(2023)发现人口数量的增长、城镇化率的提升、人均 GDP 的增长均会导致能源消费碳排放提高，但是产业结构升级指数的上升、对外贸易依存度的上升以及能源强度的下降均有助于降低能源消费碳排放[7]。刘元欣等(2024)基于 ST-IDA 模型(时空指数分解分析法)和 LMDI (对数平均迪氏指数法)分解法研究发现能源强度效应是影响碳排放空间差异的主要因素，人口规模扩张、经济发展水平提高和能源强度上升是促进碳排放增长的主要因素，产业结构和能源消费结构优化起到抑制作用[8]。

2.2. 基于碳排放区域差异的相关研究

Zhou 和 Ang (2008)运用对数平均迪氏指数分解方法分析了 OECD 不同地区间碳排放差异的成因，认为技术变化是影响碳排放变化的重要因素[9]。王长建和张利(2012)认为山东能源强度的降低和能源消费结构的优化能够减少碳排放[10]。袁鹏和程施(2012)发现经济规模的扩大是辽宁省碳排放增加的决定性因素，产业结构的重型化也起到了一定的增排作用，而能源效率的提高在很大程度上抑制了碳排放增长，且能源替代效应对碳排放抑制作用不明显[11]。梁红梅(2014)、武娴等(2015)发现环渤海地区碳排放量呈逐年上升趋势，认为经济发展和能源强度对环渤海地区碳排放分别具有最强的拉动效应和抑制效应，能源结构和人口规模对该区碳排放的影响较小[12] [13]。张卓群等(2022)研究发现全国城市及各重大战略区

域碳排放强度出现显著下降,整体上表现出明显的“南低北高”空间格局[14]。董紫媛和张朝辉(2024)认为中国城市居住碳排放的区域内差异分布空间格局在 2010~2019 年没有发生显著变化;经济发展程度越高的地区,区域内居住碳排放的差异越小,且收入水平对城市居住碳排放的影响呈现出显著的倒“U”型特征[15]。

2.3. 基于碳排放峰值预测的相关研究

朱宇恩等(2016)认为在山西省当前能源与结构状态下,相较于可再生能源年替代率,年 GDP 增速和年节能率对山西省中长期碳排放影响更为显著,是 2030 年达到碳排放峰值年的关键控制指标[16]。C Shi 和 X Feng (2021)从多目标决策和信息融合处理的角度对碳峰值进行预测,结果表明我国石油碳排放的下降趋势将得到控制[17]。李雪婷(2023)认为基准情景和弱减排情景均不能实现 2030 年达峰的预期目标,山东省需要参考强减排情景对相关政策做出调整来控制能源消耗所产生的碳排放,才能尽早达峰,从而实现长期碳中和目标[18]。Lu H 等(2023)基于灰色预测模型和改进的 IPCC 方法对 2021 年至 2030 年的碳排放量进行预测,结果表明中国在实现 2030 年碳达峰目标方面面临着巨大的挑战和困难[19]。Liu X 等(2023)认为在基准情景下,中国不太可能在 2030 年前达到碳峰值。在监管情景下,中国可以在 2030 年前达到碳排放峰值。在适度进行产业结构和能源结构转型的同时,加快人口、GDP 和城镇化的增长速度是实现“2030 年碳达峰”目标的有效途径[20]。

2.4. 文献评述

国内外学者围绕碳排放的影响因素与碳排放峰值的实现等相关问题取得了丰富的研究成果,为展开本文的研究拓宽了视野,提供了有益借鉴。多数文献主要分析各因素对碳排放的影响程度或贡献度,而这些影响因素(如经济增长、产业结构、能源消费、能源结构等)之间是相互联系和相互作用的,鲜有文献将这些因素纳入到同一个框架中,系统分析这些影响因素对区域碳排放峰值的影响。本文将区域经济增长、能源结构、产业结构、技术进步等影响因素纳入到一个框架内,进行系统优化分析,探究区域内部各地区之间如何协同减排,才能实现整体区域碳排放联动达峰。据此,为制定区域差别化碳减排政策提供科学依据。

3. 研究现状

3.1. 环渤海区域碳排放发展现状

环渤海区域,位于中国东北部,涵盖北京、天津两大直辖市以及河北、辽宁、山东、山西和内蒙古的中部地区,包括五个省(区)和两个市。这一区域是中国经济发展的关键区域,以其密集的人口和发达的工业基础而闻名,主要产业涉及重工业(如钢铁、化工)、制造业、高新技术产业和服务业等。这些产业在推动区域经济发展方面发挥着重要作用,但同时也是该区域碳排放的主要来源。

通过分析 2014 至 2021 年环渤海区域的碳排放量及其增长速度(如图 1 和表 1 所示),可以发现天津市和北京市的碳排放量变化较小。相比之下,河北省、山东省和辽宁省的增长幅度相对较低,而山西省和内蒙古自治区的增长速度则明显快于其他地区。

从环渤海区域内各省市的碳排放强度来看(如图 2 所示),各地区的减少碳排放的效果明显,但内蒙古自治区碳排放强度相较于其他省市仍然很大。

3.2. 环渤海区域碳排放影响因素的发展现状

随着环保意识的增强和全球气候变化的挑战,环渤海区域正面临着由传统重工业向更清洁、可持续

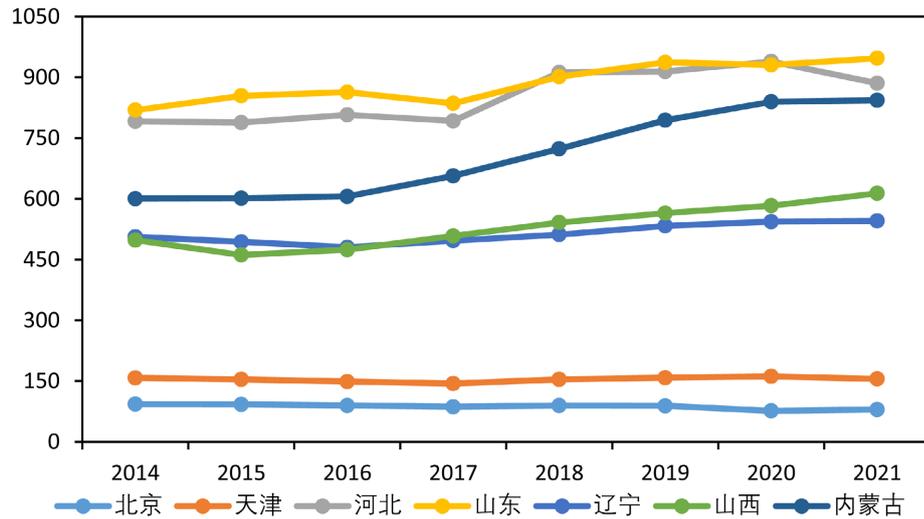


Figure 1. Carbon emissions in the Bohai Rim region from 2014 to 2021 (unit: millions of tons)
图 1. 2014~2021 年环渤海区域碳排放量(单位: 百万吨)

Table 1. The growth rate of carbon emissions in the Bohai Rim region from 2014 to 2021
表 1. 2014~2021 年环渤海区域碳排放量增长速度

	北京	天津	河北	山东	辽宁	山西	内蒙古
增长速度	-0.54%	-2.38%	-0.38%	4.32%	-2.46%	-7.37%	0.16%
	-3.00%	-3.50%	2.43%	1.05%	-2.73%	2.81%	0.76%
	-3.57%	-3.33%	-1.89%	-3.20%	3.40%	7.17%	8.37%
	3.37%	7.19%	15.13%	7.88%	3.05%	6.51%	10.16%
	-0.57%	2.68%	0.22%	3.93%	4.18%	4.28%	9.77%
	-13.90%	2.15%	2.75%	-0.69%	1.96%	3.26%	5.72%
	4.14%	-3.90%	-5.73%	1.78%	0.33%	5.23%	0.44%
年均增速	-2.01%	-0.16%	1.79%	2.15%	1.11%	3.13%	5.05%

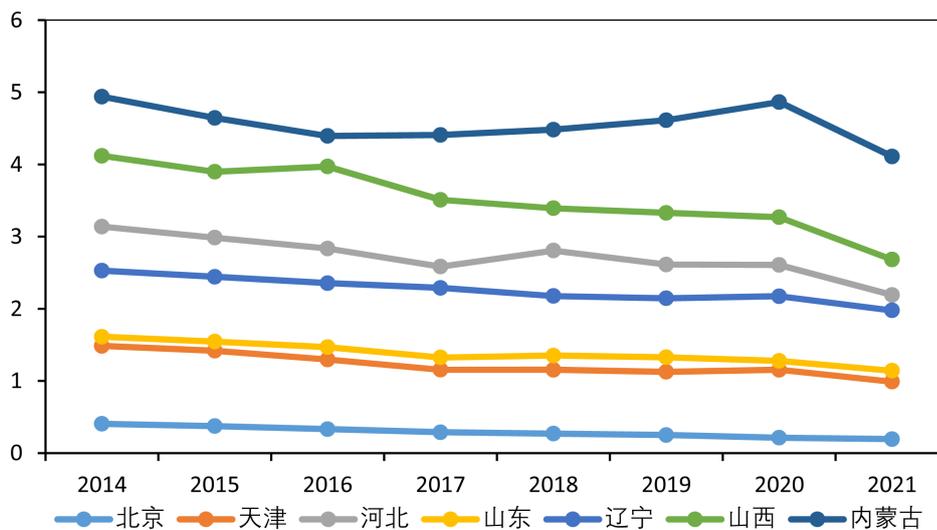


Figure 2. Carbon emission intensity in the Bohai Rim region from 2014 to 2021 (unit: tons/10,000 yuan)
图 2. 2014~2021 年环渤海区域碳排放强度(单位: 吨/万元)

产业结构的转型。这一地区快速的城市化进程引发了交通拥堵和空气污染等一系列环境问题，从而对碳排放控制提出了更高的要求。因此，对环渤海区域碳排放的影响因素进行深入分析和研究显得尤为重要。

3.2.1. 经济增长因素发展现状

从经济增长因素来分析(如图 3、图 4 所示)，从 2014 年到 2021 年五省二市的经济均呈现增长趋势，在此期间，山东省的 GDP 显著高于其他省市。然而，考虑到人均 GDP，北京市远超其他地区，天津市的总 GDP 虽不及其他省市，但其人均 GDP 却超过了河北、山东、辽宁、山西和内蒙古。

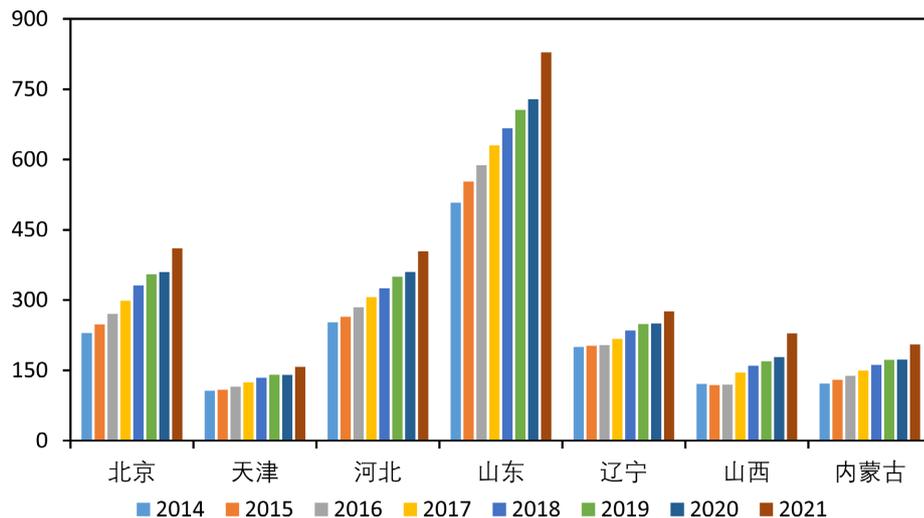


Figure 3. GDP of each province and city in the Bohai Rim region (unit: billions of yuan)

图 3. 环渤海区域各省市 GDP(单位: 百亿元)

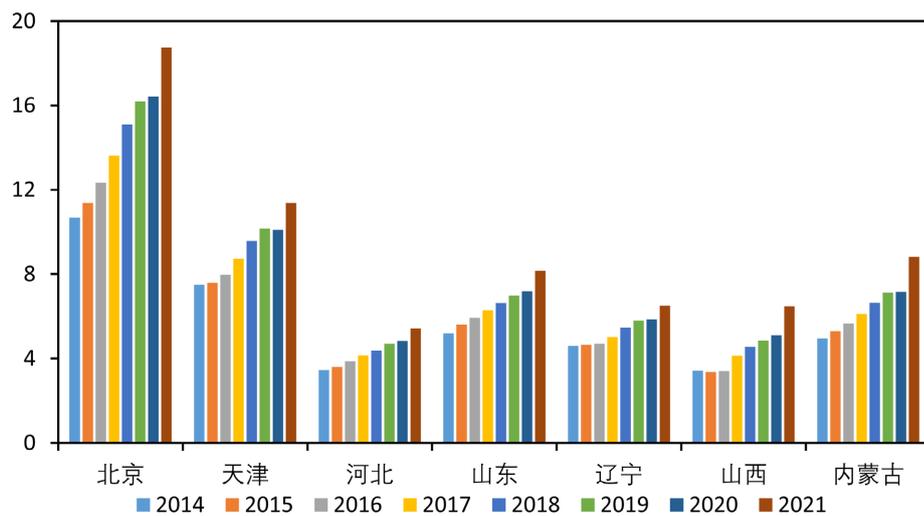


Figure 4. Per capita GDP of each province and city in the Bohai Rim region (unit: 10,000 yuan)

图 4. 环渤海区域各省市人均 GDP (单位: 万元)

3.2.2. 能源增长因素发展现状

从能源消费总量角度(如图 5 所示)来看，北京市、天津市、河北省和山西省的能源消费总量基本保持稳定，变化幅度不大。相比之下，山东省、辽宁省和内蒙古自治区的能源消费总量呈现增长态势，尤其是内蒙古自治区的增长幅度最为显著。

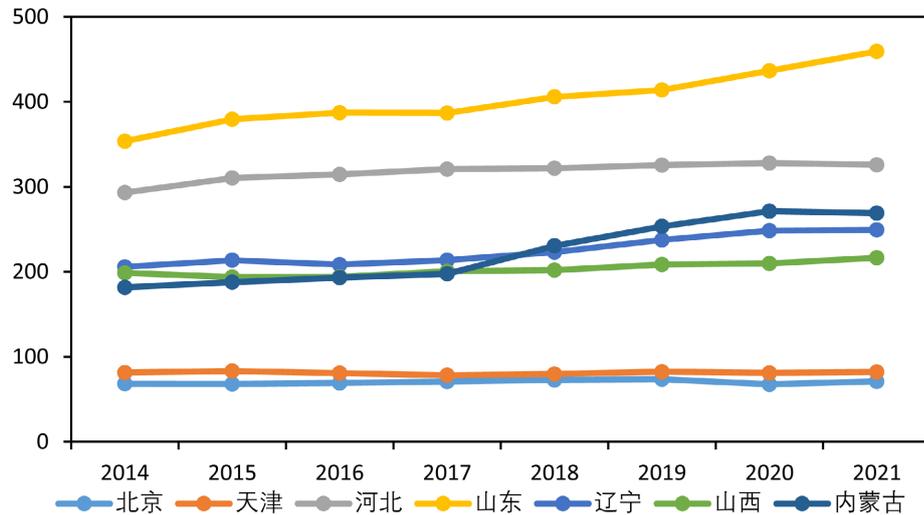


Figure 5. Total energy consumption in the Bohai Rim region from 2014 to 2021 (unit: millions of tons of standard coal)
图 5. 2014~2021 年环渤海区域能源消费总量(单位: 百万吨标准煤)

3.2.3. 产业结构因素发展现状

从产业结构角度来分析(如图 6、图 7 所示), 环渤海区域各地区除北京市外的第三产业占比基本在 40%~65%之间, 北京市相较于其他地区第三产业占比为 80%~85%之间, 同时北京市的第二产业占比远低于其他省市第二产业所占 GDP 的比重。而其他省市第二产业占比在 35%~55%之间, 且第二产业属于高碳排放行业, 因此, 逐步降低其在经济中的比重将有助于显著减少二氧化碳的总排放量, 环渤海区域迫切需要转变经济发展模式, 以改善该地区日益恶化的空气质量。

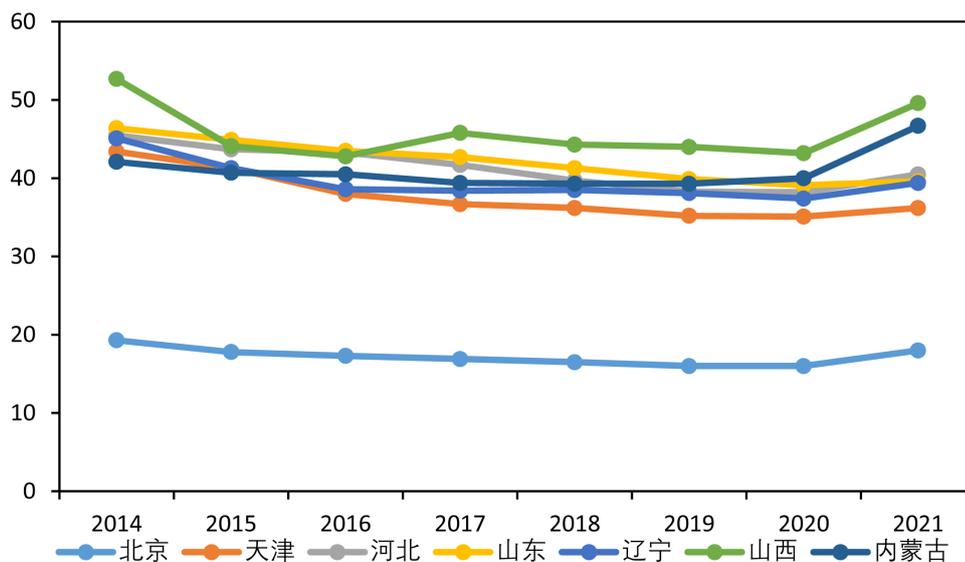


Figure 6. The proportion of the secondary industry in GDP of various provinces and cities in the Bohai Rim region (unit: %)
图 6. 环渤海区域各省市第二产业占 GDP 比重(单位: %)

3.2.4. 人口规模因素发展现状

从人口规模角度来看(如图 8、图 9 所示), 山东省人口数量居于环渤海区域第一位, 但其城镇化率不高。北京和天津的人口总量虽不多, 但城镇化率显著高于其他五省。同时, 这五省的城镇化率也呈现出

逐年上升的趋势。

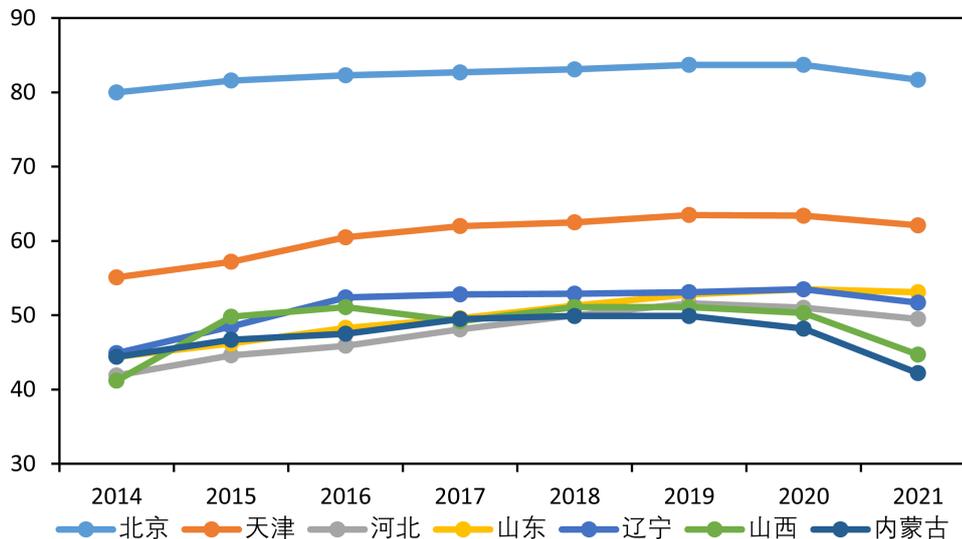


Figure 7. The proportion of the tertiary industry in GDP of various provinces and cities in the Bohai Rim region (unit: %)
图 7. 环渤海区域各省市第三产业占 GDP 比重(单位: %)

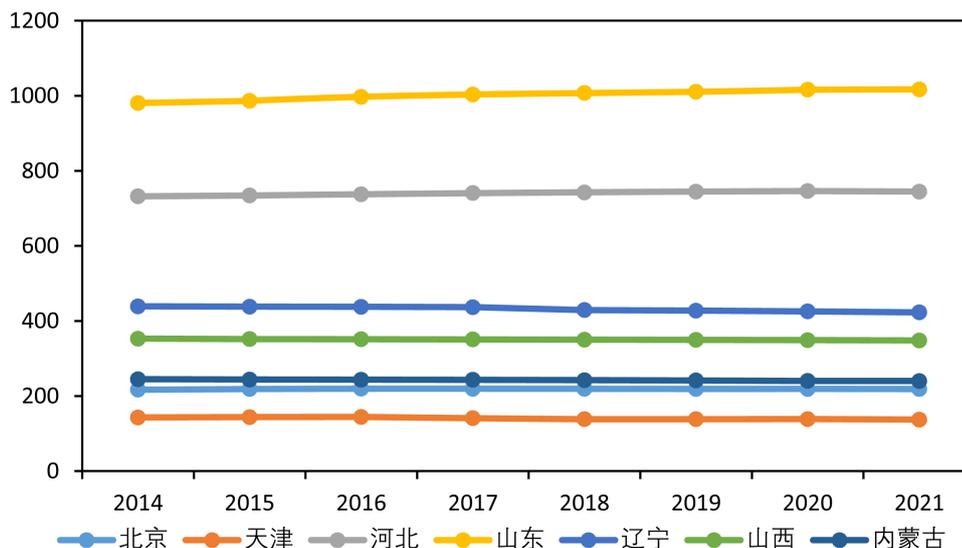


Figure 8. Population scale of each province and city in the Bohai Rim region (unit: 100,000 people)
图 8. 环渤海区域各省市人口规模(单位: 十万人)

3.2.5. 技术进步因素发展现状

从技术进步方面分析(如图 10 所示), 2014 年到 2021 年的环渤海区域各省市的 R&D 经费均呈现出上升趋势, 其中天津市在 2016 年 R&D 经费略有下降, 但 2019 年之后呈现出上升趋势。山东省的 R&D 经费虽在 2017~2019 年间减少, 但总体来说从 2014~2021 年山东省 R&D 经费增长。北京市的 R&D 经费在此期间显著增长, 现居环渤海区域第一位。

4. 理论假设

在对环渤海区域碳排放现状及影响因素现状展开分析后, 对其影响作用已有了初步的推测并提出五

方面的假设，具体假设如下。

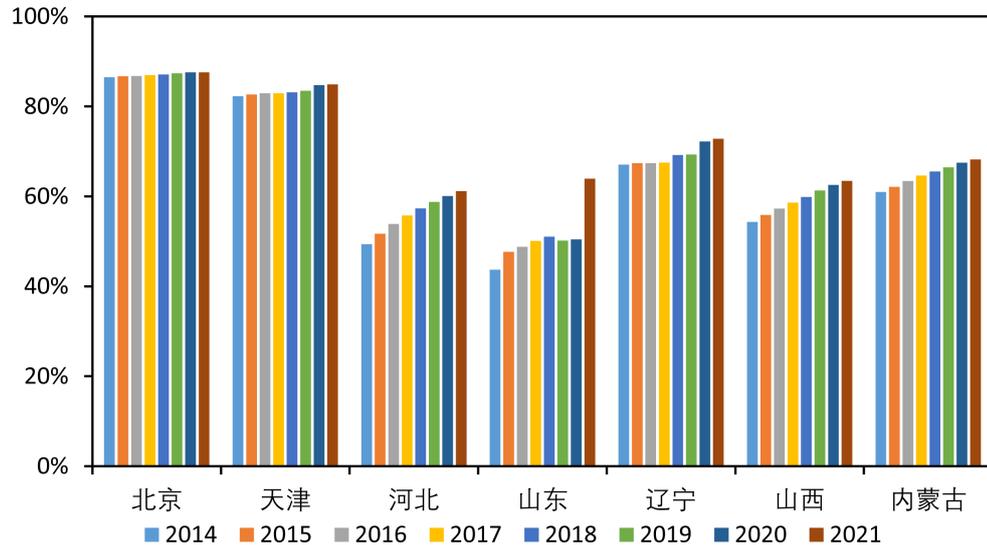


Figure 9. Urbanization rate of each province and city in the Bohai Rim region (unit: %)
图 9. 环渤海区域各省市城镇化率(单位: %)

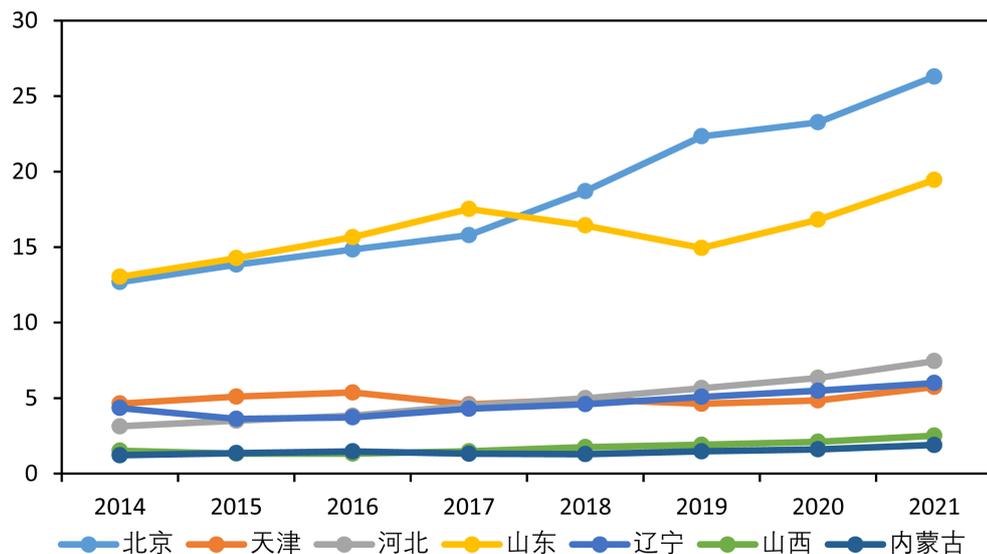


Figure 10. R&D funding for various provinces and cities in the Bohai Rim region from 2014 to 2021 (unit: billions of yuan)
图 10. 2014~2021 年环渤海区域各省市 R&D 经费(单位: 百亿元)

4.1. 假设 1: 经济增长与碳排放之间存在“倒 U 形”环境库兹涅茨曲线

根据环境库兹涅茨曲线(EKC)假说,当经济发展水平较低时,人们的首要需求是提升经济水平、提高生活质量,经济的快速增长带来更多的资源消耗,从而对环境质量产生负面影响,导致环境污染加重[21],但达到一定水平后,碳排放增速将放缓。环渤海区域作为中国的重要经济中心,经济增长通常需要更多的能源输入,而在依赖化石燃料的能源结构下,这意味着更高的碳排放。根据 2014~2021 年环渤海区域碳排放强度(图 2)变化趋势图,假设当经济达到一定水平后,随着技术进步和环保意识的提高,污染和资源消耗的增速将放缓甚至下降,即呈现出“倒 U 形”曲线。

4.2. 假设 2: 能源消耗与碳排放之间存在正向相关

近年来, 世界各国能源消耗都在不断上升, 尤其是化石能源消耗, 而化石能源消耗是造成二氧化碳排放的重要因素[22]。环渤海区域许多城市的经济发展长期依赖煤炭等化石燃料, 其燃烧是碳排放的主要来源。但随着技术的发展和成本降低, 可再生能源(如风能和太阳能)已成为减排的有效手段。因此, 假设能源消耗与碳排放之间存在正向相关, 故优化能源结构, 尤其是提高可再生能源的使用比例, 可以显著减少碳排放。

4.3. 假设 3: 产业结构调整与碳排放之间存在正向相关

产业结构调整是通过在不合理、不科学的产业结构进行重新优化, 最终实现生产要素的合理分配以及利用, 很大程度上促进了各产业之间协调合作, 推动了产业间发展, 进而减少经济发展过程中碳排放的产生[23]。环渤海区域一直以来以重工业为主, 包括钢铁、石化等高碳排放行业, 这些行业通常是碳排放的主要来源。产业结构的优化, 特别是从能源密集型产业向技术密集型和服务导向型产业的转变, 从重工业到轻工业和服务业的转型, 有助于降低能源消耗和碳排放量。同时, 由于不同地区的经济发展阶段、资源禀赋和政策环境不同, 这可能导致产业结构对碳排放的影响在各个区域之间存在显著差异, 所以对于资源丰富或传统产业基础较强的地区, 产业结构调整对于碳排放的减少可能面临更大的挑战。因此, 假设产业结构调整与碳排放之间存在正向相关, 从重工业向轻工业和服务业转型的产业结构调整将有效降低碳排放, 重工业的减少将直接导致碳排放量的下降。

4.4. 假设 4: 人口规模与碳排放之间存在正向相关

城市化的进程显著地增加了碳排放, 这是由于人口的增长增加了对能源的需求与消耗[24]。随着人口规模的增加, 城市化进程也加速进行, 而城市化通常伴随着建筑和交通基础设施的扩张, 这些基础设施需要大量的能源和资源, 将会导致碳排放的增加。同时大城市中的居民通常拥有更高的生活水平, 他们可能有更多的汽车、更大的房屋和更多的消费需求, 这些因素都会导致碳排放的增加。因此, 假设人口规模的扩大与碳排放之间存在正相关关系。

4.5. 假设 5: 技术进步与碳排放之间存在负向相关

技术水平对碳排放的影响机制是复杂的。技术进步对 CO_2 排放强度的影响具有异质性特征: 高能源效率行业的技术进步有利于 CO_2 排放强度的降低; 低能源效率行业的技术进步则会导致 CO_2 排放强度的上升[25]。比如, 技术在能源生产和利用方面的不断进步可以改善能源效率, 减少碳排放, 引入清洁能源技术, 如太阳能、风能和核能, 可以减少依赖高碳能源的需求。同时, 对于环渤海区域中工业化程度高、能源依赖度大的地区或行业(如山西省、内蒙古自治区), 技术进步能在减少碳排放方面具有更显著的影响。因此, 在推动技术创新时, 需要平衡其环境成本, 确保技术进步在减少碳排放方面的正面效应大于其潜在的负面影响。尤其是在能源效率和清洁能源技术方面有创新, 故根据环渤海区域各省市 R&D 经费变化趋势和碳排放量变化趋势图(见图 1 和图 10), 假设技术进步与碳排放之间存在负相关关系。

5. 模型设定及变量选取

本文基于收集的数据, 运用面板数据模型开展了计量实证分析。该模型整合了时间序列与截面数据, 不仅能够揭示环渤海区域各地区间的异质性(包括时间和空间异质效应), 还有效规避了多重共线性问题[26]。本文分别采用固定效应模型和随机效应模型进行回归分析, 并依据 Hausman 检验结果选取更适合的模型。

5.1. 模型设定

本文综合考虑各项影响因子对碳排放的影响，构建基准模型如下。

固定效应模型公式：

$$Carbon_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 GDP_{it} + \beta_2 Indus_{it} + \beta_3 Pop_{it} + \beta_4 Urban_{it} + \beta_5 Energy_{it} + \beta_6 Tech_{it} + \mu_{it}$$

随机效应模型公式：

$$Carbon_{it} = \beta_0 + \beta_1 GDP_{it} + \beta_2 Indus_{it} + \beta_3 Pop_{it} + \beta_4 Urban_{it} + \beta_5 Energy_{it} + \beta_6 Tech_{it} + v_i + \gamma_t + \mu_{it}$$

其中， i 和 t 分别代表地区和时间 ($i = 1, 2, \dots, 7$, $t = 1, 2, \dots, 7$)。

$Carbon_{it}$ 是环渤海区域的第 i 地区在第 t 年的碳排放量。

GDP_{it} 表示第 i 个地区在第 t 年的经济增长情况，通常以地区生产总值(GDP)来衡量。

$Indus_{it}$ 代表第 i 个地区在第 t 年的产业结构，以第二产业在地区经济中的比重来度量。

Pop_{it} 是第 i 个地区在第 t 年的人口规模。

$Urban_{it}$ 第 i 个地区在第 t 年的城镇化率，即城镇人口除以常住人口。

$Energy_{it}$ 为第 i 个地区在第 t 年的能源消费总量。

$Tech_{it}$ 表示技术进步，本文采用 R&D 经费来衡量。

$\alpha_i, \gamma_t, \beta_0, v_i$ 和 γ_t 分别表示固定效应截距项、随机效应模型的常数项和随机变量。

u_{it} 是误差项。

5.2. 变量选取

为了全面分析环渤海区域的碳排放达峰机制，本文选取多个变量进行数据分析(见表 2)。

被解释变量：通常以碳排放量为被解释变量，即各地区年度的碳排放总量来衡量。

解释变量：经济增长(GDP)，地区生产总值，反映经济活动的规模和强度。产业结构(Industrial Structure)，用第二产业(包括工业、制造业、建筑业等)在地区经济中所占的比重衡量，反映第二产业比重对碳排放的影响。人口规模(Population)，各地区的人口总数，影响碳排放的重要因素。城镇化率(Urbanization)，用城镇人口在常住人口中所占的比例来表示，城镇化越高，对生活要求和消费需求也高，在一定程度上增加碳排放量。能源消耗(Energy Consumption)，通常以各地区年度的能源消耗总量来衡量，包括煤炭、石油、天然气等所有能源类型的消耗量。技术进步(Technological Advancement)，可通过 R&D 经费指标来衡量，反映了技术创新对能效和碳排放的影响。

Table 2. Variable definition

表 2. 变量定义

变量含义	变量类别	变量符号	处理方法
碳排放总量	被解释变量	Carbon	各省市碳排放量
生产总值		GDP	各省市生产总值
产业结构		Indus	第二产业所占 GDP 比重
人口规模	解释变量	Pop	各省市人口数量
城镇化率		Urban	城镇人口/常住人口
能源消耗		Energy	各省市能源消费总量
技术进步		Tech	各省市 R&D 经费

6. 实证分析

6.1. 数据的描述性统计

本文选取 2014~2021 年环渤海区域五省二市的面板数据来探析碳排放的影响因素及达峰机制。其中，碳排放量数据来源于中国碳核算数据库，GDP、能源消耗总量、第二产业所占比重、人口数量、技术进步等数据来源于各地市的《统计年鉴》。

Table 3. Descriptive statistics

表 3. 描述性统计

变量	观测数 N	平均值	中位数	标准差	MIN	MAX
碳排放总量(百万吨)	56	533.5648214	544.77	300.1984809	76.78	947.16
国内生产总值(百亿元)	56	278.6107786	228.98215	176.7008036	106.4062	828.7517
产业结构(%)	56	37.84821429	39.8	9.152922853	16	52.7
人口规模(十万人)	56	446.7981786	350.6465	293.4873352	137.3	1017
城镇化率(%)	56	67.17546035	65.0558313	13.16931748	43.69	87.54911816
能源消耗(百万吨标准煤)	56	217.5311696	209.19685	112.9034523	67.621	459.351
技术进步(百亿元)	56	7.465089196	4.748492	6.734669249	1.221346	26.293208

如表 3 所示，碳排放量的最小值与最大值之间相差 870.38，说明碳排放量在环渤海区域的不同地区之间差异显著。碳排放量、GDP、人口规模、能源消耗和技术进步的较大标准差表明这些指标在不同地区区间差异显著。产业结构的数据显示出相对较小的波动范围，但其差异仍可能对碳排放有重要影响。技术进步的数据(R&D 经费)不同省市间差别较大，反映了不同地区在能源效率和技术应用方面的差异。城镇化率的波动也较大，表明城镇化率在一定程度上影响碳排放量和能源需求。

6.2. F 检验和豪斯曼检验

Table 4. Test cross-section fixed effects

表 4. F 检验

Effects Test	Statistic	d.f.	Prob.
Cross-section F	17.797665	(6, 43)	0.0000
Cross-section Chi-square	69.888416	6	0.0000

如表 4 所示，因为 F 检验和 LR 检验相对的 p 值都为 0.0000，所以选择建立个体固定效应模型。

Table 5. Hausman test

表 5. 豪斯曼检验

	Coef.
Chi-square test value	106.785990
P-value	0.0000

如表 5 所示，检验发现 P 值为 0.0000，拒绝原假设，所以选择建立个体固定效应模型。为有效控制时间维度中宏观变量趋势、技术进步等因素对因变量的影响，并充分考虑时点效应，本

文构建个体时点双固定效应模型。

6.3. 回归结果分析

Table 6. Regression estimation results of factors affecting carbon emissions in the Bohai Rim region
表 6. 环渤海区域碳排放影响因素回归估计结果

变量	系数	标准误	t 统计量	p 值	显著水平
GDP	-1.049362	0.292063	-3.592927	0.001	***
INDUS	8.897383	2.151925	4.134616	0.0002	***
POP	3.958154	1.073372	3.687588	0.0007	***
URBAN	6.633771	2.038955	3.253516	0.0025	***
ENERGY	1.222263	0.291829	4.188279	0.0002	***
TECH	-1.346999	2.793726	-0.482151	0.6326	
Number of obs	56	R-squared	0.996984		

*** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 。

由表 6 可知, $R^2 = 0.996984$, 非常接近 1, 表明模型拟合度非常高, 解释变量能很好地解释被解释变量的变化。

从经济增长角度分析, GDP 对被解释变量有显著影响, 但是当 GDP 增长到一定阶段, 随着技术进步和环保意识的提高, 污染和资源消耗的增速将放缓甚至下降, 从而导致碳排放量下降, 故回归系数为 -1.049362, 符合环境库兹涅茨曲线(EKC)假说, 经济增长与碳排放之间存在明显的“倒 U 形”库兹涅茨曲线。许多研究表明, 碳排放量与人均 GDP 之间存在非线性关系, 即不同的经济水平下, 人们对环境的容忍度也有差异, 在经济水平不高的情况下, 人们更倾向于以牺牲环境为代价而换取高收入, 但随着经济水平的上升, 为了改善环境, 人们宁愿牺牲一部分收入[27]。故假设 1 成立。

从能源消耗角度分析, 能源消费总量每增加 1 单位, 碳排放总量平均来说增加 1.222263 个单位, 表明能源消耗与碳排放之间存在正向相关。环渤海区域中许多城市的经济发展主要依赖于化石燃料等能源, 而这些能源在燃烧过程中会产生大量的二氧化碳, 是主要的温室气体之一。因此, 能源消耗量的增加通常会直接导致碳排放量的增加。同时, 随着工业化和城市化的发展, 对电力和工业产品的需求增加, 工业生产和电力供应是能源消耗的主要领域, 也是碳排放的主要来源。相应地, 能源消耗和碳排放量也会增加。故假设 2 成立。

从产业结构角度分析, 回归结果在 1% 显著性水平下显著, 产业结构每变化 1%, 碳排放总量平均来说会增加约 8.897 个单位。产业结构用第二产业所占比重来衡量, 而第二产业所涉及的能源密集型产业(如钢铁、化工等)的比重增加, 整体的能源需求和碳排放量也随之增加。此外, 政策调控和市场机制也可能影响产业结构对碳排放的影响, 特别是环渤海区域的各省市在不同的经济发展水平和环境政策背景下。因此, 政策制定者需要关注产业结构调整对碳排放的影响, 特别是在制定减排策略和经济发展规划时, 应考虑促进低碳、清洁能源的产业发展。根据产业结构的回归系数, 可以得到产业结构与碳排放量之间存在着正相关的关系。故假设 3 成立。

从人口规模角度分析, 人口规模对碳排放的影响十分显著, 人口规模每增加 1 单位, 碳排放总量增加 3.958154 个单位。随着人口规模的增加, 城市化进程也加速进行, 通常伴随着工业化和现代化, 这些过程往往增加了对能源的需求, 尤其是对化石燃料的依赖, 而且城市化进程中的基础设施建设、交通系统发展和住房需求增加, 都可能导致能源消耗和碳排放量的增加。故假设 4 成立。

从技术进步角度分析,回归结果并不显著且回归系数为负,究其原因可能是由于本文采用 R&D 经费来衡量技术进步,且根据赫兹伯格悖论,技术进步可能同时导致能源效率提高和总能源需求增加,在一定程度上无法准确测量技术进步水平,故回归结果并不显著。但结合各省市碳排放量(图 1)和 R&D 经费(图 10)来看,内蒙古和山西省的 R&D 经费增长幅度小而碳排放量逐年增长且增长速度最快,而其他地区的 R&D 经费增长幅度不仅快于内蒙古和山西省而且碳排放量的增长速度明显慢于内蒙古和山西省(表 1),由此可以得出技术进步在一定程度上会降低碳排放量,即技术进步与碳排放之间存在负相关。故假设 5 成立。

根据各变量系数分析,产业结构和城镇化率对碳排放的影响最为显著,因此需要根据环渤海区域中不同地区的产业结构和城镇化率来制定不同的政策以及措施,以此来保证碳排放有效减少。

6.4. 交互效应分析

在分析经济增长、能源消耗、产业结构、人口规模和技术进步等因素对碳排放的影响时,必须清楚地认识到这些因素之间也存在内在联系,故在固定效应模型的基础上加入交互效应项,以此来探究各影响因素之间的内在联系。

但是加入过多的交互项会显著增加模型的复杂度,可能导致过度拟合,且大量的交互项可能使模型解释变得困难,特别是在解释交互效应的经济意义时,若没有足够多的数据难以保证统计估计的准确性和可靠性。故根据理论和研究假设选择有限且有意义的交互项,以保持模型的可解释性和可操作性。

在选择有意义的交互性后,新的模型形式如下:

$$Carbon_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 GDP_{it} + \beta_2 Indus_{it} + \beta_3 Pop_{it} + \beta_4 Urban_{it} + \beta_5 Energy_{it} + \beta_6 Tech_{it} + \beta_7 (Energy \times Tech) + \beta_8 (Urban \times Energy) + \beta_9 (Indus \times Energy) + \beta_{10} (GDP \times Tech) + \mu_{it}$$

模型回归结果如下:

Table 7. Cross term regression estimation results
表 7. 交叉项回归估计结果

变量	系数	标准误	t 统计量	p 值	显著水平
ENERGY * TECH	-0.062629	0.018959	-3.303454	0.0024	***
URBAN * ENERGY	0.015519	0.020977	0.739799	0.4648	
INDUS * ENERGY	-0.009074	0.020159	-0.450140	0.6556	
GDP * TECH	-0.017485	0.012110	-1.443858	0.1585	
Number of obs	56	R-squared	0.998119		

***p < 0.01, **p < 0.05, *p < 0.1。

由表 7 分析可知,能源消耗与技术进步的交叉项在统计上显著,这表明技术进步和能源消耗在一定程度上将会减少碳排放量。城镇化率与能源消耗的交互效应系数为 0.015519,与碳排放量正相关,这表明在城镇化进程中必然会带来能源的消耗从而导致碳排放量的增加。产业结构与能源消耗的交互效应系数为-0.009074,与碳排放之间存在负向关系,但在统计上并不显著,这表明在特定的产业结构下,能源消耗对碳排放的影响减少,意味着某些产业在技术进步或能效提高方面表现更好,从而使得碳排放量减少。GDP 与技术进步的交互效应系数为-0.017485,表示随着经济增长和技术进步的发展,碳排放量会逐渐减少。

7. 基于面板数据模型实现碳达峰机制的分析

基于上述分析的结果,碳达峰机制可以从以下几个方面来实现:

第一,能源结构方面,优化能源结构,减少对煤炭等高碳能源的依赖,增加可再生能源和清洁能源(如太阳能、风能、核能)在能源结构中的比重,从而减少碳排放量。在工业生产、建筑设计和家用电器等领域推广高效能源使用技术,提高能源使用效率,因此优化能源分配,在一定程度上促进碳达峰。

第二,产业结构方面,从能源密集型产业向服务业和高科技产业转型,特别是发展低碳技术和绿色经济,减少对重工业的依赖,降低环渤海区域整体经济活动的碳排放强度。推广清洁生产技术和循环经济,减少工业生产过程中的能源消耗和排放。发展低碳农业技术,减少农业生产中的碳排放。产业结构的调整,将会导致碳排放早日实现达峰。

第三,人口规模方面,优化城市布局和交通系统,减少人口密集区域的能源需求和碳排放。引导公众理解人口增长对环境的影响,倡导低碳生活方式,通过区域发展策略和政策引导,实现人口在城乡之间的均衡分布。

第四,技术进步方面,加大对低碳技术和清洁能源技术的研发投入,推广先进技术应用,在各个行业推广应用节能减排技术,同时与其他国家和地区合作,共享和引进先进的低碳技术。要特别注重环渤海区域中工业化程度高、能源依赖度大的地区或行业(如山西省、内蒙古自治区),相比其他地区技术进步在工业化程度高、能源依赖度大的地区或行业减少碳排放方面具有更显著的影响。因此技术进步方面,必须要考虑技术进步所需要的环境成本,确保技术进步在减少碳排放方面的正面效应大于其潜在的负面影响,以此来助力碳排放早日实现达峰。

第五,政策法规方面,政府可以通过设定明确的碳排放减少目标,为碳达峰提供方向和动力,并通过法律和规章强制执行这些目标,确保各行业和企业遵守减排要求。建立碳交易市场,通过市场机制鼓励减排,使碳排放成本化。通过政策支持和补贴,促进清洁能源和可再生能源的发展,制定能源效率标准,鼓励采用节能技术和产品。实施一定的政策将在一定程度上推动碳达峰早日实现。

实现环渤海区域碳排放达峰需要在能源消费、产业结构、人口规模和技术进步等多个方面采取综合措施,必须根据各地区独特的发展情况,进行能源结构优化、产业转型、平衡人口发展和加快技术创新,才可以有效地减少碳排放,推动环渤海区域的可持续发展。

8. 结论与政策建议

8.1. 主要结论

本文利用 2014~2021 年环渤海区域的面板数据,对比分析了各省市碳排放影响因素的具体差别。通过构建个体时点双固定效应模型,分析了经济增长、能源消耗、产业结构、人口规模以及技术进步因素对碳排放的影响程度,并将这些影响因素进行了分析比较,得到以下结论:

第一,经济增长与碳排放之间存在明显的“倒 U 形”库兹涅茨曲线。经济增长与碳排放之间的关系在不同发展阶段呈现出先增加后减少的趋势。在经济发展的初期阶段,工业化和城市化快速推进,通常伴随着高能源消耗和高碳排放。此时,经济增长主要依赖于能源密集型和高污染的产业,导致碳排放量增加。随着经济的进一步发展,开始出现环境意识的提升和对可持续发展的追求。政策开始转向支持能效提升、清洁能源使用和环保技术,经济结构也逐渐从重工业向服务业和高科技产业转型。在经济发展的较高阶段,技术进步和效率提升使得能源消耗和碳排放逐渐降低。此时,经济增长与环境保护开始协

调发展，碳排放量随着经济增长而减少。

第二，能源消耗与碳排放之间存在正相关。环渤海区域的能源消耗主要依赖于化石燃料，如煤炭、石油和天然气。这些能源在燃烧过程中会产生大量的二氧化碳，是主要的温室气体之一。因此，能源消耗量的增加通常会直接导致碳排放量的增加。

第三，产业结构与碳排放之间存在正相关。传统的重工业和制造业通常是能源密集型产业，依赖于大量的化石燃料消耗，从而导致较高的碳排放。当这些产业在经济中占据较大比重时，整体的碳排放水平通常较高。因此，以第二产业所占比重衡量的产业结构，必然与碳排放之间存在正相关。

第四，人口规模与碳排放之间存在正相关。人口增长通常导致能源需求增加，尤其是在城市化快速发展的地区。随着人口数量的增加，住房、交通、食品和其他消费品的需求增长，从而增加了能源消耗和碳排放。人口增长还需要相应的基础设施支持，如住房、道路和公共设施，这些建设活动通常伴随着高碳排放。与此同时，人口规模的增加常常与城市化进程相伴随，而城市化过程中的能源消耗和碳排放通常高于农村地区。故人口规模与碳排放之间存在正相关。

第五，技术进步与碳排放之间关系具有双重性。技术创新可以开发和应用清洁能源技术，如太阳能、风能和电动汽车，这些技术有助于减少对化石燃料的依赖和碳排放。但是技术进步是在技术创新的基础上实现的，且技术进步可能同时导致能源效率提高和总能源需求增加，所以判断技术进步与碳排放之间的关系要根据各地区具体的实际情况来分析，尤其是对于环渤海区域中工业化程度高、能源依赖度大的地区或行业，技术进步能在减少碳排放方面具有更显著的影响。

8.2. 政策建议

通过实施有效的政策和措施，可以促进区域的可持续发展，同时实现碳排放的减少，提出以下几方面建议：

第一，优化能源结构。增加清洁能源比重，通过政策支持和投资，增加太阳能、风能、水能等可再生能源在能源结构中的比例。减少化石燃料依赖，逐步减少煤炭和石油等高碳能源的使用，转向更清洁的能源，如天然气等。

第二，促进产业升级转型。支持低碳产业，鼓励发展低碳技术、绿色能源和环保服务等产业。对重工业进行绿色改造、节能减排改造，提高能源使用效率，减少排放。同时鼓励循环经济，推广资源的循环利用，减少工业生产中的资源消耗和废物排放，促进产业间协调发展。

第三，加强技术创新。提高政府和企业研发领域的投资，特别是在清洁能源和低碳技术方面，促进新技术在工业、交通、建筑等领域的广泛应用，同时与其他国家和地区合作，共享和引进先进的低碳技术。在此过程中要特别注意推动技术创新时需考虑其环境成本，确保技术进步在降低碳排放方面的积极影响超过任何可能的负面效应。这要求在技术发展和政策制定中采取全面和平衡的方法，以促进环境的可持续性。重点应放在开发和应用那些能够显著提高能效、减少碳足迹的创新技术上，同时警惕那些可能间接增加碳排放的技术。

第四，实施差异化的区域减排策略。考虑环渤海区域不同省市的特性，根据环渤海区域中不同省市的经济发展水平、产业结构和资源禀赋制定差异化的减排策略。在城市和农村方面制定不同的策略，城市重点在于能源效率提升和清洁能源应用，农村则注重可持续农业和生物质能源的开发，同时要注重为不同区域提供定制化的激励和支持措施，以促进区域内协同减排。

基金项目

教育部人文社会科学项目(22YJCZH087)，山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QG054)。

参考文献

- [1] Casler, S. and Rose, A. (1998) Carbon Dioxide Emissions in the US Economy: A Structural Decomposition Analysis. *Environmental and Resource Economics*, **11**, 349-363. <https://doi.org/10.1023/A:1008224101980>
- [2] Davis, W.B., Sanstad, A.H. and Koomey, J.G. (2003) Contributions of Weather and Fuel Mix to Recent Declines in US Energy and Carbon Intensity. *Energy Economics*, **25**, 375-396. [https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(02\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(02)00094-4)
- [3] Ang, B.W. and Pandiyan, G. (1997) Decomposition of Energy-Induced CO₂ Emissions in Manufacturing. *Energy Economics*, **19**, 363-374. [https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(96\)01022-5](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(96)01022-5)
- [4] Ozturk, I. and Acaravci, A. (2013) The Long Run and Causal Analysis of Energy, Growth, Openness and Financial Development on Carbon Emissions in Turkey. *Energy Economics*, **36**, 262-267. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.08.025>
- [5] 公维凤, 范振月, 王传会, 赵梦真. 黄河流域碳排放区域差异、成因及脱钩分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(12): 12-17.
- [6] 崔艳芳, 张国兴. 黄河流域资源型城市碳排放影响因素与达峰预测研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(2): 9-14.
- [7] 邓光耀. 能源消费碳排放的区域差异及其影响因素分析[J]. 统计与决策, 2023, 39(6): 56-60.
- [8] 刘元欣, 贺铄, 江雅婧, 罗旭, 袁家海. 中国四大城市群碳排放驱动因素时空分解研究[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(2): 231-241.
- [9] Zhou, P. and Ang, B.W. (2008) Decomposition of Aggregate CO₂ Emission: A Production-Theoretical Approach. *Energy Economics*, **30**, 1054-1061. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2007.10.005>
- [10] 王长建, 张利, 王强, 乔莹. 1990-2009 年山东能源消费的碳排放动态演进分析[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(4): 469-475.
- [11] 袁鹏, 程施. 辽宁省碳排放增长的驱动因素分析——基于 LMDI 分解法的实证[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2012, 33(1): 35-40.
- [12] 梁红梅, 李赫龙. 环渤海地区碳排放演进特征及其影响因素[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2014, 15(2): 274-280.
- [13] 武娴, 关伟, 许淑婷. 环渤海地区碳排放的省域比较与因素分解[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(9): 1100-1104.
- [14] 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.
- [15] 董紫媛, 张朝辉. 中国城市居住碳排放的测算、区域差异及影响因素研究[J]. 生态经济, 2024, 40(1): 13-21.
- [16] 朱宇恩, 李丽芬, 贺思思, 李华, 王云. 基于 IPAT 模型和情景分析法的山西省碳排放峰值年预测[J]. 资源科学, 2016, 38(12): 2316-2325.
- [17] Shi, C. and Feng, X. (2021) Carbon Emission Factor Decomposition and Carbon Peak Prediction Based on Multi-Objective Decision and Information Fusion Processing. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, **2021**, Article No. 102. <https://doi.org/10.1186/s13634-021-00811-w>
- [18] 李雪婷. 基于扩展 STIRPAT-GDIM 模型的山东能源消费碳排放研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- [19] Lu, H., Xu, Y., Wang, W., et al. (2023) Can China Reach the CO₂ Peak by 2030? A Forecast Perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 123497-123506. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30812-1>
- [20] Liu, X., Wang, X. and Meng, X. (2023) Carbon Emission Scenario Prediction and Peak Path Selection in China. *Energies*, **16**, Article No. 2276. <https://doi.org/10.3390/en16052276>
- [21] 赵慧娟. 环境 EKC 曲线的区域差异性研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海财经大学, 2022.
- [22] 王芬芬, 朴光姬, 李芳. 相对金融发展、能源消耗对二氧化碳排放的影响——基于 1990-2015 年数据的实证分析[J]. 华北金融, 2022(5): 35-43.
- [23] 李莹. 中国省域居民生活消费碳排放的收敛性及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2020: 14-15.
- [24] 易艳春, 马思思, 关卫军. 城市人口规模与二氧化碳排放——基于中国 108 个地级市的实证检验[J]. 产业经济评论(山东大学), 2017, 16(3): 42-60.
- [25] 张兵兵, 朱晶, 全晓云. 技术进步与二氧化碳排放强度: 理论与实证分析[J]. 科研管理, 2017, 38(12): 41-48.
- [26] 王芳. 生态文明建设背景下的碳排放趋势分析——基于环渤海地区的面板数据[J]. 低碳经济, 2019, 8(2): 46-57.
- [27] 刘悦. 我国碳排放影响因素与碳达峰预测研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 辽宁大学, 2023.