

# 京津冀碳排放影响因素分解及碳达峰预测研究

廖志高<sup>1,2\*#</sup>, 李洁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>广西科技大学经济与管理学院, 广西 柳州

<sup>2</sup>广西工业高质量发展研究中心, 广西 柳州

收稿日期: 2023年10月16日; 录用日期: 2023年10月25日; 发布日期: 2024年2月1日

## 摘要

京津冀作为中国核心经济区和碳排放的重点区域, 尽早达峰对于实现我国碳达峰目标具有十分重要的意义。文章运用灰色关联分析方法, 筛选影响碳排放的因子, 利用LMDI模型分解影响因子, 分析各影响因子对碳排放量的贡献度, 设置5种不同情景, 针对每种情景采用STIRPAT模型进行碳排放未来趋势预测。研究结果表明: (1) 政府干预、城镇化率、人均GDP、产业结构和能源强度显著影响京津冀城市群碳排放; (2) 能源强度和能源结构变动呈现出抑制碳排放的效应, 经济发展与人口增长变动呈现出促进碳排放的效应; (3) 京津冀整体有望在2030年前实现碳达峰。最后针对不同城市提出差异化的建议, 从调整能源结构、落实政策制度、优化产业结构来实现京津冀地区碳达峰目标。

## 关键词

京津冀, LMDI模型, 灰色关联分析, STIRPAT模型, 情景预测

# Decomposition of Carbon Emission Factors and Prediction of Carbon Peak in Beijing-Tianjin-Hebei Region

Zhigao Liao<sup>1,2\*#</sup>, Jie Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Economics and Management, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou Guangxi

<sup>2</sup>Guangxi Industrial High Quality Development Research Center, Liuzhou Guangxi

Received: Oct. 16<sup>th</sup>, 2023; accepted: Oct. 25<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 1<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

As the core economic zone and the key area of carbon emission in China, the Beijing-Tianjin-Hebei

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 廖志高, 李洁. 京津冀碳排放影响因素分解及碳达峰预测研究[J]. 低碳经济, 2024, 13(1): 14-26.

DOI: 10.12677/jlce.2024.131002

region is of great significance to reach its carbon peak as soon as possible. In this paper, the grey correlation analysis method is used to screen the factors that affect carbon emissions, the LMDI model is used to decompose the impact factors, and the contribution of each impact factor to carbon emissions is analyzed. Five different scenarios are set up, and the STIRPAT model is used to predict the future trend of carbon emissions for each scenario. The results show that: (1) Government intervention, urbanization rate, per capita GDP, industrial structure and energy intensity significantly affect carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei city cluster; (2) Changes in energy intensity and energy structure inhibit carbon emissions, while changes in economic development and population growth promote carbon emissions; (3) The Beijing-Tianjin-Hebei region as a whole is expected to reach its carbon peak by 2030. Finally, different suggestions are put forward for different cities, from adjusting the energy structure, implementing the policy system, optimizing the industrial structure to achieve the goal of carbon peak in the Beijing-Tianjin-Hebei region.

## Keywords

Beijing-Tianjin-Hebei, LMDI Decomposition Model, Grey Correlation Analysis, STIRPAT Model, Scenario Prediction

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

自 2020 年 9 月, 中国政府宣布要在 2030 年之前实现碳峰值, 2060 年之前实现碳中和以来, 降碳成为我国生态文明建设的重点战略方向。在“双碳”背景下, 国内外学术界围绕碳排放和“碳达峰”预测展开了大量研究。中国一直以来都十分重视气候问题, 并在全球范围内开展了积极地减排和减排工作。在 2021 年 9 月发布的《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中, 提出了对京津冀协同发展、长三角一体化发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设、黄河流域生态保护和高质量发展战略中强化绿色低碳发展导向的任务要求。

京津冀城市群是“以首都为核心的世界级城市群”, 包括北京和天津两大直辖市, 河北省唐山、邯郸、张家口、保定、区域中心城市和石家庄、沧州、衡水、承德、秦皇岛、廊坊、邢台重点城市在内的 13 个城市。京津冀是我国碳排放的重要区域, 也是能源消耗 CO<sub>2</sub> 排放的重点区域, 且单位 GDP、单位人口的碳排放量均较高, 是实现“2030 年碳达峰, 2060 年碳中和”目标的关键区域。城市是中国经济发展的主要载体, 也是节能减排的主要战场, 其减排效果将直接决定着中国“双碳”目标能否按期实现。

## 2. 文献综述

目前, 国内外学者对碳达峰的预测主要有两个方向: 碳排放影响因子、碳排放量预测与情景分析。在碳排放影响因子方面, 学者一般将其分解为经济发展、城镇化水平、产业结构、人口总量、能源结构、能源强度等, 有学者发现政府干预财政支出的增加会导致了碳排放增长[1]。在研究碳排放领域中因素分解方法最常用的是指数因素分解法和结构分解法, 通过对比可以发现 LMDI 法是相对适用的因素分解方法。此方法易于建模, 有利于分解较多驱动因素, 而且能够消除分解过程中残差项或者对残差项分解的影响[2]; 在碳排放量预测与情景分析方面, 研究方法上, 大都研究集中于 STIRPAT 模型[3]、环境库兹

涅茨曲线[4]、LEAP 模型[5]、系统动力学[6]等方法, 其中最受欢迎的是运用 STIRPAT 模型对碳排放进行研究。可以发现 STIRPAT 模型的优点是它摒弃了单位弹性假设, 更具随机性, 并且可以修改和扩展某些影响因子; 研究对象上, 学者们从不同的层面展开讨论: 在国家层面上, 有学者依据相关政策预期发展目标进行情景模拟, 表明中国可在 2030 年前均实现碳达峰[3]; 在省域层面, 针对我国不同省进行碳达峰预测, 有福建[7]、宁夏[8]、江苏[9]、广东[10]等区域, 研究成果丰富, 达峰时间基本在 2020~2050 年间; 在城市群层面, 对长三角[11]、珠三角[12]、成渝[13]、京津冀[14] [15] [16] [17]城市群碳排放研究较多, 其中针对京津冀城市群碳排放影响因素和碳达峰预测方面的研究, 不同学者对京津冀城市群碳达峰预测时间存在差异, 王铮等[15]对 2009~2050 年京津冀地区能源、水泥工艺碳排放以及森林碳汇进行了估算, 得出京津冀地区整体碳排放峰值将延后至 2039 年。王韶华[1]等基于 STIRPAT 模型模拟预测京津冀碳达峰情况, 研究表明京津冀整体可在 2030 年前实现碳达峰目标。因此, 京津冀碳达峰时间还需要进一步研究。在影响因素指标的选择上, 有些学者从不同视角研究京津冀碳排放影响因素分解和预测, 在选择因子时大多是以理论经验为基础, 并未量化关联程度; 在碳达峰预测上, 有些学者对京津冀城市群的研究只单纯地考虑了影响因子的分解和情景预测其中之一, 没有将影响因素分解的结果与场景的设定相结合。

当前, 京津冀城市群碳达峰研究尚存在两个短板: 一是碳排放驱动因素影响情况尚不清晰; 二是碳达峰路径及水平尚不明确。基于此, 文章通过灰色关联度量化关联程度来筛选指标, 运用 LMDI 对各影响因素进行分解, 掌握过去不同因素对碳排放的影响情况, 最后构建 STIRPAT 模型, 对不同情景京津冀碳达峰进行预测, 探究京津冀城市群碳排放的潜在演变路径, 为京津冀科学合理地推动碳达峰提供借鉴方案。

文章可能的创新点之一在指标选取上引入了政府干预指标, 在国家制度层面探讨对碳排放的影响, 因为财政支出作为国家宏观调控的重要工具, 是打破制约我国城市低碳发展体制障碍的必要保证。二是根据城市群各城市的减排发展定位, 以我国 2030 年前碳达峰为研究目标, 探索差异化的减排路径, 从不同方面着手解决城市群低碳减排工作。

### 3. 研究设计

#### 3.1. 模型构建与数据来源

##### 3.1.1. 碳排放测算

被解释变量为碳排放( $C$ ), 由于能源消费产生的碳排放约占排放总量的 80% [18], 所以选用能源消费碳排放量表示, 依据《IPCC 国家温室气体排放清单指南》中提到的碳排放核算方法, 公式为:

$$C_i = \sum_{j=1}^9 M_{ijn} Q_j C_j \quad (i=1,2,3,4,\dots) \quad (1)$$

其中,  $C_i$  代表第  $i$  地区的碳排放量; 1、2、3、4……等分别表示北京, 天津, 石家庄, 唐山等城市;  $M_{ijn}$  表示第  $i$  地区对  $j$  ( $j=1,2,3,\dots,9$  分别表示煤炭、焦炭、原油、汽油、天然气、煤油、柴油、燃料油、电力) 种能源在  $n$  年消耗的实物量;  $C_j$  表示第  $j$  种能源的二氧化碳排放因子;  $Q_j$  表示第  $j$  种能源的净发热量。

##### 3.1.2. 灰色关联分析

灰色关联度分析的基本思路是, 根据自变量和因变量的几何结构的相似性, 来判定两者间的关系是否密切, 相关性大的变量就保留作为碳排放预测模型的输入变量, 相关性小的变量就剔除, 参考文献[19]的步骤, 具体如下:

(1) 建立参考序列和比较序列。

$X_0' = [x_0'(1), x_0'(2), \dots, x_0'(m)]$  为参考序列;  $X_p' = [x_p'(1), x_p'(2), \dots, x_p'(m)]$  为比较序列。

(2) 对原始数据序列进行去量纲处理。

$$x_p = \frac{x'_p(k)}{x'_p(1)} \quad (2)$$

(3) 计算关联大小。

$$r = \frac{\min_p \min_q |X_0(q) - X_p(q)| + \rho \max_p \max_q |X_0(q) - X_p(q)|}{|X_0(q) - X_p(q)| + \rho \max_p \max_q |X_0(q) - X_p(q)|} \quad (3)$$

$$R = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n r \quad (4)$$

其中： $r$  表示第  $p$  个因素与碳排放量的关联程度； $q$  表示年份； $p$  表示影响因素， $\rho$  为分辨系数，通常情况下取值为 0.5。

### 3.1.3. LMDI 分解模型设计

Kaya 恒等式最早出现在 IPCC 的会议上，学者们发现人口、经济和政策等因素对环境产生了深远的影响，参考文献[20]的研究分解公式如下：

$$\text{CO}_2 = \text{CO}_2/E \times E/\text{GDP} \times \text{GDP}/\text{POP} \times \text{POP} \quad (5)$$

其中， $\text{CO}_2$  为二氧化碳排放量， $E$  为能源消费总量； $\text{GDP}$  为国内生产总值； $\text{POP}$  为总人口数。

与 Kaya 恒等式相比，LMDI 分解模型可以将各种影响因子分解为不含残差项的数据，其解释力强，结果唯一，使用方便，技术成熟[21]。因此，在 Kaya 恒等式基础上应用于 LMDI 加法模型中，对影响碳排放的因素进行分解，公式如下：

$$\Delta C = C_t - C_0 = \Delta C_\lambda + \Delta C_\mu + \Delta C_\alpha + \Delta C_\beta \quad (6)$$

$$\Delta C = \sum_{i=1}^n L_i \times \ln(\lambda_i/\lambda_0) \quad (4)$$

$$\Delta C_\mu = \sum_{i=1}^n L_i \times \ln(\mu_i/\mu_0) \quad (8)$$

$$\Delta C_\alpha = \sum_{i=1}^n L_i \times \ln(\alpha_i/\alpha_0) \quad (9)$$

$$\Delta C_\beta = \sum_{i=1}^n L_i \times \ln(\beta_i/\beta_0) \quad (10)$$

$$L_i = (C_t - C_0) / \ln(C_t - C_0) \quad (11)$$

其中： $\Delta C$  表示碳排放分解总效应； $C_t$  表示第  $t$  年的二氧化碳排放量； $C_0$  表示基准年的二氧化碳排放量； $\lambda_t$ 、 $\lambda_0$ 、 $\mu_t$ 、 $\mu_0$ 、 $\alpha_t$ 、 $\alpha_0$ 、 $\beta_t$ 、 $\beta_0$  分别表示能源结构、能源强度、经济水平、总人口在第  $t$  年和在基准年的占比； $\Delta C_\lambda$  能源结构引起的碳排放量变化； $\Delta C_\mu$  能源强度引起的碳排放量变化； $\Delta C_\alpha$  经济水平引起的碳排放量变化； $\Delta C_\beta$  总人口引起的碳排放量变化。

### 3.1.4. STIRPAT 预测模型设计

参考 York 等[22]基于 IPAT 模型，建立了一个可扩展和随机性的 STIRPAT 模型，其标准格式如下：

$$I = aP^b A^c T^d \varepsilon \quad (12)$$

其中： $b$  代表  $P$  的回归系数； $c$  代表  $A$  的回归系数； $d$  代表  $T$  的回归系数； $a$  为常数； $\varepsilon$  为随机误差项。

在灰色关联分析和 LMDI 分解基础上对 STIRPAT 模型进行扩展，选择政府干预( $G$ )、富裕程度( $A$ )、产业结构( $O$ )、城镇化率( $J$ )和能源结构( $N$ ) 5 个因素作为碳排放预测模型变量，见表 1，构建扩展的 STIRPAT

模型:

$$I = aG^b A^c O^d J^e N^f \varepsilon \tag{13}$$

岭回归来训练 STIRPAT 模型要求是线性模型, 需要对 STIRPAT 模型式两边同时取对数[23], 将其转换为线性模型。

$$\ln I = \ln a + b \ln G + c \ln A + d \ln O + e \ln J + f \ln N + \ln \varepsilon \tag{14}$$

**Table 1.** Description of model variables

**表 1.** 模型变量说明

变量	符号	含义	单位
碳排放量	<i>C</i>	能源消耗产生的碳排放量	万吨
人均 GDP	<i>A</i>	各地区生产总值/常住人口	亿元/万人
能源强度	<i>N</i>	能源消费总量/地区生产总值	万吨/亿元
城镇化率	<i>J</i>	城镇人口/总人口	%
产业结构	<i>O</i>	第二产业产值/地区生产总值	%

### 3.2. 数据来源

文章选取了 2005~2020 年 13 个城市的数据, 其中生产总值, 年末总人数, 第二产业产值, 人均 GDP, 公共支出均可从《北京统计年鉴》《河北统计年鉴》《天津统计年鉴》获得, 能源消耗量根据《中国能源统计年鉴》取得。其中 2020 年碳排放数据尚未披露, 还有个别数据缺失都用插值法进行估值。

## 4. 结果分析

### 4.1. 灰色关联分析

通常情况下, 灰色关联系数大于 0.8 表示自变量与因变量的相关关系较强; 在 0.5~0.8 的范围内, 相关系数呈显著相关; 小于 0.5 则呈弱相关。由表 2 可以看出, 政府干预、城镇化率、人均 GDP、产业结构和能源强度与碳排放量之间均表现为显著相关性, 且相关性城镇化率 > 政府干预 > 人均 GDP > 能源强度 > 产业结构。本文选用政府干预、城镇化率、人均 GDP、产业结构和能源强度作为预测模型输入变量。

**Table 2.** Correlation degree analysis table

**表 2.** 关联度分析表

评价项	关联度	排名
城镇化率	0.865	1
政府干预	0.735	2
人均 GDP	0.705	3
能源强度	0.629	4
产业结构	0.615	5

## 4.2. LMDI 碳排放因素分解

以 2005 年为基准年, 计算碳排放时所使用的碳排放系数为固定值, 通过 LMDI 分解可得到 2006~2020 年京津冀区域能源结构因子、经济发展因子、人口效应因子和能源强度因子逐年贡献效应, 见图 1。

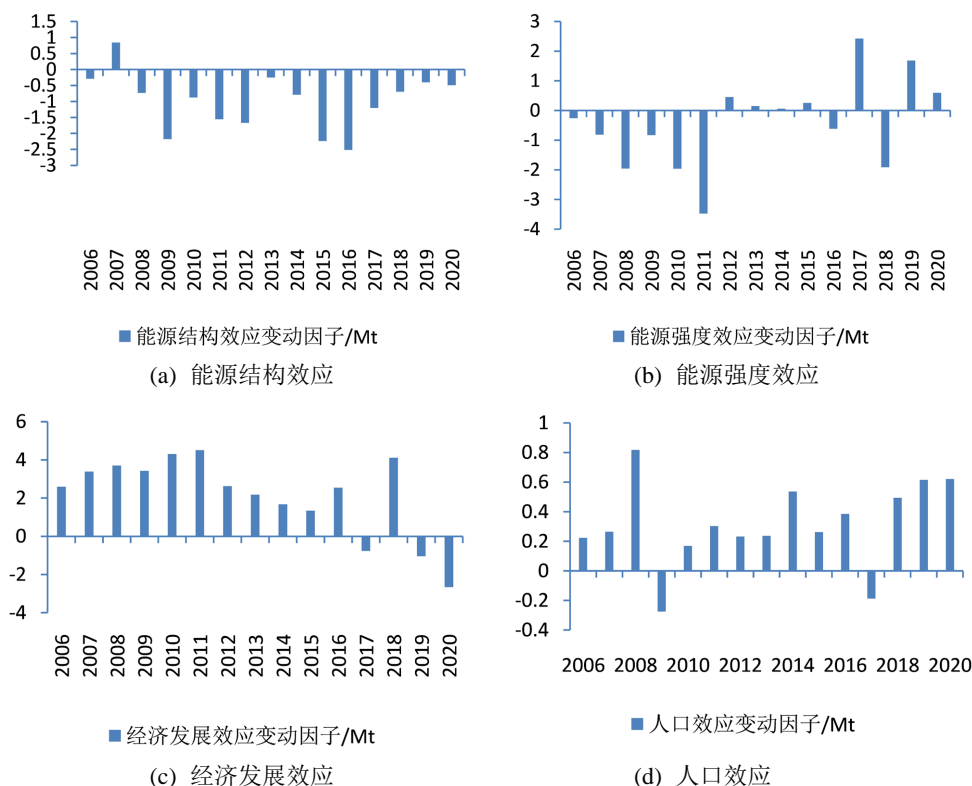


Figure 1. Decomposition results of carbon emission impact factors

图 1. 碳排放影响因子分解结果

由图(a)可知, 整体看 2006~2020 年能源结构对碳排放呈现显著的抑制效应, 其累计抑碳 15.79 Mt, 2009 年和 2016 年抑制了 2.18 Mt、2.52 Mt 碳排放量, 抑碳效果突出, 这归功于“十一五”时期, 京津冀区域通过关闭小规模火力发电厂、引进新工艺与新设备、提高能效水平等一系列节能减排举措, 实现了区域经济的低碳发展。“十二五”时期, 京津冀地区围绕大气污染防治、淘汰和置换落后产能、控制机动车污染等举措, 在联防联控持续努力下, 煤炭消耗总量得到有效控制。

由图(b)可知, 能源强度对碳排放的影响呈现不稳定的态势, 2006~2011 年碳减排年均增长率为 101.4%, 2017~2020 年抑碳效果有所下降, 2012~2015 年呈现促进碳排放的现象, 累积促碳 0.909 Mt, 原因可能是作为区域碳减排主要抓手和重要影响因素的产业结构在“十二五”至“十三五”期间得到显著持续性优化, 以及此阶段节能减排和清洁能源替代等低碳技术的创新, 进一步提高了能源效率, 但由于长期以来形成的能源高碳消费结构发展惯性很大, 短时间难以发生显著改变, 所以对碳排放抑制效应相对没那么显著。

由图(c)可知, 经济发展对碳排放的影响是正向的, 2006~2011 年促碳年均增长率为 12.55%, 2012~2015 年碳排放量缓慢下降, 但总体处于上升趋势。我国经济的迅速发展致使我国能源消费量也在迅速增长, 由于经济发展而产生的二氧化碳排放量不断上升, 成为了我国二氧化碳排放量不断上升的重要原因。由 2017、2019 和 2020 年的反向变化可知, 经济增长与碳排放量呈现脱钩的趋势。这可能和当时国家实施的一系列环保法规和措施有着直接关系, 把京津冀地区列为重点区域, 国家层面对环保的高度重视推动着地方政府及其相关部门生态环境保护责任的积极落实。

由图(d)可知, 人口变化对碳排放的影响表现为明显的促碳效应。2008 年人口变化引起的碳排放增加量达到了 0.818 Mt, 随后 2009 年呈现负效应, 可能因为 2008 年自然灾害和金融危机, 人口数量减少, 政府为了稳定经济增长, 推出了一系列积极的财政和货币政策, 导致 2009 年人口数量减少, 碳排放量增加。2010 年后基本呈现持续上升的态势, 主要是因为城镇化程度的提高, 城市人口的数量和城市的规模越来越大, 为了满足更高的生活需要, 电力和工业产值的扩增, 最终导致了能源消费的持续攀升, 从而带动了二氧化碳的排放。

### 4.3. 碳排放情景预测分析

#### 4.3.1. STIRPAT 模型参数选择

首先选择方差膨胀系数 VIF 作为评价标准, 检验变量之间的共线性, 见表 3, 根据该结果得到大多 VIF > 10, 说明各变量之间存在多重共线性问题, STIRPAT 模型不能准确估计变量。为了克服多个变量之间的共线性关系, 我们决定采用岭回归的方法, 它是一种基于最小二乘法的改进算法, 其代价是损失了一些信息, 减少了计算的准确度。当 K = 0.09 时, STIRPAT 模型各指标系数趋于平稳, 此时的 R<sup>2</sup> 为 0.96。说明在 K = 0.09 时岭回归拟合度能达到最优, 见图 2、图 3。在 SPSS 软件中设置岭回归惩罚项参数 K = 0.09 训练得出 STIRPAT 模型详细信息, 如回归系数、标准误差等。

Table 3. Collinearity judgment

表 3. 共线性判断

模型	非标准化系数		标准系数	t	显著性	共线性统计	
	B	标准错误	贝塔			容许	VIF
(常量)	-3.328	8.028		-0.415	0.687		
人均 GDP	0.181	0.235	0.369	0.769	0.459	0.015	64.858
产业结构	0.248	0.388	0.165	0.638	0.538	0.053	18.789
城镇化率	1.487	1.100	0.870	1.352	0.206	0.009	116.994
政府干预	-0.101	0.259	-0.165	-0.392	0.704	0.020	50.249
能源强度	-0.133	0.214	-0.089	-0.622	0.548	0.174	5.763

岭迹图

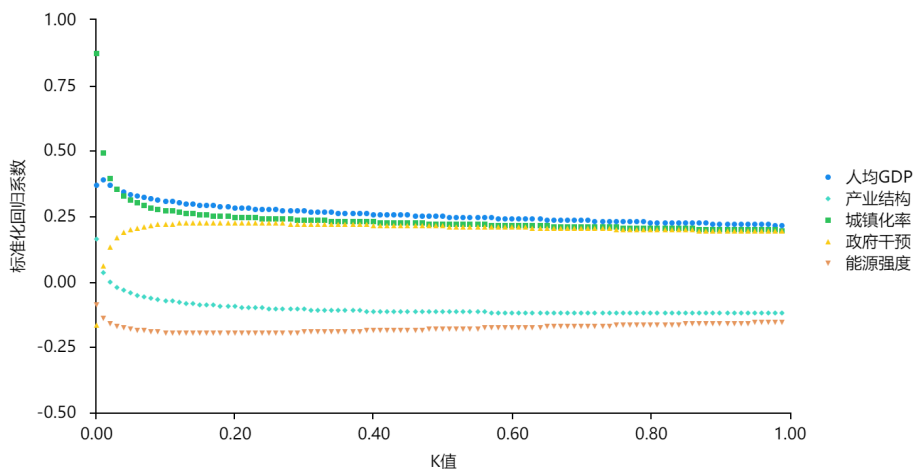
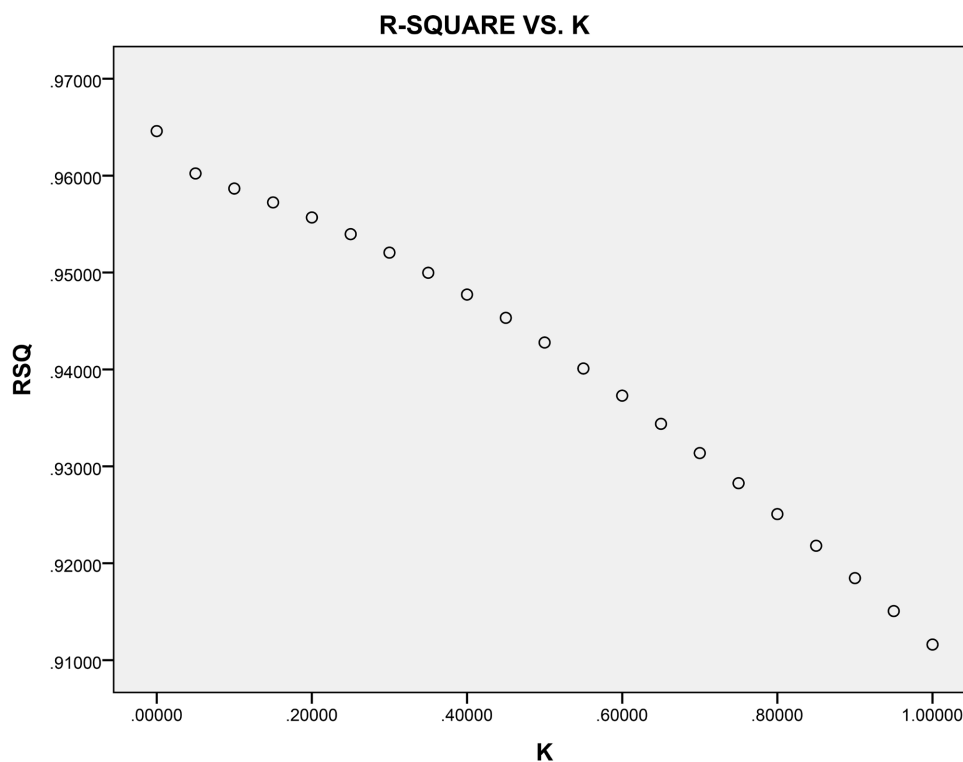


Figure 2. Ridge trace map of each influencing factor in Beijing-Tianjin-Hebei

图 2. 京津冀各影响因素岭迹图



**Figure 3.** Change of decision coefficient in Beijing-Tianjin-Hebei region  
**图 3.** 京津冀决定系数的变化

从表 4 京津冀岭回归结果中可以看出各影响因素的回归系数, 在其他条件不变的前提下, 城镇化率、政府干预和富裕程度每增加 1%, 碳排放量将分别增加 0.503%、0.132%、0.151%, 城镇化率增加 1%, 碳排放量将增加 0.503%, 产业结构和能源强度每增加 1%, 碳排放量将分别下降 0.084%、0.284%。政府干预、富裕程度、城镇化率影响因素的系数均为正数, 说明它们对碳排放量影响是正向的, 能源强度和产业结构对碳排放的影响是负向的。由表 4 可以看出 5 个影响因素大多通过显著性检验, 注意到几个影响因素的 p 值稍超过 0.1, 通过查阅相关资料, 发现个别对象的 p 值没通过不影响整个式子的显著性。

**Table 4.** Results of ridge regression

**表 4.** 岭回归拟合结果

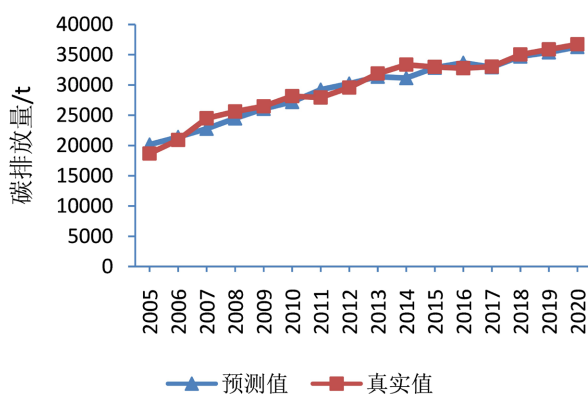
地区	$\ln J$	$\ln O$	$\ln G$	$\ln N$	$\ln A$	$K$
京	4.268***	-0.298***	0.352***	-0.076	0.101***	-9.524**
津	1.039***	-0.138*	0.162**	-0.122***	0.081***	3.915***
冀	0.261***	-0.179**	0.103***	-0.176**	0.102***	7.396***
京津冀	0.503***	-0.084	0.132***	-0.284***	0.151***	5.447***

注: \*、\*\*和\*\*\*分别表示在 10%、5%和 1%水平下的显著水平。

#### 4.3.2. 历史数据拟合

为了进一步验证上述模型估计式子是否准确, 现进行历史数据的拟合, 用 Excel 计算出京津冀 2005~2020 年拟合值并作出实际值与拟合值的折线图见图 4。





**Figure 4.** Comparison of predicted and real carbon emissions from STIRPAT model  
**图 4.** STIRPAT 模型碳排放预测值与真实值对比

从图 4 中可以看出 2017~2020 年碳排放的预测值和真实值基本一致, 2007~2010 年有轻微的偏差, 但偏差不大表明该模型建立的比较合理。

### 4.3.3. 情景设置

#### (1) 情景构建

结合我国碳减排政策, 选取的预测区间为 2021 年至 2040 年, 为保证预测具有真实可靠性, 借鉴我国的五年规划, 即以五年设定一个标准, 以 2020 年作为预测基期, 文章根据前人的研究设置了基准模式与高发展弱低碳、高发展强低碳、低发展弱低碳、低发展强低碳共 5 种情景。发展程度的高低通过调节人均 GDP、城镇化率、政府干预指标, 低碳程度的高低通过调节产业结构、能源强度指标, 见表 5。

**Table 5.** Scenario set of projected carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei  
**表 5.** 京津冀碳排放预测值情景组合

情景组合	政府干预	人均 GDP	能源强度	城镇化率	产业结构
基准模式	中	中	中	中	中
高发展弱低碳	高	高	低	高	低
高发展强低碳	高	高	高	高	高
低发展弱低碳	低	低	低	低	低
低发展强低碳	低	低	高	低	高

#### (2) 选取情景参数

① 政府干预: 在京津冀地区政府介入的比例相对稳定, 参考文献[1]对政府干预指标增速的设置, 根据路径依赖特征, 采用 2005~2020 年的年平均增速作为中值, 高低值分别增加或减少 0.5%。

② 城镇化率: 2005~2020 年京津冀城镇化率逐年递增, 2020 年达到 70%。结合文献[24]对我国 2016~2030 年城镇进程的预测, 依据文献[25], 到 2025 年天津市城镇化率达到 85%。北京市城镇化率已达 87% 以上, 未来增速缓慢, 所以设置了较低的变化率, 设定年均增长率为 1%, 高低值分别增加或减少 0.2%。

③ 人均 GDP: 当一个国家的经济增长达到一定的水平后, 其增长速度通常会趋于平稳。我国的经济已经进入了常态发展阶段。北京依据“2035 远景目标”设置参数, 天津按年均增长值设置基准变化率。河北省按照“十四五规划”设置增速, 到 2020 年 GDP 增速达到 3.9% 预期值, 年均增长 4% 左右,

高低值分别增加或减少 0.5%。

④ 产业结构：产业结构升级是如今一种不可避免的趋势，根据京津冀协同的整体布局、三省市各自的功能定位及其“十四五”规划，参照实际发展趋势及相关文献预测结果，参考文献[1]对 2015~2020 年的平均增长率进行计算，将其作为 2020~2025 年的一个参数，设置基准模式下年均增长率为 1%，高低值分别增加或减少 1%。

⑤ 能源强度：依据文献[25]，到 2025 年天津市能源强度 5 年累计降低 15%。依据“十四五”规划设定的约束值，计算其年均降速，“十四五”规划约定的能源消耗限制在 13.5%，所以我们设置基准值为-2.5%，高低值分别增加或减少 0.5%。

### (3) 情景预测结果分析

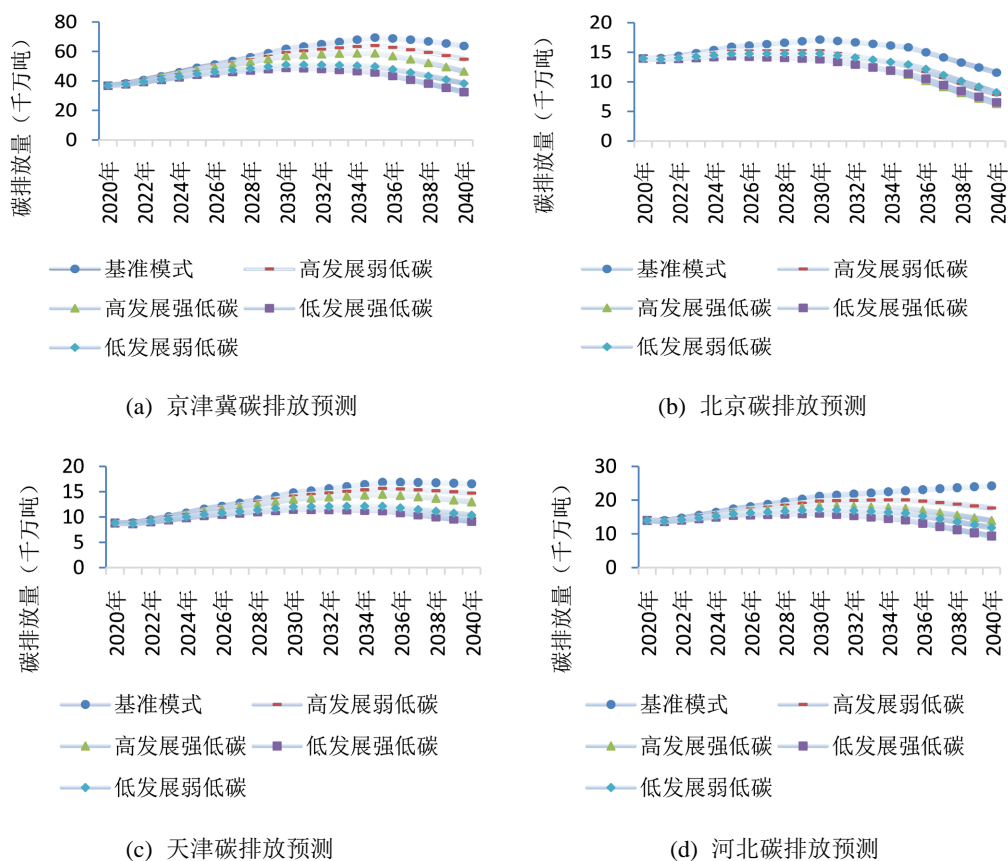


Figure 5. Regional carbon emissions projections

图 5. 地区碳排放预测

从图 5 中的图(b)可得北京除基准模式其他四种情景下在 2030 年实现了碳达峰,这可能因为受新冠疫情对行业开工率、交通活动水平的影响,基准年的碳排放低于正常情况。在高发展弱低碳情景下北京在 2030 年实现碳达峰,峰值为  $1.523 \times 10^8$  吨,并以 6.3%的速率逐年下降,北京作为首都城市高发展弱低碳情景无疑最适合的,在发展经济的同时要兼顾减排。从已有的文献可以发现北京在 2010 年已经实现碳达峰[26],与本文研究结果时间不同,但他们都能在 2030 年前完成碳达峰目标。这可能与研究方法模型和情景分析变量设定不同有关。

根据图 5(c)预测,天津市除低发展强低碳情景外其他四种情景在 2030 年前不能实现碳达峰目标。究

其原因,一方面,“大气十条”和“蓝天保卫战三年行动计划”的持续推动下,有效地治理了大气污染;另一方面,由于疫情及中美贸易摩擦的影响,天津市为缓解经济增长乏力而加大了对能源及资源的消费,导致 CO<sub>2</sub> 的排放也随之升高。在低发展强低碳情景下天津在 2030 年达峰,2030 年前碳排放量以增长率 2.73% 上升,2030 年后以 2.25% 增长率下降,峰值为  $1.151 \times 10^8$  吨,比基准情景峰值低 36.12%,对比五种情景发现只有在低发展强低碳情景下天津达峰时间最早,峰值最低,所以选择在此情景下完成碳达峰目标最为合理。

从图 5(d)可以看出河北基准情景下达峰时间在 2040 年之后,基准情景下 2030 年前未能实现碳达峰,一方面可能钢铁减产,钢铁工业是河北省最主要的能耗和碳排放来源[27],2021 年河北省发布了严格控制钢铁新增产能及产量的政策,钢铁产量同比下降 9.9%,可以预期仍将持续压减钢铁产量[28]。另一方面工业限产,受疫情防控、举办北京冬季奥运会的影响,河北省采取了短期内限制其他高排放工业开工的措施[26]。在其他情景下达达峰时间在 2030 年和 2035 年,其中低发展强低碳达峰时间最早,峰值  $1.611 \times 10^8$  吨最低,之后以 5.26% 增长率下降,所以选择在此情景下完成碳达峰目标。

图 5(a)展示了 5 种不同情景下京津冀地区的碳排放情况。从整体来看,京津冀地区将在 2030~2035 年间稳步实现达峰目标。五种情景下的峰值分别是  $6.943 \times 10^8$  吨、 $6.404 \times 10^8$  吨、 $5.875 \times 10^8$  吨、 $5.093 \times 10^8$  吨、 $4.884 \times 10^8$  吨,达到峰值的时间分别是 2035 年、2035 年、2035 年、2030 年、2030 年。其中低发展强低碳情景下达达峰时间最早,比基准情景早 5 年,且峰值  $4.884 \times 10^8$  吨最低,结合北京、天津、河北是全国异地务工人员最多的区域,也是我国经济发展迅速、资源环境不断恶化的区域,同时京津冀地区是重工业生产基地,其能耗高,CO<sub>2</sub> 排放量大的特点,京津冀整体可在低发展强低碳情景下完成碳达峰目标。

## 5. 结论与政策建议

### 5.1. 结论

文章首先核算京津冀城市群 2005~2020 年的碳排放量,采用灰色关联分析量化对碳排放影响,客观选择影响指标,通过 LMDI 模型从政府干预、城镇化率、人均 GDP、产业结构和能源强度五个指标探究京津冀城市群碳排放的主要驱动因素,最后基于 STIRPAT 对 2021~2040 年碳排放潜在变化进行动态情景分析,得出以下结论:(1) 灰色关联分析表明,相关度城镇化率 > 政府干预 > 人均 GDP > 能源强度 > 产业结构,且这些指标与碳排放相关度高,可以作为预测模型输入变量。(2) LMDI 分解结果表明,2006~2020 年间京津冀地区能源强度和能源结构对碳排放具有抑制效应,人口增长和经济发展对碳排放具有促进效应。(3) 情景预测结果表明,北京、天津和河北分别在高发展弱低碳情景、低发展强低碳情景下在 2030 年实现碳达峰目标,京津冀整体可在低发展强低碳情景下通过调整相关政策,实现碳达峰目标,在实现目标的过程中,需要采取差异化积极有效的措施促进碳达峰。

### 5.2. 政策建议

(1) 能源结构调整,做好能耗管控。构建清洁低碳新型能源体系,发挥出能源结构的碳贡献潜力。在碳达峰前,要强化电网的配置与调控,增加天然气、风电、核电等基础设施的建设,在碳达峰后,以低碳的燃料和新能源来应对新增能源需求。促进北京、天津两地引进非化石能源开发技术和设备与河北省丰富可再生能源资源融合,协同推进区域非化石能源开发利用,提高清洁能源占比,使区域能源消费结构趋于多元化。天津应加大对石化煤资源的控制力度,扩大清洁能源的使用范围,降低能耗。河北要通过产能置换、兼并重组、结构调整等途径,逐步降低对煤炭依赖,从而降低能耗。

(2) 产业结构调整,做好产业升级。加大对钢铁和电力等高耗能行业的节能力度。北京大力发展绿色、

低碳工业, 大力支持科技创新, 天津大力发展高端制造业, 河北大力推进发展新兴产业和先进制造业, 提高其行业准入门槛, 淘汰落后产业并通过政府引导及企业创新加快工业化进程。由于京津冀地区的产业联动北京将落后的工业转移到天津与河北地区, 导致产业结构优化的进程较为缓慢, 需要着重关注弱势地区工业进程, 提高其行业准入门槛, 淘汰落后产业并通过政府引导及企业创新加快工业化进程, 协调北京、天津及河北地区的经济同步发展。

(3) 政策制度调整, 做好顶层设计。要充分发挥政府的政策引导作用, 做到依法减排与依法治理相结合, 在强化减污减排的前提下, 实现经济社会的绿色转型。加强交流与合作, 构建京津冀地区优势互补、模式先进的低碳协作体系和制度体系。健全跨区域的联防联控机制, 构建碳排放协同治理的环境规制体系。提高减排与治理之间的协调性, 防止“政策打架”。出台更严格的强制性政策工具, 并将其应用到污染防治中, 健全法律依据, 从源头对排放进行控制, 并在此基础上, 进一步完善和优化相关激励政策, 如排污许可证、环境税、碳交易等。

(4) 实现路径调整, 做好差异化碳达峰行动方案。不能搞齐步走和“一刀切”。河北省是区域节能降碳工作中一块难啃的“硬骨头”, 今后, 应该进一步加速淘汰落后产能, 对钢铁、化工等重工业部门进行严格控制。北京天津作为潜在达峰城市, 在减排的同时要兼顾经济发展, 加强区域内绿色低碳协同合作, 如北京市可以利用自身技术创新的累积优势和人才优势, 加速前沿绿色低碳技术在区域内的普及和应用。通过优化城市规模等级体系, 加快北京、石家庄、天津都市圈的建设, 扩大唐山、保定、邯郸区域中心城市的规模, 提升都市圈城市的辐射带动效应, 使其能尽快完成碳达峰目标。

## 基金项目

2022 年度广西人文社会科学发展研究中心“科学研究工程”专项项目“‘双碳’目标下广西城市群碳达峰预测及差异化减排路径研究”(WKZX2022001); 四川省社会科学重点研究基地系统科学与企业发展研究中心重点项目“‘双碳’目标下我国城市群碳达峰预测及差异化减排路径研究”(XQ22B09)。

## 致谢

在完成本篇论文的过程中, 我得到了许多人的帮助和支持, 在此, 我要向你们表示最真挚的感谢, 感谢国家基金的资助, 给予我前进的动力。感谢所有对我有灵感帮助的资料所有者们, 提供的优秀资料。感谢我的导师, 在整个研究过程中给了我很多指导和建议。感谢我的朋友和加入给予我支持和鼓励。

## 参考文献

- [1] 王韶华, 赵暘春, 张伟, 等. 京津冀碳排放的影响因素分析及达峰情景预测——基于供给侧改革视角[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(6): 54-66.
- [2] Ang, B.W. (2004) Decomposition Analysis for Policymaking in Energy: Which Is the Preferred Method? *Energy Policy*, 32, 1131-1139. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00076-4)
- [3] 陈涛, 李晓阳, 陈斌. 中国碳排放影响因素分解及峰值预测研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(1): 396-406.
- [4] 梁青青. 基于经典环境库茨涅茨曲线的我国农业碳排放拐点预测及区域比较[J]. 科技与经济, 2017, 30(3): 106-110.
- [5] 许绩辉, 王克. 中国民航业中长期碳排放预测与技术减排潜力分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3412-3424.
- [6] 宋杰鲲, 康忠燕, 韩文杰, 等. 基于系统动力学的山东省能源消费碳排放预测[J]. 中外能源, 2019, 24(11): 91-99.
- [7] 李心萍, 苏时鹏, 张雅珊, 等. 福建省碳排放预测与碳达峰路径分析[J]. 资源开发与市场, 2023, 39(2): 139-147.
- [8] 李俊杰, 刘湘. 宁夏碳排放影响因素与碳达峰预测[J]. 中南民族大学学报(人文社会科学版), 2022, 42(7): 116-124+185-186.
- [9] 邱子健, 靳红梅, 高南, 等. 江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3):

658-669.

- [10] 王东, 吴长兰. 广东碳排放现状及预测研究[J]. 开放导报, 2015(6): 91-94.
- [11] 岳书敬. 长三角城市群碳达峰的因素分解与情景预测[J]. 贵州社会科学, 2021(9): 115-124.
- [12] 王少剑, 莫惠斌, 方创琳. 珠江三角洲城市群城市碳排放动态模拟与碳达峰[J]. 科学通报, 2022, 67(7): 670-684.
- [13] 刘贵利, 王依. 成渝地区实现“双碳”目标的时空预测及分区管治[J]. 环境保护, 2021, 49(16): 60-62.
- [14] 高国力, 文扬, 王丽, 等. 基于碳排放影响因素的城市群碳达峰研究[J]. 经济管理, 2023, 45(2): 39-58.
- [15] 王铮, 刘晓, 朱永彬, 等. 京、津、冀地区的碳排放趋势估计[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(1): 84-89.
- [16] 陈亮, 张楠, 王一帆, 等. 京津冀地区碳排放强度变化的驱动因素及其归因分析——基于细分行业与五年规划的视角[J/OL]. 中国环境科学, 2023: 1-17.
- [17] 黄昱杰, 刘贵贤, 薄宇, 等. 京津冀协同推进碳达峰碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 160-172.
- [18] 魏杰, 杨林. 经济新常态下的产业结构调整及相关改革[J]. 经济纵横, 2015(6): 1-5.
- [19] 李守林, 赵瑞, 陈丽华. 基于灰色关联分析 TOPSIS 的物流企业创新绩效评价[J]. 工业技术经济, 2018, 37(4): 12-21.
- [20] 吉兴全, 赵国航, 于一潇, 等. 基于 4E 平衡的碳排放因素分解与峰值预测方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2483-2494.
- [21] 郭朝先. 中国碳排放因素分解: 基于 LMDI 分解技术[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12): 4-9.
- [22] York, R., Rosa, E.A. and Dietz, T. (2003) STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts. *Ecological Economics*, **46**, 351-365.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00188-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00188-5)
- [23] 司志远, 杨明, 于一潇, 等. 基于卫星云图特征区域定位的超短期光伏功率预测方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1214-1223.
- [24] 袁方成, 陈泽华. 新时代新型城镇化的要素结构及其优化路径[J]. 华中师范大学学报(人文社会科学版), 2020, 59(3): 20-29.
- [25] 天津市人民政府. 天津市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要[EB/OL].  
[https://www.tj.gov.cn/zw/gk/szfwj/tjsrmzf/202102/t20210208\\_5353467.html](https://www.tj.gov.cn/zw/gk/szfwj/tjsrmzf/202102/t20210208_5353467.html), 2023-01-20.
- [26] 韩楠, 罗新宇. 多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1277-1288.
- [27] Guan, Y., Shan, Y., Huang, Q., et al. (2021) Assessment to China's Recent Emission Pattern Shifts. *Earth's Future*, **9**, e2021EF002241. <https://doi.org/10.1029/2021EF002241>
- [28] Zhou, J.K. and Li, Y.T. (2022) Research on Spatial Distribution Characteristics of High Haze Pollution Industries Such as Thermal Power Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Energies*, **15**, Article No. 6610.  
<https://doi.org/10.3390/en15186610>