

中国区域碳达峰关键路径研究

——以环渤海 C 型区域为例

陈楠, 庄贵阳

摘要: 环渤海 C 型区域拥有丰富的资源能源, 是我国传统的重工业基地, 促进该区域碳排放提前达峰是推动整个北方地区减少碳排放的关键。本文运用 Tapio 碳排放脱钩、EKC 曲线和 Mann-Kendall (MK) 综合判断历史碳达峰趋势, 运用情景分析预测未来碳达峰的轨迹, 结合低碳政策的执行力度划分梯次达峰的城市类型, 并进行影响因素研究, 提出不同的路径选择。分析发现, 2010—2020 年 C 型区域碳排放脱钩差异明显, 京津冀城市表现出高经济增长和低碳排放特征, 山东表现出高经济增长和中速碳排放特征, 山西和内蒙古表现出高经济增长和高碳排放特征, 辽宁表现出低经济增长和高碳排放特征; 一半以上城市的碳排放 EKC 曲线呈现倒 U 型; 20% 的城市已出现稳定的碳排放下降。预测结果显示, 河北、山东的大部分城市可在 2025 年左右达峰, 辽宁大部分城市在 2026 年左右达峰, 内蒙古和山西城市在 2030 年左右达峰, 根据达峰轨迹划定已达峰、达峰潜力型、达峰蓄力型和达峰压力型城市。本文据此提出, 城市内部结构调整的共性路径、创新路径、因势利导路径、集约型路径和追赶型路径。

关键词: C 型区域; 碳达峰轨迹; 影响因素分析; 路径选择

中图分类号: F124.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2023)03-0081-15

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2023.03.002

一、引言

我国力争二〇三〇年前实现碳达峰, 二〇六〇年前实现碳中和, 是推动高质量发展的内在要求^[1](P228)]。《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》中提出要在京津冀协同发展、粤港澳大湾区建设等重大实施战略中强化绿色低碳发展导向和任务要求^[2]。《2030 年前碳达峰行动方案》更是明确了各地区要准确把握自身发展定位, 坚持分类施策、因地制宜、上下联动, 梯次有序推进碳达峰^[3]。为此, 大量文献开始围绕长江经济带、珠三角、粤港澳大湾区的碳排放进行分析^[4], 而这些区域大多隶属南方, 经济活力较强、绿色低碳发展有利条件更多。相对而言, 北方基于资源禀赋和产业结构偏重特征, 低碳发展更为困难。现有对北方碳排放的分析更多集中于京津冀地区, 范围比较小。实际上, 辽宁和山东是我国重要装备制造基地, 产业结构和京津冀有很

基金项目: 国家社会科学基金项目“双碳目标下我国省域碳排放差异及公正、平等的碳补偿路径研究”(22BJY071); 北京市社会科学院智库重点项目“C 型空间下北京协同周边地区碳排放提前达峰路径研究”(2021A6544); 北京市社会科学院智库青年项目“北京降碳、减污、扩绿、增长协同效应分析及其路径研究”(KY2023B0011)

作者简介: 陈楠, 北京市社会科学院副研究员(北京 100029); 庄贵阳(通讯作者), 中国社会科学院生态文明研究所研究员、博士生导师, zhuang_gy@aliyun.com(北京 100102)

多可衔接之处,而山西和内蒙古更是为北京、天津输送了大量能源。从地理位置、经贸关系和能源合作等多方面看,这些地区的紧密合作是推动北方碳排放顺利达峰的关键。

以往研究中,狭义的环渤海经济圈是指京津冀、辽东半岛和山东半岛经济带。本文认为,基于地理位置、生态协同^①、经济关联^[5]及交通便利程度,该经济圈可辐射到山西、辽宁、山东及内蒙古部分地区,形成C字型结构。该地区承载了全国22%左右的人口,拥有丰富的资源能源,是我国传统的重工业基地,但近年来经济下行严重,地区生产总值占全国GDP比重从2010年的29.66%下降至2020年的21.62%,而碳排放水平一直较为稳定,2010年碳排放占全国碳排放的35.92%,2020年为36.39%,超过全国碳排放的1/3,说明该地区的减碳任务严峻,能否顺利实现碳排放提前达峰影响全国目标的完成。C型区域内各市发展差异巨大,既有北京、天津这类经济社会环境发展先进的直辖市,又有石家庄、济南、沈阳等工业基础雄厚的省会城市,更有包头、晋城等能源型城市,有效利用资源禀赋差异,探索碳排放达峰的差异性路径至关重要。基于此,本文利用碳排放脱钩、EKC和碳排放趋势性检验、情景分析的组合方法,结合各地政策力度,综合判断城市层面的碳达峰轨迹,分析碳达峰的影响因素并提出不同类型城市的减碳路径,为全国碳达峰目标完成提供一定的现实依据。

二、文献综述

现有碳达峰的文献主要围绕碳达峰轨迹、碳达峰方法学、影响因素和路径展开。

在碳达峰时间和峰值水平研究中,从时间来看,碳达峰一般分为历史达峰和未来达峰。历史碳达峰要求和最新的排放清单相比,该地区碳排在5年或更久的时间达到峰值,之后以年均2%的速度下降,5年间至少下降10%。未来碳达峰要求有明确的碳排放峰值目标和减排行动方案,若无目标,则需要保证未来的排放水平要降低到历史水平以下^{[6](P21)}。在国家层面上,大部分学者认为中国碳排放将在2030年之前达到峰值。中国工程院预测中国2027年前后碳达峰,峰值控制在122亿吨左右^[7]。全球能源互联网发展合作组织预测2028年左右中国全社会碳达峰,峰值在115亿吨左右^{[8](P56)}。区域层面,部分文献根据Tapio模型,分析了华北、东北、华东、华中、华南、西南等不同区域碳排放脱钩趋势,发现其基本需要经历扩张挂钩—弱脱钩—强脱钩的变化^[9]。

碳达峰预测方法多样,主要可归纳为五类。一是通过环境库兹涅茨曲线(EKC)判断是否出现拐点,再判断峰值^[10]。二是基于脱钩理论,利用OECD脱钩模型、DPSIR脱钩模型和Tapio模型判定是否达峰^[11]。三是在碳排放相关影响因素分析基础上进行峰值预测,主要围绕IPAT模型、STIRPAT模型、Kaya模型、地理加权回归模型等展开,能源结构、经济水平、产业结构、技术进步、人口数量等是常用的影响指标^[12]。四是基于系统优化模型,诸如自上而下的CGE模型、GTAP-E模型、IAMC、IPAC模型以及自下而上的LEAP、China Times模型等^[13]。该类方法对数据要求较高,因模型变量采用固定的变化率,可能出现忽视地区异质性和技术进步带来的碳排放降低问题。五是其余方法。为剔除单情景或多情景变化率固定的局限,已有研究使用统计学方法,如蒙特卡罗随机取值和Mann-Kendall(MK)趋势检验配合情景预测来避免上述误差,并且可以不受历史碳排放数据异常值干扰^[14]。

在讨论碳排放的影响因素中,Kaya恒等式、对数平均Divisia指数(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)、指数分解框架(Index Decomposition Analysis, IDA)、结构分解(Structural Decomposition Analysis, SDA)、基于生产理论的分解(Production-theory Decomposition Analysis,

① 《林业发展“十三五”规划》提出京津冀生态协同圈的概念,认为京津冀协同发展生态空间的范围包括北京、天津、河北三省市全部,以及山西东部、内蒙古中段南部、辽宁西南部、山东西北部。

PDA)都是主流方法^[15]。部分研究又将能源强度变化的综合分解框架拓展到碳强度的变化中,并将分解结果扩展到产业和区域层面论证减排效果^[16]。

路径选择方面,大部分文献根据碳达峰趋势和经济水平聚类,将区域进行划分进而提出相应减排路径。如张诗卉等将31个省份划分为达峰示范、低碳潜力、重工业转型期、能源基地和低碳转型初期的省份^[11]。郭芳等把城市划分为低碳潜力型、低碳示范型、人口流失型、资源依赖型和传统工业转型期等不同类型,认为低碳潜力型城市和传统工业转型期城市是决定我国能否落实2030年达峰目标的关键^[17]。

综合来看,现有文献基于全国、区域、省份的碳达峰展开了一系列研究,很有借鉴价值,但仍存在一定不足。一是碳达峰研究方法相对独立,以某一种方法判断达峰与否过于片面。碳达峰预测涉及经济、人口、能源和科技等多因素,而目前预测碳达峰及情景模拟多侧重于静态或单一层面,缺乏多因素的系统分析。二是研究对象主要集中在国家和区域层面,城市的研究较少,差异性研究不足。三是碳达峰的路径较为趋同,对政府部门的决策参考价值不足。很多文献仅基于模型考量,忽视了当地政策规划和政府的实际执行力水平,特别是在经济增速放缓、不稳定不确定因素增加的背景下,已有文献基于模型的结果解释不够充分,碳排放变化特征解释不够清晰,减排路径“不落地”。基于此,本文的边际贡献主要体现在三个方面。一是将碳达峰从省级层面落位于城市层面,运用不同的方法组合分析历史达峰和未来达峰,综合判断碳达峰轨迹和稳定性。二是强化了碳排放的差异性研究。C型区域的城市资源禀赋、经济社会发展差异巨大,对不同城市划分碳达峰类型,并进行碳减排影响因素分析,可以找出不同城市达峰面临的主要问题。三是重视地方政府的低碳政策执行情况和能力,结合达峰轨迹,提出较为实用的路径选择。

三、研究方法 with 数据来源

纵观发达国家的碳达峰历程都经历了一个较长的高位平台波动期,多峰凸起,而非线性单峰,因此常把碳达峰分为历史达峰和未来达峰两个部分。既有文献常把历史达峰与碳排放的影响因素或者未来达峰(又称为情景预测)与碳排放影响因素结合在一起讨论,但尚未把三者纳入统一分析框架而展开理论和实证研究。从逻辑上看,历史达峰可以掌握碳排放波动趋势,未来达峰可以获得理性认知和预期,能够较有效选择减排方式。本文从经济与碳排放脱钩的宏观层面、技术层面和稳定性三个层面综合判定历史碳达峰的轨迹。

(一) Tapio 碳排放脱钩分析

从宏观经济与碳排放的脱钩情况来判定经济发展模式的可持续性,OECD率先使用脱钩指数来衡量经济与环境间的关系。随后Tapio^[18]以交通运输为中间变量,分析了运输量与GDP、碳排放之间的脱钩弹性。Tapio模型也被广泛应用于碳排放的相关分析^[19]。

Tapio模型采用碳排放量与经济发展之间的比值来确定碳排放的脱钩系数。

$$e = \frac{\Delta CO_2 / CO_2}{\Delta GDP / GDP} \quad (1)$$

其中, e 代表碳排放脱钩系数, $\Delta CO_2 / CO_2$ 和 $\Delta GDP / GDP$ 分别代表二氧化碳和GDP基期到末期的变化率。根据碳排放、GDP增长率情况和脱钩系数划分为八种不同脱钩状态(如表1所示)。

(二) Mann-Kendall (MK) 趋势检验

从技术层面判断城市碳排放的阶段性水平,通常用碳排放和人均GDP作EKC分析^①。人均GDP

① 由于EKC分析方法较为成熟以及篇幅有限,该部分具体方法未展开叙述,实证结果如图1所示。

代表地区技术水平，可以分析技术水平的提高是否带来了碳排放的减少，以此判定达峰拐点是否来临。

为判断碳达峰的稳定性并模拟峰值水平，避免研究期内由于诸如新型冠状病毒感染疫情等历史异常值干扰带来的“假达峰”现象，本文从统计学的视角，采用 Mann-Kendall (MK) 趋势分析。该方法在气候序列趋势的统计分析与判断方面广为应用。

假设样本量为 n 年的碳排放时间序列数据，则构建检测统计量

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (2)$$

对 S 进行方差计算并转换为统计量 Z_{MK} 。

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0, n \geq 10 \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}}, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中， $\text{sgn}()$ 为符号函数， X_i 和 X_j 分别为第 i 年和 j 年的碳排放量且 $j > i$ ， Z_{MK} 满足正态分布。令显著性水平 $\alpha = 0.05$ ，当 $n \geq 5$ 时， S 所对应的概率 $p \leq \alpha$ ，则拒绝零假设，认为趋势显著，即最大值年份后的城市碳排放有显著下降趋势；若 $p > \alpha$ ，则接受原假设，认为趋势不显著，最大值年份后的城市碳排放没有显著下降趋势，处于平台期。当 $n < 5$ 时，表明未出现达峰迹象。结合已有研究，初步判定的达峰标准如表 2 所示。

表 2 基于 MK 检验的碳达峰评判标准

碳达峰阶段	评判标准	说明
已达峰	有显著峰值，峰值点距期末 ≥ 5 年，在 0.05 显著性水平以下， Z_{MK} 为负，MK 检验结果显著	碳排放达到峰值，且碳排放稳定下降
平台期	有显著峰值，峰值点距期末 ≥ 5 年，但在显著性水平 0.05 以上， Z_{MK} 为负，MK 检验结果不显著	碳排放达到峰值，但碳排放未出现稳定下降趋势
未达峰	无显著峰值，或峰值点距期末不足 5 年， Z_{MK} 为负或由正转负	碳排放未达到峰值，或达峰时间过短
达峰困难	碳排放呈总体上升趋势	碳排放未达到峰值

资料来源：作者整理。

（三）碳减排的影响因素分析

未来碳达峰的情景分析建立在模型设定的基础之上，可借助计量或数理模型总结出碳排放在各影响因素下的变动趋势，再对各变量进行设定，得到碳排放轨迹^[20]。IPAT 模型可以分析人口规模 (P)、富裕程度 (A)，技术水平 (T) 对环境压力 (I) 带来的影响，故部分研究者把该模型引入分析碳排放的影响。但是 IPAT 模型无法解释多因素对碳排放带来的非线性影响^[20]，比如本文碳排放 EKC 曲线出现的 U 型、倒 U 型曲线等，因此将模型扩展为 STIRPAT 模型。该模型可同时完

成预测和影响因素的分析。

$$I = aP_{it}^b A_{it}^c T_{it}^d \epsilon_{it} \quad (4)$$

其中, b , c 和 d 分别为 P , A , T 的系数, a 为常数项, ϵ 为误差项。对公式两边取对数可得公式 (5)。

$$\ln I_{it} = a + b \ln P_{it} + c \ln A_{it} + d \ln T_{it} + \epsilon_{it} \quad (5)$$

本文把影响因素拓展为四类,即规模效应、结构效应、技术效应和要素集聚效应。以人口规模(P)和财富提升(人均GDP)来表征规模效应。结构效应中,产业结构和能源结构是碳减排的最主要因素,以第三产业占比(IS)表征产业结构;能源消费与电力消费相关性高^[21],以人均电力消费水平(ES)间接反映能源结构的清洁化转变^[22],鼓励以电代煤^①。技术进步具有双重性,已有文献发现技术不单纯表现为减少碳排放,还可能由于技术边际效应递减而增加碳排放^[23],因此技术效应具有不确定性。为验证C型地区的技术效果,本文选择科学技术支出(T)和能源强度(EI)进行分析。要素集聚效应的研究略少。实际上,经济要素再配置产生集聚效应,一方面会通过要素集聚推动技术进步,提高生产效率而减少碳排放,另一方面因为要素集聚扩大生产规模,又可能造成碳排放的增加,而C型地区的经济集聚度差异明显,有必要对不同类型城市经济的集聚对碳排放是正向还是负向作用进行分析。本文借鉴邵帅等^[24]做法,采用地级市第二、三产业增加值总和与城市行政面积总和之比来度量经济集聚度(EC)。

拓展后的STIRPAT模型如公式(6)。

$$\ln TC_{it} = \ln a + b \ln P_{it} + c \ln PGDP_{it} + d \ln IS_{it} + e \ln ES_{it} + f \ln T_{it} + g \ln EI_{it} + h \ln EC_{it} + \epsilon_{it} \quad (6)$$

其中, TC 为碳排放总量, P 为人口总量, $PGDP$ 为人均GDP, IS 为第三产业占比, ES 为人均用电量, T 为科学技术支出, EI 为能源强度, EC 为经济集聚度。

(四) 数据来源

2010—2019年的能源数据主要来源于各省或市统计年鉴,2020年能源数据来源于各地市统计局官网;碳排放总量主要为能源消费碳排放,核算方法和排放因子参照联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的碳排放核算方法进行估算。人均GDP、人口总量、产业结构、科学技术支出、全社会用电量^②来自《中国城市统计年鉴》。数据的描述性统计如表3所示。

表3 样本描述性分析

变量	Mean	Sd	Min	Max
TC (万吨)	6 098.49	4 634.38	631.60	21 017.09
P (万人)	587.66	426.31	53.45	2 189.31
$PGDP$ (元/人)	6.05	2.98	1.70	16.49
IS (%)	45.86	11.39	23.52	83.87
ES (千瓦时/人)	3 082.38	3 356.46	29.59	21 934.61
T (万元)	178 902.70	538 614.00	1 447.00	4 334 165.00
EI (吨/万元)	0.93	0.58	0.18	4.25
EC (万元/平方公里)	4 973.26	5 550.24	329.64	39 966.01

资料来源:作者计算整理。

① 因数据可得性制约,地级市较难获取连续年份煤炭消费占比或非化石能源消费占比等结构数据。

② 人均电力消费为全社会电力消费与常住人口的比值。

四、实证分析

（一）主要城市历史碳达峰分析

对 C 型区域 7 省（市）的碳排放脱钩分析发现，北京、天津达到增强脱钩，河北、山东、辽宁、山西进入减弱脱钩，内蒙古仍处于增长负脱钩。在 35 个主要城市中，15 个城市进入增强脱钩，14 个城市进入减弱脱钩，2 个城市处于增长连接，2 个城市处于增长负脱钩，1 个城市处于衰退脱钩，1 个处于增强负脱钩（如表 4 所示）。以区域划分，京津冀共有 13 个城市，其中 8 个达到增强脱钩，4 个减弱脱钩、1 个增长连接，即 61.54% 的城市已经出现碳排放减少、GDP 增加的情况，30.77% 的城市碳排放增速小于 GDP 增速。为便于分析，本文把京津冀以外的地区合并称为其他地区。分析发现 22 个城市中，仅有 7 个城市达到增强脱钩，主要集中于山东的济南、青岛、济宁、烟台、泰安以及辽宁的沈阳、阜新；山西、内蒙古一半以上的城市处于减弱负脱钩；辽宁部分城市 GDP 增速低于碳排放增速，抚顺甚至出现最差的结果，GDP 负增长而碳排放正增长。

2010—2020 年 C 型区域的碳排放和 GDP 出现明显的差异化，可以划分为四类。第一类集中在京津冀，呈现“高一低”^①现象，减碳效果最为乐观。该地区 GDP 以年均 7% 速度增加，碳排放以年均 1% 的速度增加，其中已有 8 个城市碳排放增速减缓。第二类集中在山东省，呈现“高一中”现象。该地区经济增速最高，GDP 年均增速达到 7.58%，碳排放以年均 1.2% 速度增加，青岛、济南两大中心城市减碳的带动效果最为明显。第三类集

表 4 C 型空间下主要城市碳排放脱钩情况

城市	$\Delta CO_2 / CO_2$	$\Delta GDP / GDP$	e	脱钩状态
北京	-0.017	0.098	-0.173	增强脱钩
天津	-0.001	0.043	-0.023	增强脱钩
河北	0.020	0.060	0.333	减弱脱钩
山西	0.030	0.070	0.429	减弱脱钩
辽宁	0.010	0.030	0.333	减弱脱钩
山东	0.020	0.060	0.333	减弱脱钩
内蒙古	0.050	0.040	1.250	增长负脱钩
张家口	-0.045	0.052	-0.865	增强脱钩
秦皇岛	-0.003	0.061	-0.049	增强脱钩
保定	-0.026	0.066	-0.394	增强脱钩
邯郸	-0.027	0.044	-0.614	增强脱钩
石家庄	-0.024	0.057	-0.421	增强脱钩
廊坊	-0.005	0.093	-0.054	增强脱钩
沈阳	-0.006	0.027	-0.222	增强脱钩
济南	-0.003	0.100	-0.030	增强脱钩
青岛	-0.018	0.081	-0.222	增强脱钩
济宁	-0.008	0.059	-0.136	增强脱钩
烟台	-0.005	0.060	-0.083	增强脱钩
泰安	-0.007	0.030	-0.233	增强脱钩
阜新	-0.036	0.029	-1.241	增强脱钩
邢台	0.012	0.061	0.197	减弱脱钩
承德	0.006	0.057	0.105	减弱脱钩
唐山	0.006	0.049	0.122	减弱脱钩
衡水	0.025	0.072	0.347	减弱脱钩
太原	0.007	0.089	0.079	减弱脱钩
大同	0.042	0.070	0.600	减弱脱钩
晋城	0.026	0.069	0.377	减弱脱钩
大连	0.011	0.031	0.355	减弱脱钩
营口	0.005	0.028	0.179	减弱脱钩
朝阳	0.004	0.029	0.138	减弱脱钩
呼伦贝尔	0.014	0.023	0.609	减弱脱钩
乌海	0.023	0.037	0.622	减弱脱钩
呼和浩特	0.002	0.041	0.049	减弱脱钩
潍坊	0.007	0.066	0.106	减弱脱钩
沧州	0.054	0.053	1.019	增长连接
盘锦	0.039	0.035	1.114	增长连接
辽阳	0.024	0.013	1.846	增长负脱钩
包头	0.049	0.013	3.769	增长负脱钩
本溪	-0.045	-0.006	7.500	衰退脱钩
抚顺	0.004	-0.008	-0.500	增强负脱钩

资料来源：作者计算。

^① “高一低”为经济高增长、碳排放低增长；“高一中”为经济高增长、碳排放中速增长；“高一高”为经济高增长、碳排放高增长；“低一高”为经济低增长、碳排放高增长。

中在山西和内蒙古,呈现“高一高”现象。这两个地区属于传统能源大省,由于路径依赖,碳排放基数大,增速也高,内蒙古碳排放以年均5.19%速度增加,属于C型区域中碳排放最大的省份。与此同时,两省份的能源消费也支撑了GDP高速增长,内蒙古和山西的GDP年均增速分别达到6.9%和6.3%。第四类集中于辽宁,呈现“低—高”现象。辽宁国有工业企业集中、资源枯竭特点突出,全省的GDP年均增速为5.21%,排C型区域末位,不论是东北振兴战略之前还是之后,该地区的工业基础、基础设施都不算落后,但仍未找到破解经济增长与碳排放减少之间矛盾的有效途径。

从城市碳排放EKC曲线来看,基本呈现倒U型曲线下降、完整倒U型曲线、倒U型曲线上扬和U型曲线四种状态^①,其中北京、张家口、秦皇岛、大连4个城市表现最优,已经处于倒U型曲线的下降阶段。出现完整倒U型和处于倒U型曲线上扬阶段的城市分别占到54.29%和28.57%(如图1、表5所示),这些城市基本对应碳排放的增强脱钩与减弱脱钩状态。本溪、阜新2个城市较为特殊,呈现U型趋势,城市常住人口在200万以下,若上马高耗能项目,碳排放会急剧升高。

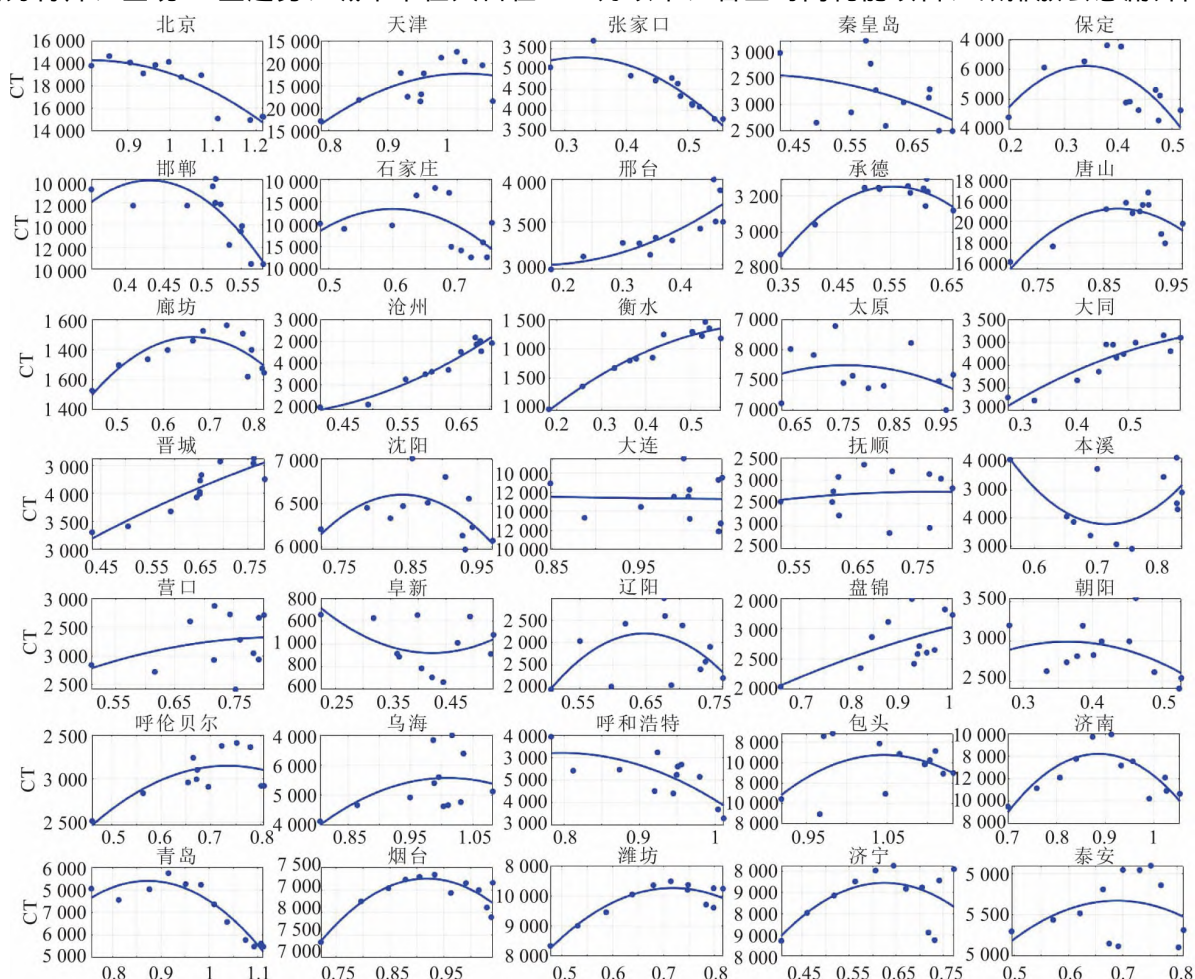


图1 主要城市碳排放EKC曲线

注:纵轴表示碳排放,单位为万吨;横轴表示取对数后的人均GDP。

资料来源:作者计算整理。

^① 碳排放EKC曲线反映碳排放与人均GDP之间关系。倒U型曲线下降,表明2010—2020年已出现碳排放下降和人均GDP上升,属于最佳阶段;完整倒U型曲线表明从碳排放上升和人均GDP上升向碳排放下降和人均GDP上升转变,效果较好;倒U型曲线上扬,表明正经历碳排放上升和人均GDP上升,效果欠佳;U型曲线较为特殊,从碳排放下降和人均GDP上升向碳排放上升和人均GDP上升转变,表明发展方式存在问题,需要引起重视。

表 5 城市 EKC 曲线的分布

EKC 曲线形态	城市
倒 U 型曲线下降	北京、张家口、秦皇岛、大连
完整倒 U 型曲线	天津、保定、邯郸、石家庄、承德、唐山、廊坊、沈阳、朝阳、辽阳、济南、青岛、烟台、济宁、潍坊、泰安、太原、呼和浩特、包头
倒 U 型曲线上升	邢台、沧州、衡水、大同、晋城、抚顺、营口、盘锦、呼伦贝尔、乌海
U 型曲线	本溪、阜新

资料来源：作者计算汇总。

在 MK 检验中，需要满足最大值出现后满 5 年，Z 值为负，且具有显著性，才表明碳排放达峰。满足该标准，碳排放下降随时间变化显著性达到 0.01，且 Z 值全部为负的有北京、张家口、邯郸、廊坊、本溪、阜新、青岛，这些城市碳排放稳定下降，已具备达峰的条件；显著性达到 0.05，Z 值全部为负的有天津、秦皇岛、保定、石家庄、潍坊，朝阳的 Z 值也由正转负，说明这些城市碳排放已进入平台期；显著性达到 0.1 的有沈阳、济南、邢台、承德、衡水、大连、抚顺、营口，虽然这些城市碳排放下降，但年份未满 5 年，Z 值正负交替，说明碳排放的下降并不稳定；其余能源型城市无显著性（如表 6 所示）。可以看出，碳排放下降进入平台期的城市主要集中在京津冀和辽宁的个别城市。

表 6 主要城市碳排放量变化的 MK 检验结果

城市	2010—2020	2012—2020	2014—2020	2018—2020	最大值年份	最大值后年数	峰值—2020	显著性
北京	-2.80	-1.98	-1.50	0.00	2010	10	-2.80	0.01
天津	-1.09	-1.98	-2.10	0.00	2014	6	-2.10	0.05
张家口	-3.74	-3.02	-2.40	-1.04	2010	10	-3.74	0.01
秦皇岛	-1.25	-2.40	-1.20	-1.04	2012	8	-2.40	0.05
保定	-2.18	-1.98	-0.60	-1.04	2012	8	-1.98	0.05
邯郸	-2.34	-3.02	-2.70	-1.04	2014	6	-2.70	0.01
石家庄	-1.71	-2.19	-1.50	0.00	2013	7	-2.10	0.05
邢台	2.65	1.98	0.90	-1.04	2017	3	-1.70	0.10
承德	-0.47	-1.36	-1.50	-1.04	2017	3	-1.70	0.10
唐山	-0.62	-1.77	-0.60	1.04	2013	7	-1.36	0
廊坊	-0.78	-1.77	-2.70	-1.04	2015	5	-2.63	0.01
沧州	3.11	2.19	0.90	1.04	2016	4	-0.73	0
衡水	2.65	1.56	0.00	-1.04	2017	3	-1.70	0.10
太原	-0.16	-0.52	0.00	0.00	2012	8	-0.52	0
大同	2.49	1.36	0.90	0.00	2018	2	0.00	0
晋城	3.43	2.61	1.50	0.00	2019	1	0.00	0
沈阳	-1.56	-1.15	0.30	-1.04	2011	9	-1.79	0.10
大连	1.25	0.94	0.00	-1.04	2017	3	-1.70	0.10
抚顺	1.56	0.52	-0.60	-1.04	2017	3	-1.70	0.10
本溪	-3.89	-3.44	-2.70	-1.04	2011	9	-3.76	0.01
营口	1.56	0.52	-1.20	-1.04	2017	3	-1.70	0.10
阜新	-3.58	-3.23	-2.40	-1.04	2011	9	-3.58	0.01
辽阳	3.43	2.61	1.80	-1.04	2018	2	-1.04	0
盘锦	3.58	2.81	2.10	-1.04	2018	2	-1.04	0
朝阳	0.47	0.10	-0.90	-1.04	2015	5	-2.25	0.05
呼伦贝尔	0.16	-0.94	0.30	1.04	2013	7	-0.37	0
乌海	0.47	-0.31	1.20	1.04	2013	7	0.12	0
呼和浩特	-0.62	-0.31	1.50	1.04	2012	8	-0.31	0
包头	3.11	2.19	2.10	1.04	2020	0	0.00	0
济南	-1.09	-2.19	-1.80	-1.04	2014	6	-1.80	0.10
青岛	-3.05	-3.56	-2.89	-0.61	2012	8	-3.56	0.01
烟台	-0.93	-1.98	-1.50	-1.04	2014	6	-1.50	0
潍坊	0.16	-1.56	-2.40	-1.04	2014	6	-2.40	0.05
济宁	0.00	-1.15	-1.20	-1.04	2014	6	-1.20	0
泰安	-1.09	-1.77	-1.80	-1.04	2015	5	-1.50	0

资料来源：作者计算。

(二) 主要城市未来碳排放预测

本部分主要根据经济规模、产业结构、能源强度的变化趋势,结合预测方法和情景分析来进一步推断各城市的碳达峰轨迹。经济规模、产业结构、能源强度主要依据“十二五”规划以来及“十四五”规划和2035年远景目标及变速推算。本文设置了三种碳排放情景,即极低碳情景、低碳情景和高碳情景。与低碳情景相比,极低碳情景和高碳情景下的经济增速、产业结构和能源强度差异分别为0.05、0.6和0.1。绝大多数城市在预测期内的经济增速呈下降趋势,2020—2030年约以年均0.1个百分点递减,2031—2040年以年均0.15个百分点递减;能源强度降幅也呈下降趋势,2020—2031年约以年均0.05个百分点递减,2031—2040年以年均0.1个百分点递减。其中,能源结构较重的省份对其所有城市单独使用了对应的经济增速与能源强度降幅,包括河北省、山西省和山东省。

主要城市分别对应极低碳情景、低碳情景和高碳情景下的达峰轨迹(如图2所示)。极低碳情景

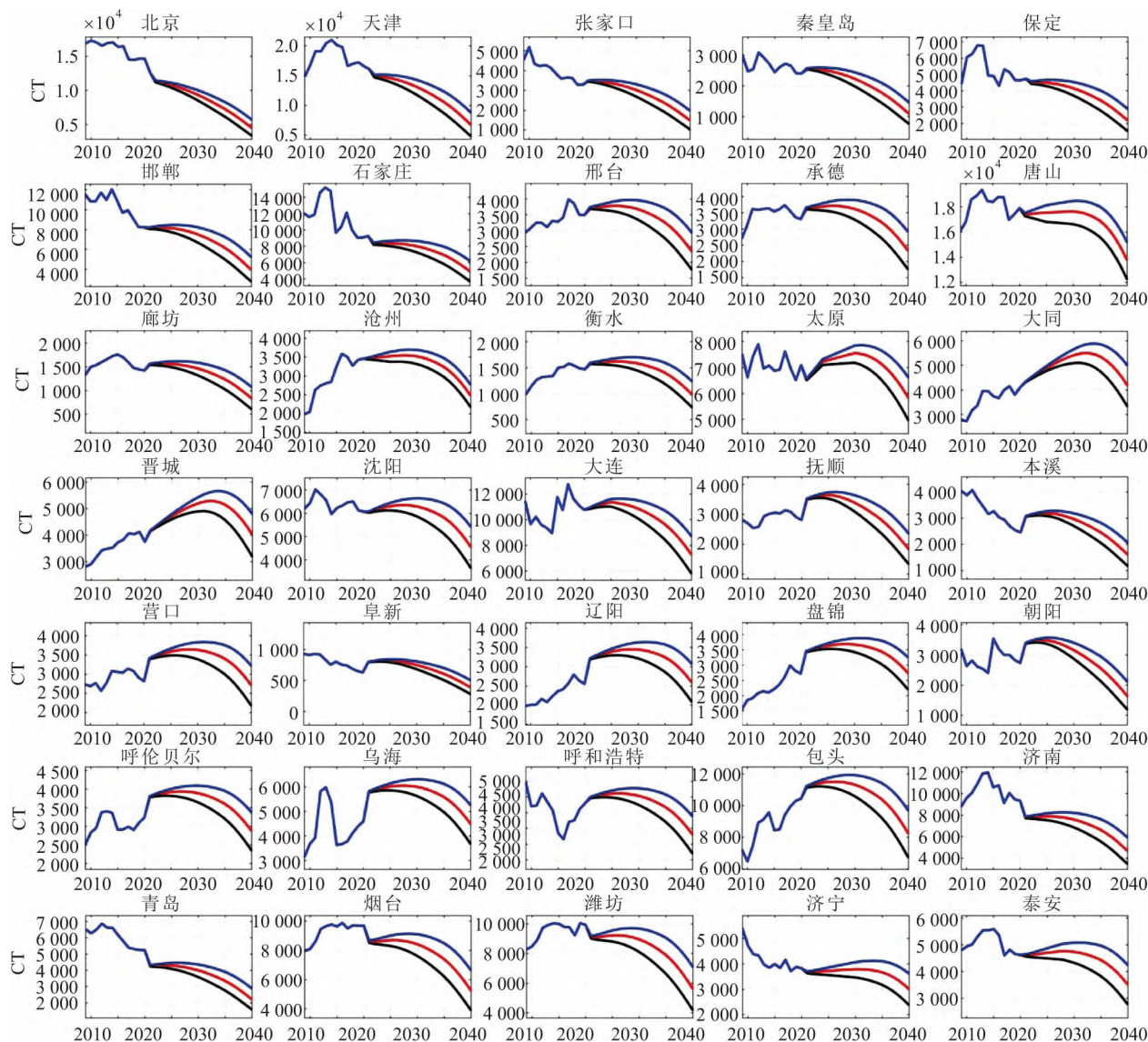


图2 C型区域各市碳排放情景模拟

注:图中所有小图线条由下至上依次表示高碳情景、低碳情景和极低碳情景;纵轴表示碳排放,单位为万吨;横轴表示时间,单位为年。

资料来源:作者计算整理。

需要能源和产业结构大幅调整，高碳情景与现有结构水平相差不大，低碳情景在考虑积极转型基础上注重现实环境，是最有可能发生的情景。除北京、张家口分别在 2020 年、2021 年达峰外，河北、山东的城市大部分可在 2025 年左右达峰，低碳情景的平均峰值可比高碳情景平均峰值低 3.70% 和 5.72%；其次为辽宁大部分城市在 2026 年左右达峰，低碳情景的平均峰值比高碳情景平均峰值低 3.78%；内蒙古和山西在低碳情景下在 2030 年左右达峰，低碳情景的平均峰值比高碳情景平均峰值低 3.86% 和 6.03%。值得注意的是，在低碳情境下，河北唐山，辽宁营口、辽阳、盘锦，内蒙古乌海，山东泰安的达峰年份逼近 2030 年，要防止松懈情绪，避免达峰年份的延迟；山西太原、大同、晋城达峰年份可在 2030 年后，但仍要力争提前。

（三）不同类型城市碳减排影响因素

在中国的制度环境下，影响碳达峰的因素还应该考虑不同城市特征以及地方政府的推动力度。以大数据获取地方与“双碳”相关的文件数量作为执行能力的考核标准，综合划分城市类型，再对每类城市的碳排放影响因素进行分析。以省（直辖市）为单位，官方显示，北京已正式宣布 2020 年达峰，天津计划 2025 年达峰，山东和辽宁分别在 2027 年和 2028 年达峰，河北、山西、内蒙古提出 2030 年前达峰。通过大数据样本识别，发现地方政府以形式多样的方式推动达峰，主要措施包括成立领导小组或专班强化落实，出台碳达峰行动方案、双碳实施意见，从能耗“双控”逐渐转向碳排放“双控”，推出各类鼓励政策、项目试点，建立碳排放目标责任制并进行考核等五个方面（如表 7 所示）。

表 7 2021 年 C 型区域城市碳达峰相关政策出台及执行情况

政策及执行内容	城市
成立碳达峰碳中和工作领导小组，强化落实	北京（2）、天津（1）
政府出台城市或分领域碳达峰行动方案、碳达峰碳中和实施意见等	北京（30）、天津（15）、石家庄（1）、张家口（1）、邯郸（1）、唐山（1）、济南（7）、青岛（1）、烟台（1）、呼和浩特（1）
城市或多领域逐渐从能耗“双控”转向碳排放“双控”，明确了碳排放“双控”目标值	北京（58）、天津（23）、秦皇岛（2）、邯郸（2）、济南（3）、青岛（2）、泰安（1）、大连（1）
围绕“双碳”目标出台各类鼓励政策、法律规范和相关试点	北京（491）、天津（78）、石家庄（2）、秦皇岛（1）、保定（2）、邯郸（4）、张家口（2）、承德（1）、唐山（2）、济南（34）、青岛（19）、烟台（7）、潍坊（1）、泰安（3）、晋城（1）、太原（4）、大同（2）、沈阳（2）、大连（6）、朝阳（2）、盘锦（1）、呼伦贝尔（7）、乌海（1）、呼和浩特（1）、包头（7）
建立碳排放目标责任制，包括温室气体排放清单编制常态化并开展相关评估、自身年度考核工作等	北京（12）、天津（1）、济南（1）

注：表中数字代表政策数量。

资料来源：各地政府官网，作者整理。

研究发现，在政策出台及落实方面，以北京、天津两个直辖市最多，其次为省会城市；京津冀内部城市及山东济南、青岛陆续出台市一级的碳达峰行动方案，能耗“双控”也朝碳排放“双控”进一步转变，加速构建“上下联动”的政策体系；C 型区域中已有 71.43% 的城市发布了灵活自主的“双碳”政策，各类项目试点也在积极展开。但在落实低碳转型的过程中，不论政策数量或是执行力度均与城市经济发展水平呈明显正相关，且差异巨大，北京、天津出台一系列约束性政策、激励性政策，资源调动充分，可以形成阶段性目标的政策“组合拳”。其余城市政策支撑明显不足，比如各省会城市、青岛、大连等都提出数字化赋能新能源汽车产业、发展氢能等政策规划，但多以

鼓励性政策为主,对各行业低碳发展的覆盖度不够、约束性不强;而资源禀赋偏重的城市则基本立足能源结构转型和提质增效出台政策,很少涉足其他方面。

结合政策执行情况和碳排放脱钩、EKC、MK的分析结果,可以把城市综合划分为四种类型(如表8所示),其中已达峰城市占5.71%、达峰潜力型和达峰蓄力型均各占28.57%、达峰压力型占37.14%。达峰压力型又可以区分为两个亚类:一类是由于经济欠发达影响的达峰困难,包括沧州、辽阳、盘锦、泰安、济宁;另一类是由于能源结构偏重造成的达峰困难,包括唐山、太原、大同、晋城、呼伦贝尔、乌海、呼和浩特、包头。

表8 碳达峰城市类型划定

类型	名称	城市	选取标准
I	已达峰 (2020—2021年)	北京、张家口	出现最大值后满5年,Z值为负,在0.01水平下显著;EKC曲线处于单调递减阶段;碳排放增强脱钩;政策丰富且执行力强
II	达峰潜力型 (2021—2025年)	秦皇岛、天津、保定、石家庄、朝阳、邯郸、廊坊、本溪、阜新、青岛	出现最大值后满5年,Z值为负,在0.05及其以下显著;EKC曲线出现完整的倒U型曲线;碳排放增强脱钩;政策较多,执行力较强
III	达峰蓄力型 (2025—2027年)	邢台、承德、衡水、沈阳、济南、烟台、潍坊、大连、抚顺、营口	出现最大值后满5年,Z为负,在0.1水平上显著,或不满5年,但Z由正转负;EKC出现完整的倒U型或部分处于上升期;碳排放增强脱钩或减弱脱钩;政策一般,执行力一般
IV	达峰压力型 (2027—2032年)	沧州、辽阳、盘锦、泰安、济宁 唐山、大同、太原、晋城、呼伦贝尔、乌海、呼和浩特、包头	出现最大值不满5年,不显著;EKC曲线处于上升阶段或出现完整的倒U型曲线;碳排放处于增长连接以下水平;政策一般,执行挑战大;经济欠发达 化石能源结构偏重,其余判定标准与上同。

注:碳达峰年份为低碳情景。

资料来源:作者整理。

城市类型划分之后,根据公式(6)对不同类型城市的碳减排影响因素进行分析,发现能源强度和人均GDP的增加是导致四类城市碳排放增长最关键的因素,除已达峰城市的显著性从1%减少到5%水平,其余城市达到1%的显著性,意味着已达峰城市使用清洁能源的比重有所提高,使得能源强度的提高并不会过快地增加碳排放,同时已出现经济增长、碳排放总量递减的趋势。已达峰城市的人口规模与碳排放总量呈负相关,但不显著,说明以北京为代表的城市在减量发展中,一定程度上控制了碳排放增量,而其余城市依然表现为1%以上的正相关性。产业结构调整对减少碳排放效果不明显,虽然达峰蓄力型和压力型城市出现负相关,但相关性不显著,已达峰城市第三产业占比的弹性系数从0.531减少到0.268,没有出现负相关,达峰潜力型城市则出现正相关趋势,说明优化产业结构对于减少碳排放依然具有巨大的潜力。科学技术的提升可以减少碳排放,这种趋势在已达峰和达峰压力型城市中有所体现但不显著,达峰蓄力型城市则出现相反趋势。模型也验证了经济集聚度对减少碳排放起到了积极作用,除达峰蓄力型城市外,其余城市经济集聚度与碳排放出现负相关,可以预见在经济下行的压力下,走集约高效的经济发展模式可以有效控制碳排放。人均电力消费水平对碳排放的增减未表现出一致性,已达峰城市人均电力消费增加不会增加碳排放,原因是绿电比例使用较大,达峰蓄力型虽然也出现负相关,但其稳定性还需持续跟踪,达峰潜力型和压力型城市呈正相关,与煤电占比较大密切关系(如表9所示)。

表9 不同类型城市二氧化碳排放总量影响因素分析

变量	已达峰 (1) 碳总量	已达峰 (2) 碳总量	达峰潜力型 (3) 碳总量	达峰潜力型 (4) 碳总量	达峰蓄力型 (5) 碳总量	达峰蓄力型 (6) 碳总量	达峰压力型 (7) 碳总量	达峰压力型 (8) 碳总量
lnP	-0.332 (0.407)	-0.255 (0.628)	1.284*** (0.067)	1.313*** (0.072)	1.190*** (0.090)	1.045*** (0.111)	1.078*** (0.040)	1.078*** (0.052)
lnPGDP	1.805*** (0.271)	1.803** (0.341)	1.085*** (0.049)	1.166*** (0.086)	0.926*** (0.034)	0.817*** (0.070)	1.069*** (0.023)	1.074*** (0.043)
lnEI	1.848*** (0.252)	1.834** (0.325)	1.086*** (0.033)	1.086*** (0.037)	1.014*** (0.024)	1.018*** (0.024)	1.036*** (0.013)	1.031*** (0.013)
lnIS	0.531** (0.194)	0.268 (0.482)	0.315*** (0.061)	0.309*** (0.076)	0.0018 (0.030)	-0.002 (0.031)	-0.002 (0.018)	-0.014 (0.020)
lnT	-0.015 (0.038)	-0.017 (0.046)	0.011 (0.015)	0.011 (0.015)	0.014** (0.007)	0.014** (0.007)	-0.007* (0.004)	-0.003 (0.005)
lnES		-0.211 (0.314)		0.012 (0.026)		-0.009* (0.005)		0.008* (0.005)
lnEC		-0.026 (0.051)		-0.072 (0.063)		0.108* (0.064)		-0.030 (0.035)
Constant	7.614** (2.203)	10.160 (4.959)	-2.411*** (0.621)	-2.218*** (0.652)	-0.292 (0.543)	0.073 (0.558)	0.497** (0.229)	0.631*** (0.237)
Observations	22	22	55	55	209	209	99	99
R ²	0.999	0.999	0.988	0.988	0.927	0.929	0.992	0.992
Number of id	2	2	5	5	19	19	9	9

注：括号内数据为 t 值；***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著。

资料来源：作者计算整理。

（四）不同类型城市碳减排路径探讨

各市已经出现不同的达峰时间和峰值水平，大部分在 2030 年前，但个别能源型城市 2035 年前才能达峰，难以与所在省份同步达峰。为保证整个区域在 2030 年前达峰，既要重视城市的共性问题，统筹解决，又要重视地区差异性，合理设定梯次达峰的路径。

1. 城市内部结构调整的共性路径。提高能源强度、优化能源结构和产业结构对减少碳排放至关重要。四种类型城市在该三个层面上表现不一致，已达峰城市已经产生正向减碳效果，其余三类城市正处于瓶颈期，但都具有较强的潜力。能源方面，所有城市应强化能耗“双控”和碳排放“双控”的双轨制，稳步提高非化石能源占比。产业方面，在政策分析部分发现，各市的“十四五”时期产业发展规划具有高度趋同性，更未考虑到区域间的产业布局问题，忽视当地禀赋和重复建设使得资源能源浪费和效率低下的问题依旧存在。未来需要根据城市的比较优势，转移或者承接相应的产业，并对产业进行绿色转型升级。

2. 已达峰城市的创新路径。已达峰城市应继续保持碳排放稳中下降，积极探索碳中和的实现途径，比如北京是国内首个正式宣布碳达峰的城市，但达峰的碳强度仍高于意大利、西班牙、爱尔兰等欧盟国家达峰时的碳强度水平^[24]，且人均 GDP 也远小于美国、日本等发达国家达峰的水平，表现出高位达峰现象。未来北京要强化创新减碳，打造全国甚至世界的碳中和示范。创新主要体现在两个方面。一是科学技术可以直接降低能源强度，间接促进经济要素的重新配置，提升效率，进而减少碳排放。从这个角度看，已达峰城市运用普通节能技术减少碳排放的边际效应已经减少，需要的是关键技术的重大突破以实现碳中和。二是促进新产业、新业态、新模式蓬勃发展，加速提升高精尖产业绿色化发展的能力和规模。

3. 达峰潜力型城市的因势利导路径。这类城市具有一定的经济活力,大多已布局了新一代信息技术、新能源、高端装备制造等产业,下一步要因势利导,可直接引进北京的技术,推动绿色低碳科技在产业中的应用,深化清洁能源替代,发挥“弯道超车”作用,加快达峰速度。同时,这类城市离北京较近,有利于利用地域优势构建低碳产业链,实现减碳、脱碳和绿色低碳发展,做大做强低碳产业圈和绿色经济圈。

4. 达峰蓄力型城市的集约型路径。这类城市存在粗放发展和集约不经济不低碳的特征,需要以“专业化、集约化、现代化”为目标,加快推进行业兼并重组,推动产业集中集约发展,创建产业园区,鼓励符合环境准入标准的企业向园区转移,提高资源转换效率。

5. 达峰压力型城市的追赶型路径。这类城市可以细分为两类:一类是经济底子薄弱、碳强度偏高的城市,急需提振经济同时要尽量跟上全国减排步伐;另一类是能源型城市或重工业城市,发展存在路径依赖,基于战略考虑,需要保持煤炭的托底作用,短期内碳排放仍会增加,可以适当滞后至2030年达峰,但要提升煤炭清洁利用水平,推动煤炭和新能源优化组合,加快周边地区煤炭的“三改”联动。

五、结论与政策启示

环渤海C型区域资源能源丰富、重化工业集中,面临的节能降碳压力巨大,该地区碳达峰目标能否顺利完成决定着全国目标完成的质量。在此背景下,本文从历史达峰和未来达峰的角度,综合判断城市层面的碳达峰轨迹,分析影响因素并对减碳路径进行了探讨,得到以下主要结论与政策启示。

(一) 主要结论

第一,从历史碳达峰进程看,C型区域涉及的7省(市),除北京、天津达到增强脱钩,河北、山东、辽宁、山西大部分城市也进入了减弱脱钩,内蒙古城市处于衰退脱钩,碳排放脱钩出现明显的差异化。京津冀地区减碳成效最好,表现出高经济增长和低碳排放特征,山东表现出高经济增长和中速碳排放特征,山西和内蒙古表现出高经济增长和高碳排放特征,辽宁表现出低经济增长和高碳排放特征。35个城市的碳排放EKC曲线一半以上已经出现倒U型趋势;剔除新型冠状病毒感染疫情等因素干扰,北京、张家口、邯郸、廊坊、本溪、阜新、青岛的碳排放下降趋势显著。

第二,从未来碳达峰趋势看,北京、张家口分别在2020年、2021年达峰,河北、山东的大部分城市可在2025年左右达峰,辽宁大部分城市在2026年左右达峰,内蒙古和山西大部分城市在2030年左右达峰。

第三,综合各地政策执行情况和碳达峰轨迹,可把碳达峰城市分为已达峰、达峰潜力型、达峰蓄力型、达峰压力型四类。已达峰城市为北京和张家口,属于创新型城市和生态资源丰富城市;达峰潜力型城市主要集中于津冀和山东青岛,这些城市有较好的产业和经济基础,从结构上还有较大的减排空间;达峰蓄力型城市大部分在山东和辽宁,经济发展仍伴有粗放式特点,亟须朝低碳集约方式转变;达峰压力型城市主要分布在内蒙古和山西,化石能源结构偏重,需要以能源和产业结构为突破口,加大技术与政策支持。

(二) 政策启示

一方面要把握好稳增长与碳达峰的节奏。我国发展环境面临的复杂性和不确定性上升,经济下行压力将会增大。而C型区域大部分省市的经济活跃度本就弱于南方,加之多地还是能源基地,内外交织的干扰因素会影响碳达峰目标顺利完成。从模型结果看,已达峰城市实现了碳排放减少与经济增长,其余省市实现碳减排与发展经济的矛盾仍然比较突出,特别是对标“十四五”规划GDP年均增长目标,山西、辽宁、内蒙古三省份转型中的“阵痛”将更多,如山西计划年均8%的

增长率,而“十三五”期间年均增长率仅接近6%,以现阶段的发展方式难以高质量完成经济发展和减碳的双向目标。这些地区涉及全国的能源安全稳定,更需要前瞻性、有节奏地规划布局。另外,要在稳住经济大盘基础上,积极挖掘绿色经济的增长动力,达峰蓄力型城市的经济集聚还处于以产能扩张或能耗增加为主的规模效应阶段,推动了碳排放增加,必须以创新为引领,提高全要素生产率,促进经济高质量发展。

另一方面,以区域协同推动碳排放提前达峰。国家鼓励京津冀等区域发挥增长极作用,率先推动经济社会发展全面绿色转型。京津冀碳达峰情况较为乐观,要充分利用协同优势,从协同视角推进达峰进程。一是构建一体化降碳减污体系,优化联合减排措施,实现“削峰降速”。二是充分发挥北京的创新优势,增强带动作用。北京既要依托国际科技创新中心建设契机,加快技术的开发攻关,帮助其他城市提升能源使用效率,又要加快制度创新,解决周边地区技术、政策“凹地”问题,畅通技术溢出通道,强化相关技术在C型区域孵化应用的场景,周边城市也要提高技术应用承接能力,吸引高新技术和低碳企业落户。三是依托省会城市、中心城市带动中小城市低碳转型,C型区域的直辖市、省会城市以及青岛这类地区性中心城市已经完整出现倒U型碳排放,经济活跃度和减碳效果都较好,要建立有效合作机制,通过技术扶持、企业合作、产业链完善等措施,辐射带动周边城市加快减排步伐。

参考文献

- [1] 中共中央宣传部. 习近平新时代中国特色社会主义思想学习纲要(2023年版)[M]. 北京:学习出版社、人民出版社,2023.
- [2] 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[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm,2022-07-23.
- [3] 国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/26/content_5645001.htm,2022-07-23.
- [4] 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(7).
- [5] 尹鹏,李诚固. 环渤海“C型”经济区经济格局的空间演变研究[J]. 地理科学,2015(5).
- [6] Levin, K., D. Rich. *Turning Points: Trends in Countries, Reaching Peak Greenhouse Gas Emissions over Time*[R]. World Resources Institute,2017.
- [7] 工程院报告预测:2027年实现碳达峰,峰值122亿吨[EB/OL]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_17415465,2022-05-10.
- [8] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2060年前碳中和研究报告[M]. 北京:中国电力出版社,2021.
- [9] 夏勇,钟茂初. 经济发展与环境污染脱钩理论及EKC假说的关系——兼论中国地级城市的脱钩划分[J]. 中国人口·资源与环境,2016(10).
- [10] 唐志鹏,于浩杰,陈明星,等. 基于函数极值条件下的中国碳达峰碳中和情景分析[J]. 自然资源学报,2022(5).
- [11] 张诗卉,李明煜,王灿,等. 中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径[J]. 中国人口·资源与环境,2021(9).
- [12] Yuan, J. H., X. Yan, H. Zheng, et al. Peak energy consumption and CO₂ emissions in China[J]. *Energy Policy*,2014,68.
- [13] 史丹,李鹏. “双碳”目标下工业碳排放结构模拟与政策冲击[J]. 改革,2021(12).
- [14] Chattopadhyay, G., P. Chakraborty, S. Chattopadhyay. Mann-Kendall trend analysis of tropospheric ozone and its modeling using ARIMA[J]. *Theoretical and Applied Climatology*,2012(3).
- [15] Lin, B. Q., X. Liu. Dilemma between economic development and energy conservation: Energy rebound effect in China[J]. *Energy*,2012(1).
- [16] 杨莉莎,朱俊鹏,贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战——基于技术进步的视角[J]. 经济研究,

2019(11).

- [17]郭芳,王灿,张诗卉.中国城市碳达峰趋势的聚类分析[J].中国环境管理,2021(1).
- [18]Tapio,P. Towards a theory of decoupling:Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. *Transport Policy*,2005(2).
- [19]Wang,Q.,M. Su. Drivers of decoupling economic growth from carbon emission—An empirical analysis of 192 countries using decoupling model and decomposition method [J]. *Environmental Impact Assessment Review*,2020,81.
- [20]胡剑波,罗志鹏,李峰.“碳达峰”目标下中国碳排放强度预测——基于LSTM和ARIMA-BP模型的分析[J].财经科学,2022(2).
- [21]郝宇,廖华,魏一鸣.中国能源消费和电力消费的环境库兹涅茨曲线:基于面板数据空间计量模型的分析[J].中国软科学,2014(1).
- [22]曹翔,高瑀,刘子琪.农村人口城镇化对居民生活能源消费碳排放的影响分析[J].中国农村经济,2021(10).
- [23]查冬兰,周德群,孙元.为什么能源效率与碳排放同步增长——基于回弹效应的解释[J].系统工程,2013(10).
- [24]邵帅,张可,豆建民.经济集聚的节能减排效应:理论与中国经验[J].管理世界,2019(1).

Study on the Critical Path of Regional Carbon Emission Peak in China — A Case Study of the C-type Region around Bohai Sea

CHEN Nan, ZHUANG Gui-yang

Abstract: With rich resources and energy, the C-type region around the Bohai Sea is a traditional heavy chemical industry base in China. Improving the ability to reach the peak of carbon emissions in advance is the key to carbon emissions reduction in north China. In this paper, Tapio carbon emission decoupling, EKC curve and Mann-Kendall (MK) are used to comprehensively judge the trend of historical carbon peak; scenario analysis is used to predict the track of future carbon peak. The types of cities that reach the peak in echelons are divided according to the implementation of low-carbon policies. The influencing factors are studied and different emission reduction paths are proposed. It is found that the carbon emission decoupling and differentiation of the C-type region is obvious from 2010 to 2020. Beijing, Tianjin and cities of Hebei show high economic growth and low carbon emissions; Cities in Shandong show high economic growth and medium carbon emissions; Cities in Shanxi and Inner Mongolia show high economic growth and high carbon emissions, and cities in Liaoning show low economic growth and high carbon emissions. The EKC curve of carbon emissions in more than half of the cities presents an inverted U shape; 20% of cities have seen a steady decline in carbon emissions. The prediction results show that most cities in Hebei and Shandong will reach the peak in around 2025; most cities in Liaoning will reach in 2026, and cities in Inner Mongolia and Shanxi in 2030. According to the carbon peak trajectory, the cities are classified into four types, namely, cities that have reached the peak, cities with potential to peak, cities with energy storage to peak and cities with peak pressure. Based on the research result, the paper puts forward the common path of urban internal structure adjustment, innovation path, trend guide path, intensive path and catch-up path.

Key words: C-type region; carbon peak trajectory; analysis of influencing factors; path selection

(责任编辑 朱蓓)

— 95 —