

DOI: 10.20103/j.stxb.202403070466

谌莹, 石柳. 中国双碳目标达成的区域差异预测及其影响因素. 生态学报, 2025, 45(10): 4789-4802.

Shen Y, Shi L. Prediction of regional differences in the achievement of China's dual carbon goals and research on its influencing factors. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4789-4802.

中国双碳目标达成的区域差异预测及其影响因素

谌 莹^{1,3}, 石 柳^{2,3,*}

1 湖南工商大学财政金融学院, 长沙 410215

2 中南林业科技大学经济学院, 长沙 410004

3 暨南大学资源环境与可持续发展研究所, 广州 510632

摘要: 为明晰我国区域间双碳目标达成的进度和峰值的差异性特征, 进而展开区域双碳目标压力测试, 选用中国 30 个省域 21 年的数据, 先从省域人均碳排放和人均 RGDP 两个指标维度对各省域的低碳经济发展现状展开聚类分析, 接着利用半参回归方法验证人均碳排放峰值存在性, 并运用 FGLS 实证方法检验基于 EKC 模型、IPAT 模型以及 ImPACT 模型构建的实证模型稳健性, 进而分别对常住人口、RGDP、碳强度和能源结构四个关键影响因素设置高低情景, 运用上述实证模型对全样本、分组样本和省域样本进行峰值预测和比较分析。结果显示: ①各分组样本的半参回归结果接近于“倒 U 型”, 预示了人均碳排放峰值的客观存在性, 为使用实证模型展开峰值分析提供了支持。②各组样本在不同实证模型下计算出来的峰值比较接近, 但单个模型下各组峰值差异明显, 说明不同类型省域出现峰值所对应的人均 RGDP 水平差别较大。③通过比较各组系数和峰值数据可知人口和经济增长对峰值的影响最为关键。④预测结果显示, 30 个省域呈现出两类分化特征, 能源消费结构是导致区域达峰时间和峰值大小产生差异的关键因素。

关键词: 双碳目标; 碳排放峰值; 区域差异; 影响因素

Prediction of regional differences in the achievement of China's dual carbon goals and research on its influencing factors

SHEN Ying^{1,3}, SHI Liu^{2,3,*}

1 School of Finance, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410215, China

2 School of Economics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

3 Institute of Resource, Environment and Sustainable Development Research, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract: To clarify the differences in progress and peak values of China's regional dual carbon targets, and to conduct regional dual carbon target pressure tests, this paper selects data from 30 provinces in China over the past 21 years. First, cluster analysis is conducted on the low-carbon economic development status of each province based on the two indicators of per capita carbon emissions and per capita RGDP. Then, semi parametric regression is used to verify the existence of peak per capita carbon emissions, and FGLS empirical method is used to test the robustness of empirical models based on the EKC model, IPAT model, and ImPACT model. Finally, high and low scenarios are established for the four key influencing factors of permanent population, RGDP, carbon intensity, and energy structure. The above empirical models are used to predict peak values for the entire sample, grouped samples, and provincial samples and to conduct comparative analyses. The results showed that: ① The semi parametric regression results of each group sample were close to an “inverted U-

基金项目: 国家社会科学基金项目 (22CJY044); 湖南省社会科学基金项目 (22YBA164); 湖南省教育厅科学研究重点项目 (22A0466); 湖南省社会科学基金项目 (21YBQ055)

收稿日期: 2024-03-07; **网络出版日期:** 2025-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shiliu71@163.com

#限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

shape”, indicating the objective existence of peak per capita carbon emissions and providing support for peak analysis using empirical models. ② The peak values calculated for each group of samples under different empirical models are relatively close, but there are significant differences in the peak values of each group under a single model, indicating that there are significant differences in the per capita RGDGP levels corresponding to peak values in different types of provinces. By comparing the coefficients and peak data of each group, it can be concluded that population and economic growth have the most critical impact on the peak. The prediction results show that the 30 provinces exhibit two types of differentiation characteristics, and the energy consumption structure is the key factor leading to differences in regional peak times and peak sizes.

Key Words: dual carbon targets; peak carbon emissions; regional differences; influence factor

为了践行中国 2030、2060 年达成双碳目标的承诺,2022 年 1 月,国务院印发了《“十四五”节能减排综合工作方案》,随后各地相继出台了减排阶段性目标和实施细则。由于各地区经济增长速度、能源结构、产业结构、节能减排技术、常住人口等存在较大差异,其碳达峰和碳中和的进度也存在显著差异,不同区域碳达峰后到 2060 年之前实现碳中和目标面临的减排压力各不相同。对此,有必要实行创新性和差异化的减排措施确保双碳目标实现。

国内有关碳达峰问题的研究早期侧重于对某个国家或区域总体的达峰预测^[1-7],稍晚出现了行业碳达峰差异的相关研究^[8-9]。更晚一些才开始少量出现区域碳达峰差异的研究^[10-12]。有学者对中国部分省域或市域开展了层次聚类分析,将研究样本基于经济发展、产业结构、能源消费和排放特征等异质性进行分类,并结合各省的达峰行动进度对各自面临的达峰形势进行了分析,给出了差异化的达峰行动路径^[13-15]。还有部分学者开始关注碳排放公平性的区域差异问题,认为碳排放公平性不仅受本地区因素的影响,还受到相邻地区经济社会因素的影响^[16-17]。有关碳达峰预测的研究中,部分文献没有设置不同情景^[18-20],也有一些研究采用情景模拟法以提高碳排放峰值预测的适用性^[21-22]。以上文献拓展了我们认识碳达峰问题的广度和深度,但仍存在可进一步完善的空间:第一,可以对各省域碳达峰差异作聚类分析以观察各省域低碳发展的长期发展趋势;第二,基于真实 GDP(国民生产总值, Gross Domestic Production)、常住人口、能源结构和减排技术四个指标优化预测情景的设置。

学术界对区域碳排放差异影响因素的研究近年来逐渐深入和细化。早期的研究着重考虑能源结构、能源效率和经济发展等因素对人均碳排放的影响。在主要经济部门中,经济活动对二氧化碳排放变化的积极影响最大,碳强度的影响相对较小,同时降低碳强度也有助于交通部门碳排放的减少^[23-24]。经济增长中产业结构、能源结构、城镇化水平、对外贸易和技术进步与碳排放总量和碳强度高度相关,这表明经济增长方式会影响区域碳排放^[5,25]。人口规模和采暖需求的增长都会显著提高城市的二氧化碳排放,部分城市二氧化碳排放会随着富裕程度的上升呈现先增加后减少的趋势^[26-28]。碳排放目标的实现取决于经济增速与碳排放降速的相对关系,二者的相对脱钩是中国碳排放目标实现的前提^[29-31]。工业生产碳排放是中国生产部门碳排放的最主要来源,许多文献对此进行了测度并分析区域工业部门碳排放的区域差异和影响因素^[32-33]。

基于前述文献的贡献和不足,本文将从以下几个方面进一步研究:①选取省域人均碳排放和人均真实 GDP 两个指标对各省域低碳经济增长模式作图并分区讨论,对比 2000 年和 2020 年的变化;②运用半参回归方法验证人均碳排放峰值存在的可能性,并构建实证模型分析影响区域人均碳排放差异的主要影响因素;③基于上述实证模型,对常住人口、真实 GDP、碳减排技术和碳能源消费占比四个指标设置高低情景,将是否实施地方性碳交易市场政策设置虚拟变量纳入模型,展开省域人均碳排放预测;④基于上述预测结果展开省域双碳目标压力测试,并结合第一小点中的分区讨论结果,进一步探讨区域差异性特征,分析导致区域达峰时间和峰值大小产生差异的关键因素。

1 数据来源和省域低碳经济增长模式分区讨论

1.1 数据来源

本文将基于中国 30 个省域(西藏数据缺失)2000—2020 年的数据展开研究。人口(Population, POP)指标采用《中国统计年鉴》各省域的常住人口数据。真实经济增长(Real GDP, RGDP)指标使用各省域历年名义 GDP 数据以 2000 年为基期运用各省商品零售价格指数做平减处理,得到真实 GDP。碳排放(CO₂ emission, CO₂)数据则基于《中国能源统计年鉴》能源平衡表中各省域主要能源终端消费量和相应的碳排放系数参考《综合能耗计算通则》(GB/T2589—2020)测算而得。本文能源消费类型主要包括各种煤(原煤、其他洗煤、型煤等合并计入,为简化统计,将洗中煤和洗精煤一并计入原煤,使用原煤的碳排放系数来计算)、焦炭、原油(由于统计后期石油制品种类增加,为了保持一致性将原油、石脑油、润滑油、石蜡、溶剂油、石油沥青以及其他石油制品一并归入原油项作简化处理,它们的碳排放系数接近)、汽油、煤油、柴油、燃料油/重油、液化石油气、干气、天然气、煤气(将焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气和其他煤气合并计入)。作为二次能源的电力,只考虑产生碳排放的火力发电部分,可以通过各省域能源平衡表中煤的火力发电投入数据进行统计,以免重复计算^[34]。同理热力也是二次能源,须将能源平衡表中各项能源用于加工转换投入于加热的能耗数据加以统计。

总样本的数据描述性统计情况如表 1 所示。文章后续实证部分用到的第二产业占比 Second Industry, SI)、总能耗(Total Energy, TE)、反映能源消费结构的指标(煤合计+焦炭)在能源消费总量占比(Coal Percent, PCTCOAL)、石油及其相关制品占能源消费总量占比(Petroleum Percent, PCTPET)、非火电占比(Green electronic Percent, PCTELC)的数据主要来自于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》和 ESP 数据库。其中总能耗(TE)指标的计算需要将不同单位的能源类型如天然气、电力(非火电部分)、热力等通过为单位换算,全部统一以万吨标准煤为单位进行汇总。碳强度(Carbon Intensity, CI)、能源强度(Energy Intensity, TERGDP)、人均碳排放(CO₂ per capita, CO₂ POP)、人均真实 GDP(Real GDP per capita, RGDPPOP)等指标则可以基于前面各项数据计算而得。虚拟变量(Dummy)是根据各省域是否开设以及哪一年开始开设碳交易市场来取值,开设的省域年份取值为 1,反之为 0。限于篇幅,后续实证分组的描述性统计表格略。

表 1 全样本主要变量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of the main variables in the entire sample

变量名 Variable name	符号 Symbol	观测值 Observation	均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Min	最大值 Max
人均碳排放 CO ₂ per capita	CO ₂ POP	630	8.7427	6.8343	1.0593	46.4346
人均真实 GDP Real GDP per capita	RGDPPOP	630	2.6982	1.9423	0.2645	11.2876
人均真实 GDP 的平方 The square of per capita real GDP	RGDPPOP ²	630	11.0469	16.8462	0.0700	127.4095
第二产业占比 The share of the secondary industry	SI	630	45.0945	8.3126	15.8000	61.5000
煤炭能源消费占比 Coal's share of energy consumption	PCTCOAL	630	0.5948	0.1734	0.0128	0.9375
石油能源消费占比 Oil's share of energy consumption	PCTPET	630	0.2539	0.1420	0.0178	0.6677
非火力发电占比 The share of non-fossil-fired power generation	PCTELC	630	0.2381	0.2318	0.0000	0.9185
碳强度 Carbon intensity	CI	630	4.1123	3.0071	0.3198	20.9173
能源强度 Energy intensity	TERGDP	630	2.0180	1.4009	0.3408	11.7661
碳市场虚拟变量 Carbon market Dummy variable	Dummy	630	0.0873	0.2825	0	1

数据来源:《中国统计年鉴》(2000—2020)、《中国能源统计年鉴》(2000—2020)、EPS 数据平台

1.2 省域低碳经济增长模式分区讨论

这部分将围绕着省域人均碳排放和人均真实 GDP 这两个指标观察各省域从 2000 年到 2020 年的低碳经济发展情况。下面基于两项指标 2000 年和 2020 年数值分别绘制图 1 和图 2,作十字辅助线将所有坐标点归入四个区域展开聚类分析。图 1 的区域 I 表示“高增长高排放”类型,包括北京、上海和天津。区域 III 代表“低增长高排放”,包括宁夏、山西和辽宁。区域 IV 涵盖了其它所有省域,属于“低增长低排放”类型。区域 II 代表“高增长低排放”发展模式,2000 年我国尚无省域进入。从双碳目标约束来看,最理想的发展模式为右下方的区域 II 模式,区域 I 和 IV 模式各有缺陷,左上方的区域 III 模式最不理想。

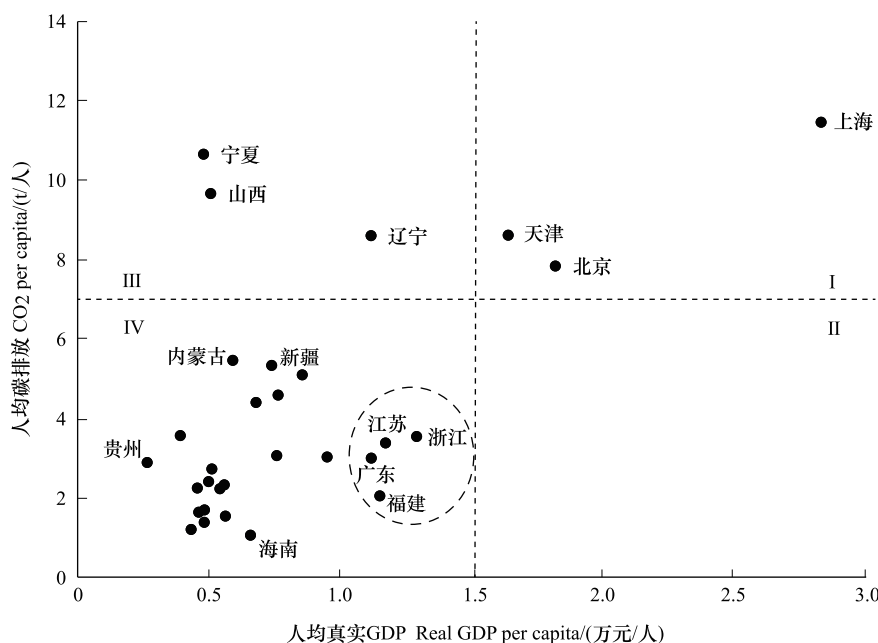


图 1 2000 年中国省域低碳经济增长分区示意图

Fig.1 Schematic diagram of China's provincial low-carbon economic growth zones in 2000

区域 I 表示“高增长高排放”发展模式;区域 II 代表“高增长低排放”发展模式;区域 III 代表“低增长高排放”发展模式;区域 IV 属于“低增长低排放”发展模式

经过二十年发展,各省域经济大幅增长,大多碳排放数值也增长明显。图 2 我们仍观察各省域的相对坐标位置作十字辅助线划分四个区域,表示“高增长高排放”的区域 I 没有样本进入,代表“高增长低排放”的区域 II 包含七省域:遥遥领先的北京和上海,以及天津、江苏、浙江、福建和广东。代表“低增长高排放”的区域 III 有五个省域:内蒙古、宁夏、山西、新疆和辽宁。其余 18 个省域归入代表“低增长低排放”的第 IV 区域。

进一步比较图 1 和图 2,可以观察到 20 年来各省域发展模式的三个主要变化。变化一是原本位于 I 区的北京、上海和天津在保持较快人均经济增长的同时也维持着较低的人均碳排放水平,位置迁移到了图 2 的第 II 区域。值得关注的是,天津的位置后期和北京上海差距拉大,靠近四个海省份,这主要是因为 2019 年全国第四次经济普查修订了各省域 2018 年的 GDP 数据,隶属总部的分支机构 GDP 不再计本地区,大量在天津的央企、国企分支 GDP 被划入北京,导致 2019 年天津的真实人均 GDP 水平锐减。同时期北京的真实人均 GDP 从 2018 年的 9.85 万元跃升至 2019 年的 11.24 万元,且 2020 年(冬奥会前)碳排放总量锐减,从 9750t 降至 7902t,使其坐标位置 2020 年大幅反超上海,迁至区域 II 最右方。

变化二是 2000 年位于第 IV 区域的广东、浙江、江苏和福建四沿海省经过 20 年的发展逐渐和其它同内地省份拉大了距离,2020 年进入图 2 区域 II 的左侧,且这四个省份的历年数据没有明显断层(限于篇幅,历年数据不在文中列出),说明这二十年来它们在低碳增长方面相对领先。变化三是 2000 年位于第 IV 区域的新疆和内蒙古 2020 年落入了区域 III,和宁夏、山西、辽宁并列,这说明它们在这二十年走的“低增长高排放”发展

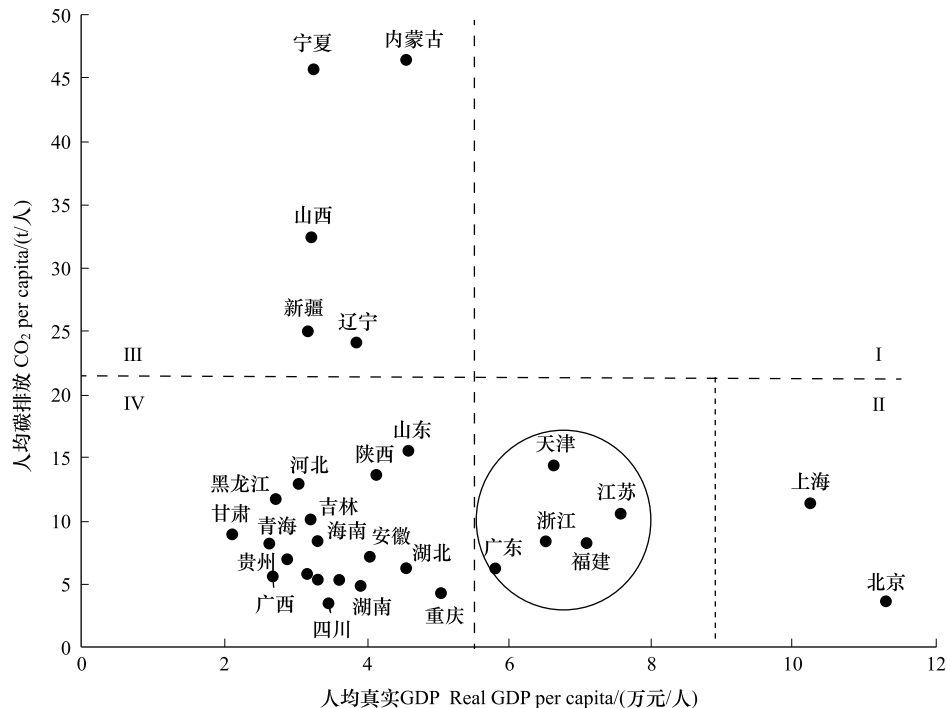


图2 2020年中国省域低碳经济增长分区示意图

Fig.2 Schematic diagram of China's provincial low-carbon economic growth zones in 2020

模式。观察这几个省的碳排放数据,发现它们的煤炭消费量增长较快,尤其是内蒙古人均经济增长缓慢,人均碳排放却反超宁夏达全国第一,可见该省二十年来对煤炭开采拉动经济增长路径依赖非常严重,后续将面临较大的减排压力。

以上分析将各个省域二十年发展模式归类的同时,也将作为后续实证研究样本分组的依据。基于经济增长和碳减排维度将30个省域分为四组,比较契合本文的研究主题。

2 模型构建

Kuznets(1955)^[35]提出的环境库兹涅茨曲线(EKC)模型常被用于预测碳排放峰值。该模型主要考察经济增长和污染物排放之间的关系,认为随着经济的增长,污染物排放会经历一个先上升后下降的过程,呈现出“倒U型”。考虑到两因素之间的关系也存在直线型或者“N”型的可能,本文在应用该模型之前先使用半回归法,尝试将核心解释变量人均真实GDP(RGDPPOP)等变量依次设定为非参数函数,并使用部分线性函数的半参模型进行分组实证分析,观察非参解释变量和被解释变量人均碳排放(CO₂POP)的关联图形态。

比较多种非参设置下的半参模型实证结果图,我们发现只有将RGDPPOP设置为非参时,关联图接近于倒U型曲线(图3)。限于篇幅,其它非参设置下所绘图形不一一展示。图3横坐标刻度值明显小于纵坐标,说明RGDPPOP对CO₂POP的影响力比较大。相较其它非参设置,将RGDPPOP设置为非参,各样本组半参回归图接近于抛物线形态,这预示了峰值出现的可能性,为本文选用对称分布的EKC模型展开研究提供了依据。

在EKC模型的基础上,本文还借鉴了影响力较大的IPAT^[36-37]、STIRPAT^[38]和ImPact模型^[39-41]提及的环境影响因素,包括人口、财富和技术等,构建实证模型如下:

$$\text{CO}_2/\text{POP} = \alpha + \beta_1 (\text{RGDP}/\text{POP})^2 + \beta_2 (\text{RGDP}/\text{POP}) + \varepsilon \quad (1)$$

$$\text{CO}_2/\text{POP} = \alpha + \beta_1 (\text{RGDP}/\text{POP})^2 + \beta_2 (\text{RGDP}/\text{POP}) + \beta_3 \text{SI} +$$

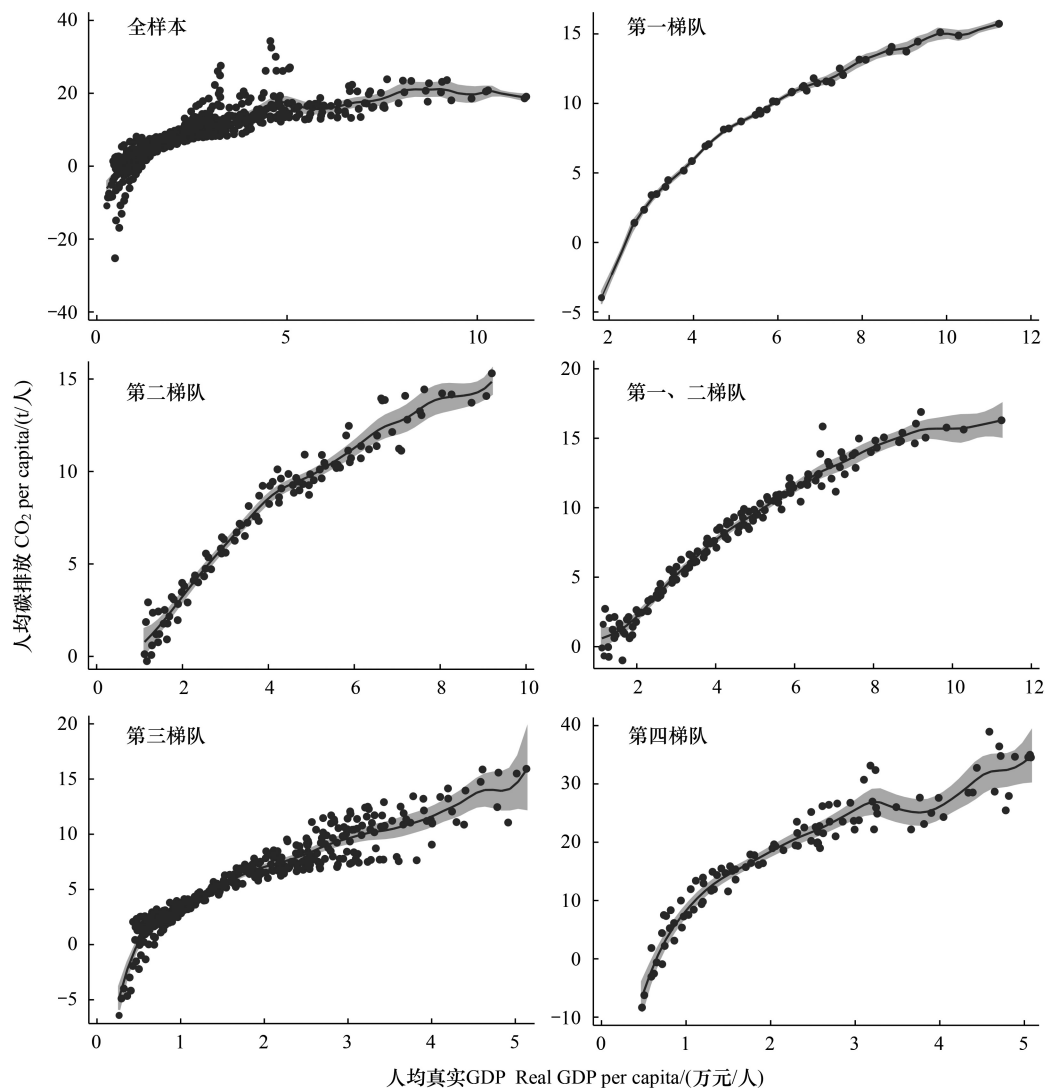


图 3 将 RGDPPPOP 做非参设定的半参模型分组回归结果示意图

Fig.3 Schematic diagram of grouped regression results of a semi parametric model with RGDPPPOP as a nonparametric setting

CO₂POP 表示人均碳排放, RGDPPPOP 表示人均真实 GDP; 图中的阴影部分表示 95% 置信区间

$$\beta_4 \text{PCTCOAL} + \beta_5 \text{PCTPET} + \beta_6 \text{PCTELC} + \varepsilon \quad (2)$$

$$\text{CO}_2/\text{POP} = \alpha + \beta_1 (\text{RGDP}/\text{POP})^2 + \beta_2 (\text{RGDP}/\text{POP}) + \beta_3 \text{SI} + \beta_4 \text{PCTCOAL} + \beta_5 \text{PCTPET} + \beta_6 \text{PCTELC} + \beta_7 \text{CI} + \varepsilon \quad (3)$$

$$\text{CO}_2/\text{POP} = \alpha + \beta_1 (\text{RGDP}/\text{POP})^2 + \beta_2 (\text{RGDP}/\text{POP}) + \beta_3 \text{SI} + \beta_4 \text{PCTCOAL} + \beta_5 \text{PCTPET} + \beta_6 \text{PCTELC} + \beta_7 \text{CI} + \beta_8 \text{Dummy} + \varepsilon \quad (4)$$

其中碳强度(CI)是碳排放总量与真实 GDP 之比。CO₂/POP 的单位是吨二氧化碳当量/人, RGDP/POP 的单位是万元/人, SI、PCTCOAL、PCTPET、PCTELC 都是百分比。CI 的单位是吨二氧化碳当量/万元。Dummy 为虚拟变量, 当某个省域从某一年开始运行碳排放交易市场, 取值为 1, 暂未开展地方性碳交易的省域取值为 0。我国先后成立了北京(2013)、天津(2013)、上海(2013)、湖北(2014)、广东(2014)、重庆(2014)、四川(2016)、福建(2016)八个地方性碳交易市场, 后续可以观察虚拟变量的系数符号会否显著为负, 即地方碳交易能降低人均碳排放。表 2 是实证模型一览表, 对应上述四个数学表达式。

表 2 回归模型一览表

Table 2 Overview of Regression Models

变量 Variable	模型包含的变量 Variables included in the model			
	Model1	Model2	Model3	Model4
被解释变量 Dependent variable	CO ₂ POP	CO ₂ POP	CO ₂ POP	CO ₂ POP
解释变量	GDPPOP	GDPPOP	GDPPOP	GDPPOP
Explanatory variable	(GDPPOP)2	(GDPPOP)2	(GDPPOP)2	(GDPPOP)2
		SI	SI	SI
		PCTCOAL	PCTCOAL	PCTCOAL
		PCTPET	PCTPET	PCTPET
		PCTELC	PCTELC	PCTELC
			CI	CI
				Dummy

表格中的变量含义已在表 1 中详细说明

本面板数据包括 30 个省域,21 年,共 630 个观测值。先对面板数据进行协整检验。相较于 HT 检验、LLC 检验、Breitung 检验而言,IPS 检验允许每个样本具有不同自回归系数,这更贴近现实,且它既适用于本研究这种短面板且时期/截面数量固定的数据面板。依次对这四组面板数据做 IPS 单位根检验(表 3),结果显示大多数变量是平稳的。

表 3 各组变量的 IPS 单位根检验结果

Table 3 IPS unit root test results for each group of variables

变量 Variable	分组 Group				
	全样本 Total sample	第一梯队 First group	第二梯队 Second group	第三梯队 Third group	第四梯队 Fourth group
CO ₂ /POP	-2.48	-3.53	0.40	-1.63	-1.65
RGDP/POP	5.04	-2.83	-2.63	-2.68	-3.27
PCTCOAL	-3.79	-0.81	-1.93	-3.89	-1.79
PCTPET	-3.33	-1.08	-1.78	-4.01	-1.73
PCTELC	-7.06	-2.75	-2.51	-5.22	-1.95
TE/GDP	-2.68	-3.38	-2.20	-2.87	-2.18
CI	-0.03	-3.72	-1.65	-2.77	-2.47
SI	-1.41	-0.50	-1.45	-1.38	-1.39

IPS 单位根检验的原假设是全部面板包含单位根。检验结果显示各组变量的 IPS 统计量大多取值都超过了 $P < 5\%$ 的阈值,表示拒绝原假设,至少部分面板协整;变量含义已在表 1 中详细说明

此外,即便是变量数据非协整,只要整体面板数据样本量不算太小,回归结果也可能可信。再者,当一些宏观数据出现过某些特殊断层或拐点时也会导致单位根。本研究数据中部分省域的人口、GDP、产业结构、碳排放等数据指标出现过断层现象,如果就此认定数据非协整,可能犯实证分析的第一类错误。

3 实证结果分析

结合本研究的数据特点和研究目标,我们需要对各种实证方法进行比较。就常用的多元混合回归、固定效应和随机效应回归三种方法而言,后两种的回归结果优于第一种,固定效应回归中时间固定效应不太显著,地点固定效应比较明显。此外,考虑到样本做了分组,为排除各样本组之间组间异方差、组间同期相关以及组内自相关问题,笔者先后做了针对组间异方差的 Wald 检验、组间同期相关的 BP-LM 检验^[42]以及组内自相关的 Wald 检验^[43]。结果发现不存在一阶组内自相关,但组间存在异方差且无法排除组间同期相关。于是,实证拟选用全面可行广义最小二乘法(FGLS),此法能有效解决以上问题,大幅提升估计结果的可信度。下面基于四个模型依次展开分组回归,结果见表 4。

表 4 碳排放峰值模型回归结果
Table 4 Regression Results of Carbon Emission Peak Model

模型分组 Groups of models		变量 Variable							碳排放拐点 Turn point	
		GDPPPOP	(GDPPPOP) ²	SI	PCTCOAL	PCTPET	PCTELC	CI	Dummy	(yuan per capita)
模型 1	总样本	1.6400 ***	-0.1218 ***							67324
Model1	第一梯队	1.2722 ***	-0.0376 *							169204
	第二梯队	2.9650 ***	-0.1809 ***							81940
	第三梯队	4.0629 ***	-0.5309 ***							38265
	第四梯队	4.8594 ***	-0.5631 ***							43149
模型 2	总样本	1.1531 ***	-0.0816 ***	0.0416 ***	14.6961 ***	10.7851 ***	-0.9213 ***			70627
Model2	第一梯队	1.1064 ***	-0.0226	0.1533 ***	22.9464 ***	27.9009 ***	-8.1082			无峰值
	第二梯队	3.1504 ***	-0.1782 ***	0.0019	27.1240 ***	27.6579 ***	-3.1083 ***			88383
	第三梯队	3.1416 ***	-0.4102 ***	0.0198 ***	8.3789 ***	7.4933 ***	-0.9797 ***			38291
	第四梯队	11.1034 ***	-1.2100 ***	-0.0795	30.1945 ***	5.8513	6.4900			45883
模型 3	总样本	2.5938 ***	-0.1670 ***	0.0500 ***	7.1225 ***	4.4654 ***	0.0536	0.9596 ***		77675
Model3	第一梯队	2.5947 ***	-0.10579 ***	0.1013 ***	20.9718 ***	20.6365 ***	-7.8144 *	1.4349 ***		122632
	第二梯队	3.4443 ***	-0.1860 ***	0.0101	11.9974 ***	11.3480 ***	-0.0413	2.1342 ***		92610
	第三梯队	4.2937 ***	-0.4987 ***	0.0100 ***	3.8427 ***	2.5487 ***	-0.1310 **	0.8734 ***		43045
	第四梯队	14.2755 ***	-1.4825 ***	-0.0532	2.0495	-6.4387	3.3280	1.3708 ***		48146
模型 4	总样本	4.4985 ***	-0.2752 ***	0.0136 ***	5.9943 ***	2.3189 ***	-0.4292 ***	1.1591 ***	-0.4280 ***	81731
Model4	第一梯队	2.5879 ***	-0.1055 ***	0.1018 ***	20.9923 ***	20.6159 ***	-7.8086	1.4265	0.0180	122649
	第二梯队	3.5421 ***	-0.1941 ***	-0.0078	11.8861 ***	12.3391 ***	-0.1786	2.2428 ***	0.0605	91244
	第三梯队	5.1272 ***	-0.5868 ***	0.0048 ***	3.3958 ***	2.5264 ***	-0.3658 ***	0.9216 ***	-0.2118 ***	43688
	第四梯队	14.2755 ***	-1.4825 ***	-0.0533	2.0495	-6.4387	3.3280	1.3708 ***	0	48147

限于篇幅, R²、常数项系数和系数标准误没有列出。每个数值后的 * 表示该估计量的显著程度, ***、** 和 * 分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平

表中的模型 1 是基础库兹涅茨曲线模型,只包含人均 RGDP 及其平方项两个解释变量。观察回归系数符号,二次项为负,说明曲线开口朝下存在峰值,根据峰值横坐标的计算公式 $-\beta_2/2\beta_1$,可以算出各样本组的峰值对应的人均 RGDP。其中,第一梯队的二次项系数显著度只有一颗星,其它几组都很显著,各组峰值对应的人均 RGDP 差异较大。模型 2 加入了代表产业结构变量 SI 和能源消费结构变量 PCTCOAL、PCTPET、PCTELC,结果表明除第一梯队的二次项不显著以外,总样本和其它三组样本的二次项系数都很显著,能够算出峰值对应的人均 RGDP。SI 系数较小且显著为正,说明第二产业占比提升会提高人均碳排放水平,但提升幅度不大。PCTCOAL 和 PCTPET 的系数较大且显著为正,说明化石能源消费会显著推高人均碳排放水平。PCTELC 的系数多显著为负,数值较小,说明非化石能源的比重越高有助于降低人均碳排放,但影响力很有限。模型 3 进一步将反映碳减排技术的指标 CI 纳入模型。结果显示,各样本组的二次项显著为负,存在峰值,其余变量的系数大多较为显著,符号基本符合预期,产业结构系数和能耗占比系数都与模型 2 较为接近,实证模型比较稳健。CI 系数显著为正,说明碳减排技术越高(CI 越低)则人均碳排放水平越低,符合预期。模型 4 继续加入代表地方性碳交易政策的虚拟变量 Dummy。结果显示,各样本组二次项系数都显著为负,除了部分组别的 PCTELC 的系数不太显著,其余解释变量都比较显著且符号符合预期。观察五组样本虚拟变量系数,发现该变量在总样本和第三梯队样本显著为负,可理解为实施碳交易政策的地区人均碳排放较低。第一和第二梯队的虚拟变量系数虽然不显著,可能和两个样本组的样本量太小(分别只有两个和五个省域)有关。第四梯队省域因为没有设立碳交易市场,虚拟变量取值全部为零,回归结果系数也就为零。

比较各模型回归结果,单个样本组在不同模型下计算的峰值比较接近,但单个模型下不同样本组之间的峰值差异明显。这说明不同样本组省域出现人均碳排放峰值所对应的人均 RGDP 水平排序是比较稳健的。由北京和上海组成的第一梯队峰值对应的人均 RGDP 高于其余三组,远超第三和第四梯队,这和各样本组之

间经济增长水平差异较大有关。由沿海五省组成的第二梯队 in 人均 RGDP 达到 91244 元时达峰,该数值也显著高于第三和第四梯队,与这五省经济增长水平领先关系较大。

4 对各省域人均碳排放峰值和碳中和压力的预测

接着,对各省域历史数据做技术推演得到预测数据,并应用实证模型 4,对各省域峰值对应的人均 RGDP 进行情景预测,探讨各省域是否能按时达成双碳目标。

预测将使用的各项历史统计数据(2000 年至 2020 年)来源于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、ESP 数据库以及各省域统计年鉴。2021 年至 2040 年的预测主要是对省域常住人口、真实 GDP、碳能源消费占比以及碳排放强度四个变量分别设置高低两种情景进行预测。其中,考虑到各省域常住人口趋势近几年受老龄化和出生率下降、地方政策性因素、经济增速以及就业机会的影响比较明显^[44-45],历史数据更新到了 2022 年,并基于前三年或者前五年的移动平均数据进行推演,设置高低情景;真实 GDP 的预测数据也做了类似处理,历史数据扩展至 2022 年,使用五年移动平均法进行推演,设置高低情景;煤炭能源消费占比使用 2016 至 2020 年五年的平均数值变动量作为后二十年预测基准,设置高低情景;碳排放强度同上;各省域第二产业占比、非火力发电消费占比的预测值同样是基于 2016 至 2020 年的五年平均变动数据,由于从上一部分实证模型的结果来看,二者对被解释变量的影响很小,不设置高低情景。下文使用大写字母 H 表示较高取值指标情景,用 L 代表较低取值指标情景,将常住人口、真实 GDP、煤炭能源消费占比以及碳排放强度四个变量的高低情景排列组合即得到 16 种模拟预测情景(以下代表情景的四个字母依次对应四个变量)。

表 5 是基于实证模型 4 对全样本省域进行预测得到的结果。16 种情境下的各项解释变量系数都很显著,且符号都符合预期,二次项的符号都显著为负,说明存在峰值。观察各情景下峰值对应的人均 RGDP 计算结果,前四种情景(HHHH、HHHL、HHLH、HHLL)的峰值对应的人均 RGDP 相对较高,后四种情景(LLHH、

表 5 全样本 16 种情境下的人均碳排放拐点预测

Table 5 Prediction of inflection points of per capita carbon emissions in 16 scenarios across the entire sample

情景 Scenario	变量 Variable								峰值 Peak value/ (元 人 ⁻¹ a ⁻¹)
	GDP/POP	(GDPPPOP) ²	SI	PCTCOAL	PCTPET	PCTELC	CI	Dummy	
HHHH ***	2.1595	-0.0205	0.0122	16.3956	6.2392	-1.0474	1.7103	-1.8025	526707
HHHL ***	2.1606	-0.0205	0.0057	17.9848	9.8218	-0.9239	0.6190	-0.3824	526976
HHLH ***	2.2122	-0.0213	0.0146	13.4671	6.5316	-1.0195	0.8581	-0.4160	519296
HHLL ***	2.2213	-0.0214	0.0075	14.9674	7.6555	-0.8577	0.6580	-0.4436	518995
HLHH ***	4.6340	-0.1081	0.0288	21.1701	9.2186	-1.6107	1.2267	-0.9993	214340
HLHL ***	4.1517	-0.0826	0.0306	21.0473	10.4170	-1.0289	0.8069	-0.8720	251314
HLLH ***	4.6176	-0.1092	0.0190	12.4028	2.9303	-1.4115	1.3435	-1.0978	211429
HLLL ***	4.0811	-0.0804	0.0207	12.1403	4.2673	-0.7953	0.8894	-0.9462	253800
LHHH ***	0.6790	-0.0113	0.0460	5.5093	2.3742	-0.2708	0.7833	-0.0099	300442
LHHL ***	0.7422	-0.0124	0.04428	6.0349	2.6157	-0.3580	0.8380	-0.0311	299274
LHLH ***	0.7259	-0.0120	0.0435	7.0565	3.4927	-0.3280	0.7664	-0.0083	302458
LHLL ***	0.7741	-0.0127	0.0434	6.8632	3.2640	-0.4325	0.8271	-0.0229	304764
LLHH ***	2.9550	-0.1224	0.0336	7.2841	3.3321	-0.4336	1.0862	-0.2860	120711
LLHL ***	3.0770	-0.1267	0.0293	8.5160	3.9979	-0.5287	1.1331	-0.3307	121429
LLLH ***	3.0684	-0.1260	0.0282	9.7318	4.9948	-0.4690	1.0795	-0.3232	121762
LLLL ***	3.1880	-0.1306	0.0241	10.2036	5.1345	-0.5612	1.1208	-0.3760	122052

表示情景的四个字母分别对应的是人口、RGDP、能源消费占比、碳强度四个变量的高低取值。例如:LLHL 代表低人口、低 RGDP、高石化能源消费占比、低碳强度的情景;*** 表示 1%显著性水平

LLHL、LLLH、LLLL)最低,是因为前四种情景设定了高人口增长和高经济增长,后四种情景设定的低人口增长和低经济增长,二者对峰值影响最为关键。若将中间的八种情景分成两组对比其峰值结果,发现其中前四种(HLHH、HLHL、HLLH、HLLL)峰值对应的人均RGDP数值全部低于后四种(LHHH、LHHL、LHLH、LHLL),由于四个字母的第一个字母表示人口,第二个字母为真实经济增长水平,可以理解为人口因素对峰值的影响略小于经济增长因素。

下面将该情景设置的思路应用于对单个省域峰值的预测。先采用ADF检验^[46]和DF-GLS检验对单个省域的时间序列数据的进行平稳性检验,各组数据均未能通过5%显著性水平下的检验,不能拒绝存在单位根的原假设,可判断为非平稳序列。取一阶差分后再做ADF检验,结果依然通不过。然而,单个序列非平稳并不能排除模型各变量时间序列之间协整的可能^[47],接着再做各变量时间序列的协整检验,发现存在协整关系。

接着应用模型4对各省域设置模拟情景进行预测的结果,为了简化表达参考表5的分析结论,我们仅展示HHHH情景和LLLL情景下峰值对应的人均RGDP水平(表6),并回到各省域的数据表中去对比该人均RGDP对应的年份,即可找到当年的人均碳排放数值。分析表6各省域的达峰时间和峰值高低特征,我们可将所有省域分为两类展开讨论。

表6 双重情景下省域碳达峰预测结果

Table 6 Prediction results of provincial carbon peak under dual scenarios

梯队 Group	省份 Province	RGDP /POP	(RGDPPPOP) ²	RGDP/POP 峰值/元 Peak value of real GDP per capita	达峰年份 Peak value year	CO ₂ /POP 峰值 Peak value of CO ₂ /POP/ (t/人)
I	北京 HHHH	0.4900	-0.0057	430835	2051	10.26
	北京 LLLL	0.9639	-0.0309	156048	2031	3.6
	上海 HHHH	不显著	不显著	—	—	—
	上海 LLLL	2.7521	-0.0982	140179	2031	11.01
II	天津 HHHH	3.3950	-0.2637	64371	—	—
	天津 LLLL	5.2756	-0.2731	96579	2033	14.27
	江苏 HHHH	2.1463	-0.0267	401643	2052	36.58
	江苏 LLLL	2.5398	-0.0790	160823	2047	9.6
	浙江 HHHH	2.6554	-0.0677	196235	2043	20.54
	浙江 LLLL	3.7755	-0.2363	79885	2027	8.34
	福建 HHHH	1.2916	-0.0114	564485	>2060	—
	福建 LLLL	2.4919	-0.1206	103286	2031	8.66
	广东 HHHH	2.0514	-0.0590	173828	2053	13.95
	广东 LLLL	3.1044	-0.2209	70276	2028	5.93
III	河北 HHHH	6.6165	-0.2232	148221	>2060	—
	河北 LLLL	8.0579	-0.7034	57282	2042	12.85
	吉林 HHHH	3.5153	不显著	—	—	—
	吉林 LLLL	7.9036	-0.9777	40417	2031	9.17
	黑龙江 HHHH	3.0443	不显著	—	—	—
	黑龙江 LLLL	7.8231	-0.8289	47192	2033	13.7
	青海 HHHH	3.8698	-0.0791	244598	2044	58.73
	青海 LLLL	5.6097	-0.4486	62528	2041	10.45
	广西 HHHH	2.6095	-0.0970	134546	2043	21.48
	广西 LLLL	3.8559	-0.4999	38564	2031	5.71
	海南 HHHH	2.5610	-0.0347	368712	>2060	—
	海南 LLLL	3.7465	-0.3486	53729	2035	8.57

续表

梯队 Group	省份 Province	RGDP /POP	(RGDPPPOP) ²	RGDP/POP 峰值/元 Peak value of real GDP per capita	达峰年份 Peak value year	CO ₂ /POP 峰值 Peak value of CO ₂ /POP/ (t/人)
IV	甘肃 HHHH	3.3679	不显著	2056993	—	—
	甘肃 LLLL	6.0596	-0.4998	60626	2039	14.33
	山东 HHHH	3.3321	-0.0336	495255	>2060	—
	山东 LLLL	4.8430	-0.3045	79527	2039	15.24
	云南 HHHH	3.7490	-0.1320	142048	2046	43.73
	云南 LLLL	4.4398	-0.3726	59574	2038	6.28
	河南 HHHH	3.3614	-0.1491	112690	2056	13.41
	河南 LLLL	4.1511	-0.4130	50250	2039	4.54
	湖南 HHHH	1.8152	-0.0433	209510	2055	19.24
	湖南 LLLL	2.3101	-0.1572	73485	2041	4.82
	四川 HHHH	1.6705	-0.0453	184219	2051	13.63
	四川 LLLL	1.9694	-0.1340	73479	2043	3.62
	江西 HHHH	1.4106	-0.0117	604582	>2060	—
	江西 LLLL	2.7281	-0.1388	98265	2044	7.00
	安徽 HHHH	不显著	不显著	—	—	—
	安徽 LLLL	3.5907	-0.3679	48795	2026	7.27
	湖北 HHHH	2.4518	-0.0471	260398	2051	26.69
	湖北 LLLL	2.6191	-0.1412	92765	2041	6.79
	贵州 HHHH	不显著	不显著	—	—	—
	贵州 LLLL	1.7794	不显著	—	—	—
	陕西 HHHH	2.8631	-0.1163	123128	2035	35.94
	陕西 LLLL	6.7250	-0.4301	78176	2035	16.62
	重庆 HHHH	1.3213	-0.0206	320984	2058	20.17
	重庆 LLLL	1.2355	-0.0466	132668	2055	4.24
	宁夏 HHHH	10.5489	不显著	—	—	—
	宁夏 LLLL	13.9169	-0.5473	127146	2060	61.49
	新疆 HHHH	6.7497	-0.0166	2031256	>2060	—
	新疆 LLLL	7.7625	-0.2239	173364	2055	55.18
	山西 HHHH	10.1510	不显著	—	—	—
	山西 LLLL	19.5203	-1.5138	64475	2034	43.38
	内蒙古 HHHH	8.5776	-0.0105	4095522	>2060	—
	内蒙古 LLLL	11.7068	-0.3113	188011	2043	97.37
	辽宁 HHHH	6.0669	-0.2066	146833	2050	72.37
	辽宁 LLLL	12.5773	-1.1233	55983	2033	23.74

表中解释变量系数未标“不显著”的都是三颗星显著水平。天津因 2019 年数据统计口径有较大调整,不便计算峰值

第一类包括隶属于第一梯队的上海,第二梯队的福建,第三梯队的河北、吉林、黑龙江、海南、甘肃、山东、江西、安徽以及第四梯队的宁夏、新疆、山西和内蒙古。这些省域的共同特征是在 HHHH 情景下二次项系数不显著(无峰值)或虽显著却无法在 2060 年(不含)之前达峰,而在 LLLL 情境下二次项系数显著(有峰值)且可以在 2060 年之前达峰。值得注意的是,其中个别省域在 LLLL 情景下虽能达峰但时间太晚,如宁夏和新疆将分别于 2060 和 2055 年才达到峰值;有的省域峰值相对过高,如内蒙古的峰值高达 97.37tCO₂e/人,比照 2060 年实现碳中和的目标,短时间内将过高的峰值降为零难度很大,故以上两种情况都非常不利于各省域双碳目标的实现。究其原因,宁夏、新疆、山西和内蒙古这四个省份化石能源消费占比基数较大,且近年来能源结构的转型力度相对其它省份不足。

第二类则包括第一梯队的北京,第二梯队的江苏、浙江、广东,第三梯队的青海、广西、云南、湖南、河南、四川、湖北、陕西和重庆以及第四梯队的辽宁。这些省域在 HHHH 和 LLLL 情境下二次项系数都显著为负且峰值都能在 2060 年之前实现。各省域 HHHH 情景峰值对应的人均 RGDP 明显高于 LLLL 情景,且 HHHH 情境对应峰值也明显高于 LLLL 情景,HHHH 情境下达峰的时间明显晚于 LLLL 情景,这些特征都与表 5 一致。双碳目标约束下,相较于第一类省域,第二类省域的减排压力总体较小。值得注意的是,重庆和青海虽然能于 2060 年之前碳达峰,但达峰时间相对较晚,且峰值较高,2060 年实现碳中和难度较大。

此外,贵州两种情景下二次项系数都不显著,无法预测其达峰时间和峰值大小。天津的 RGDP 数据在 2019 年经历了重大调整,其峰值预测结果可信度较低,故不讨论。

下面将表 6 联系图 1 和图 2 分析。表 6 中第四梯队五省域离双碳目标差距大,压力较大。宁夏、内蒙古、山西和新疆只在 LLLL 情境下才有峰值或能于 2060 年之前达峰,但即便达峰又面临着达峰时间太晚亦或是峰值过高的窘境,实现碳中和难度大。辽宁虽然在两种情境下都能于 2060 年前达峰,但同样面临着达峰较晚且峰值较大的问题。通过数据观察和分析,笔者认为其关键原因是这几个省份的能源结构过于依赖煤炭,且在其它省域积极推能源结构转型时这五省的转型力度和成效是很不够的。图 2 同属 II 区的七省域中北京、广东和浙江相对于其他省域达峰时间较早或峰值较低。究其原因,可将相邻的浙江和江苏、广东和福建的经济增速和能源结构转型数据进行结对比较,会发现浙江和广东分别优于江苏和福建。相对于北京而言,同为第一梯队的上海在 HHHH 情境下达峰时间将晚于 2060 年,LLLL 情境下将于 2031 年达峰,该时间和 LLLL 情境下北京的达峰时间相同,但峰值为 $11.01\text{tCO}_2\text{e}/\text{人}$,显著高于北京同期的 $3.6\text{tCO}_2\text{e}/\text{人}$ 。通过对比北京和上海两地能源消费结构的变化趋势可发现北京 2013 年以来能源消费结构转型非常剧烈,煤炭销量占比从 2013 年的 22.58% 陡降至 2020 年的 1.28%,同期上海仅从 31.54% 降至 25.20%,因此同在经济增速较快的背景下,北京的减排速度明显高于上海,这是图 1 和图 2 中两地相对位置变化——北京逆袭上海的关键原因。河北省比邻省河南煤炭能源占比的基数较大,且减速相对比较落后,于是河南省无论是达峰时间还是峰值大小的预测结果明显优于河北省。东三省的预测结果总体不佳,辽宁虽然能达峰,但峰值较高,吉林和黑龙江则不能在 HHHH 情境下早于 2060 年达峰。

5 结论及政策建议

(1) 当把 RGDPPOP 设置为非参,各样本的半参回归结果都比较接近于抛物线的形态,这预示了人均碳排放峰值的客观存在性,为本文选取的实证模型提供了支持。

(2) 四个实证模型在经典 EKC 模型的基础上依次加入了产业结构指标、能源消费结构指标、碳减排技术以及代表地方碳交易政策的虚拟变量,通过比较各模型的分组回归结果可知,同一样本在不同的实证模型下峰值比较接近,但单个模型下各组之间的峰值差异明显。这意味着样本组的省域峰值所对应的人均 RGDP 水平差别很大。总体而言,实证模型结果比较符合预期且稳健。

(3) 基于模型 4 对全样本在十六种模拟情境下的预测结果显示,各解释变量系数都很显著,且符号与预期一致,尤其是二次项的符号都显著为负,证实了峰值的存在,且通过比较各样本组系数和峰值可知人口和经济增长对峰值的影响最为关键。

(4) 基于模型 4 对各省域 HHHH 和 LLLL 两种情景进行峰值预测的结果显示,30 个省域呈现出两类分化特征,第一类 14 省域在 HHHH 情景下没有峰值或是峰值晚于 2060 年出现,在 LLLL 情景下则能于 2060 年前达峰;第二类 14 省域在两种情景下都能在 2060 年之前达峰。将这两类特征和图 2 中结合起来分析,发现能源消费结构是导致区域间达峰时间和峰值大小差异的关键因素。

基于上述结论,我们基本明晰了各省域距双碳目标达成的地区差异情况,双碳目标约束下第四梯队(宁夏、新疆、山西、内蒙古和辽宁)压力最大,这几省能源消费结构基数高度依赖化石能源,且近年来低碳转型相对其它省域步伐太小,后续须采取更强的措施优化能源消费结构,提升碳减排技术。其中特别要注意山西、内

蒙古两省作为北线火力发电主要输出地、华北地区重要的西电东输腹地,其能源消费结构的低碳转型需要电力输送上下游地区的共同努力,或须建立碳补偿机制。第二梯队的浙江、广东以及第三梯队的广西、云南、河南、湖南、四川这七省域横跨中国东部沿海发达区域、中部六省以及西部地区,虽自然禀赋和经济基础差异较大,但它们在本文设置的 HHHH 和 LLLL 两种情景下都能较早达峰且峰值相对较小,面临的双碳目标压力相对较小,这主要得益于它们的能源消费结构基础较好(如湖南、四川)或是近年来能源结构转型力度较大(如广东、浙江),广西和云南拥有丰富的水利和光伏资源,虽然期初(2000 年)煤炭消费占比高达近 80%,但经过近年来发电方式的持续转型,煤炭消费占比明显下降,非火力发电占比逐年大幅提升,这应该是两省达峰预测结果相对较好的主要原因。这些省份的减排举措非常值得参考和仿效。第一梯队的北京和上海是中国经济最为发达的地区,从表 6 来看,北京在 HHHH 情景下的达峰时间较晚;在 LLLL 情景下,受政策因素影响数据统计口径发生突变,上海峰值出现的时间迟于北京(HHHH 情景)且峰值数值显著偏高(LLLL 情景),累及天津因数据断层不便测算峰值,这提醒我们在制定碳减排政策时需要更好的兼顾公平和效率原则。

在本研究基础上后续还可以从三个方面继续深入研究:一是 2021 年成立的全国碳交易市场对各省域碳减排的影响将随着时间的推移逐步体现出来,可以将该影响因素设置虚拟变量纳入实证模型,提升模型精度;二是各省份出生率、老龄化和人口流动的变化差异以及疫情后经济增长的差距可能会给区域双碳进程带来深远的影响,后续研究将持续关注这些因素。三是研究省域之间的碳转移问题,进而探索区域间碳补偿机制。

参考文献(References):

- [1] Guan D B, Hubacek K, Weber C L, Peters G P, Reiner D M. The drivers of Chinese CO₂ emissions from 1980 to 2030. *Global Environmental Change*, 2008, 18(4): 626-634.
- [2] 渠慎宁,郭朝先. 基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰值预测研究. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(12): 10-15.
- [3] 湛莹,张捷. 碳排放峰值与能耗峰值及其影响因素——跨国及中国的实证研究. *国际贸易问题*, 2015(6): 92-100.
- [4] 林伯强,李江龙. 环境治理约束下的中国能源结构转变——基于煤炭和二氧化碳峰值的分析. *中国社会科学*, 2015(9): 84-107, 205.
- [5] 齐绍洲,林岫,王班班. 中部六省经济增长方式对区域碳排放的影响——基于 Tapio 脱钩模型、面板数据的滞后期工具变量法的研究. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(5): 59-66.
- [6] Mi Z F, Wei Y M, Wang B, Meng J, Liu Z, Shan Y L, Liu J R, Guan D B. Socioeconomic impact assessment of China's CO₂ emissions peak prior to 2030. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2227-2236.
- [7] 王勇,王恩东,毕莹. 不同情景下碳排放达峰对中国经济的影响——基于 CGE 模型的分析. *资源科学*, 2017, 39(10): 1896-1908.
- [8] 柴麒麟,傅莎,郑晓奇,赵旭晨,徐华清. 中国重点部门和行业碳排放总量控制目标及政策研究. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(12): 1-7.
- [9] 赵巧芝,闫庆友. 基于投入产出的中国行业碳排放及减排效果模拟. *自然资源学报*, 2017, 32(9): 1528-1541.
- [10] 陈志建,刘月梅,刘晓,孔凡斌. 经济平稳增长下长江经济带碳排放峰值研究——基于全球夜间灯光数据的视角. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2213-2222.
- [11] 吴青龙,王建国,郭丕斌. 开放 STIRPAT 模型的区域碳排放峰值研究——以能源生产区域山西省为例. *资源科学*, 2018, 40(5): 1051-1062.
- [12] 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. *资源科学*, 2016, 38(12): 2316-2325.
- [13] 张诗卉,李明煜,王灿,安康欣,周嘉欣,蔡博峰. 中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(9): 45-54.
- [14] 蒋含颖,段祎然,张哲,曹丽斌,徐少东,张立,蔡博峰. 基于统计学的中国典型大城市 CO₂ 排放达峰研究. *气候变化研究进展*, 2021, 17(2): 131-139.
- [15] Fu Y, He C Y, Luo L. Does the low-carbon city policy make a difference? Empirical evidence of the pilot scheme in China with DEA and PSM-DID. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107238.
- [16] 王文举,陈真玲. 中国省级区域初始碳配额分配方案研究——基于责任与目标、公平与效率的视角. *管理世界*, 2019, 35(3): 81-98.
- [17] 刘志华,徐军委. “双碳”目标下中国省域碳排放公平性及其影响因素. *地理科学*, 2023, 43(1): 92-100.
- [18] 洪竞科,李汉潮,蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于 RICE-LEAP 模型. *资源科学*, 2021, 43(4): 639-651.
- [19] Yang P J, Peng S, Benani N, Dong L Y, Li X M, Liu R P, Mao G Z. An integrated evaluation on China's provincial carbon peak and carbon neutrality. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 377: 134497.

- [20] 刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚. 中国省域差异化碳达峰评价方法与应用. 环境科学, 2024, 45(3): 1233-1242.
- [21] 马丁, 陈文颖. 基于中国 TIMES 模型的碳排放达峰路径. 清华大学学报: 自然科学版, 2017, 57(10): 1070-1075.
- [22] 蒋昀辰, 钟苏娟, 王逸, 黄贤金. 全国省域碳达峰时空特征及影响因素. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1289-1302.
- [23] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995—2004. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(6): 158-161.
- [24] Zhang M, Mu H L, Ning Y D. Accounting for energy-related CO₂ emission in China, 1991—2006. Energy Policy, 2009, 37(3): 767-773.
- [25] Gao C C, Liu Y H, Jin J, Wei T Y, Zhang J Y, Zhu L Z. Driving forces in energy-related carbon dioxide emissions in east and south coastal China: commonality and variations. Journal of Cleaner Production, 2016, 135: 240-250.
- [26] Ye B, Jiang J J, Li C S, Miao L X, Tang J. Quantification and driving force analysis of provincial-level carbon emissions in China. Applied Energy, 2017, 198: 223-238.
- [27] 陈占明, 吴施美, 马文博, 刘晓曼, 蔡博峰, 刘婧文, 贾小平, 张明, 陈洋, 徐丽笑, 赵晶, 王思汭. 中国地级以上城市二氧化碳排放的影响因素分析: 基于扩展的 STIRPAT 模型. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(10): 45-54.
- [28] Ma X J, Wang C X, Dong B Y, Gu G C, Chen R M, Li Y F, Zou H F, Zhang W F, Li Q N. Carbon emissions from energy consumption in China: its measurement and driving factors. Science of the Total Environment, 2019, 648: 1411-1420.
- [29] Zhang Y J, Da Y B. The decomposition of energy-related carbon emission and its decoupling with economic growth in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 1255-1266.
- [30] 韩梦瑶, 刘卫东, 谢漪甜, 姜宛贝. 中国省域碳排放的区域差异及脱钩趋势演变. 资源科学, 2021, 43(4): 710-721.
- [31] Pan X F, Guo S C, Xu H T, Tian M Y, Pan X Y, Chu J H. China's carbon intensity factor decomposition and carbon emission decoupling analysis. Energy, 2022, 239: 122175.
- [32] 杨冕, 徐江川, 杨福霞. 能源价格、资本能效与中国工业部门碳达峰路径. 经济研究, 2022, 57(12): 69-86.
- [33] 王青, 傅莉媛, 孙海添. 中国工业生产能源消费碳排放的区域差异、动态演进与影响因素. 资源科学, 2023, 45(6): 1239-1254.
- [34] 湛莹, 张捷. 碳排放、绿色全要素生产率和经济增长. 数量经济技术经济研究, 2016, 33(8): 47-63.
- [35] Kuznets G. Surveys of econometric results in agriculture: discussion. American Journal of Agricultural Economics, 1955, 37(2): 235-236.
- [36] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth. Science, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [37] Claiborne R. The closing circle: nature, man and technology. Hospital Practice, 2006, 7: 159-167.
- [38] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology. Human Ecology Review, 1994, 1(2): 277-300.
- [39] Waggoner P E, Ausubel J H. A framework for sustainability science: a renovated IPAT identity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(12): 7860-7865.
- [40] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351-365.
- [41] Zheng X, Lu Y, Yuan J, Baninla Y, Zhang S, NC Stenseth, DO Hessen, H Tian, Obersteiner M, Chen D. Drivers of change in China's energy-related CO₂ emissions. Proceedings of the National Academy of Science, 2020, (1): 34-48.
- [42] (美) 格林 Greene, William H., 张成思. 计量经济分析. 北京: 中国人民大学出版社, 2020.
- [43] Wooldridge M. Econometric analysis of cross section and panel data, 2nd edition. MIT Press, 2002.
- [44] 曾永明, 钟子康, 刘厚莲. 网络视角下中国跨省人口流动格局跃迁及驱动机制: 1991—2020 年. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(3): 160-170.
- [45] 张华, 刘哲达, 殷小冰. 中国跨省流动人口回流意愿的空间差异及影响因素. 地理科学进展, 2021, 40(1): 73-84.
- [46] Nelson C R, Plosser C R. Trends and random walks in macroeconomic time series Some evidence and implications. Journal of Monetary Economics, 1982, 10(2): 139-162.
- [47] Engle R F, Yoo B S. Forecasting and testing in co-integrated systems. Journal of Econometrics, 1987, 35(1): 143-159.