

江苏省碳排放差异和影响机理研究

赵琛¹, 刘斌², 赵溪语¹, 赵旭洁¹

(1. 南京审计大学政府审计学院, 南京 211815; 2. 南京邮电大学物联网学院, 南京 210003)

摘要: 根据排放系数法测算江苏省整体以及苏南、苏中和苏北 2001—2019 年碳排放量, 采用变异系数、基尼系数、泰尔指数分别测度江苏省 3 大区域碳排放差异。基于 STIRPAT 模型, 利用岭回归法探究江苏省整体及 3 大区域碳排放的影响机理, 运用情景分析法预测江苏省 2020—2035 年碳排放量及碳达峰年份。结果表明: 样本考察期内江苏省 3 大区域碳排放存在显著差异, 碳排放差异总体上随着时间推移波动上升; 人口规模、人均 GDP、城镇化率、产业结构、能源强度均能显著影响江苏省及 3 大区域的碳排放, 其中, 人口规模是江苏省和苏南区域碳排放增长的主要驱动因素, 城镇化率是苏中和苏北区域碳排放增长的主要驱动因素; 在经济放缓情景和产业升级情景下, 江苏省碳排放量在 2030 年实现峰值最低。

关键词: 碳排放; 区域差异; 影响机理; 江苏省

中图分类号: X322; F205 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)11-0210-08

自 21 世纪以来, 温室气体引发的全球变暖问题已引起国际社会的广泛关注。碳排放的增加是导致全球气候变暖的重要因素之一, 因此碳排放问题也得到了各国政府和学者们的高度重视。目前中国是全球最大的碳排放国, 为了展现中国在应对气候变化中的责任与担当, 中国政府积极履行减排义务。2020 年, 中国政府向世界承诺力争在 2030 年前实现碳排放达峰, 2060 年前实现碳中和。江苏作为经济大省, 二氧化碳排放量一直位于全国前列, 并且苏南、苏中和苏北各区域的社会经济发展条件、能源结构和技术水平等存在较大差异。因此, 开展江苏省碳排放差异及影响机理研究, 有助于深入理解江苏碳排放的空间差异特征, 揭示碳排放的主要影响机理, 对制定符合江苏区域特点的低碳调控政策、促进江苏率先达峰、实现绿色发展提供合理化建议具有重要的现实意义。

目前国内外学者对碳排放的研究主要集中在碳排放测算、时空特征、驱动因素及趋势预测 4 个方面。在研究碳排放测算方面, 主要有生命周期评价法、投入产出法和排放因子法^[1-3], 其中排放因子法是目前的流方法。政府间气候变化专门委员会

(IPCC)的《国家温室气体清单指南》采用的就是排放因子法。在分析碳排放时空特征方面, 已有研究表明, 在大区尺度上, 东部地区的碳排放始终占据主导地位, 中部地区则呈现稳中有降的态势, 而西部地区保持上升趋势^[4]。在省级尺度上, 随着人均碳排放的增加, 其空间自相关性呈下降趋势^[5]。同时, 碳排放强度也呈显示下降趋势, 其空间集聚性表现为高水平集中与低水平集聚并存, 并且空间溢出效应日益增强^[6]。在县域尺度上, 江苏省的碳排放量持续增长, 空间差异显著, 较高值区域主要分布在苏南地区^[7]。

在探究碳排放驱动因素方面, 学者们主要采用 STIRPAT 模型^[3,8]、对数平均迪氏指数法 (LMDI)^[9-10]和地理加权回归模型^[11]。研究表明, 经济发展和人口规模、产业结构、投资等对碳排放量有显著的促进作用^[10-15], 能源强度和产权产出对碳排放量起到抑制作用^[10,16]。城镇化对碳排放具有抑制和促进的双重作用。在城镇化初期, 由于人们对物质资源和基础设施的需求增长, 碳排放量随之上升。然而, 随着城镇化进程的推进, 当管理和技术水平提升后, 物质资料和基础设施的利用效率

收稿日期: 2024-12-04

基金项目: 江苏省高校哲学社会科学研究项目 (2022SJYB0372); 陕西省哲学社会科学研究专项 (2024HZ0903); 江苏省社科应用研究精品工程项目 (24SYB-051); 江苏省大学生创新创业训练计划 (202411287006Z)

作者简介: 赵琛 (1991—), 女, 江苏淮安人, 博士, 讲师, 研究方向为资源环境审计与绿色低碳发展; 通信作者刘斌 (1991—), 男, 山西晋中人, 博士, 讲师, 研究方向为地球系统模拟与遥感监测; 赵溪语 (2005—), 女, 陕西延安人, 研究方向为资源环境审计; 赵旭洁 (2005—), 女, 满族, 河北张家口人, 研究方向为资源环境审计。

得到改善,进而降低碳排放量^[17]。

关于碳排放趋势预测,不少学者以情景分析法为描述区域未来碳排放趋势的工具^[18]。例如,岳书敬^[19]、田泽等^[20]分别设置不同情景,探究长三角城市群碳排放变动趋势及碳达峰路径;谢煜和秦伟^[21]运用情景分析法研究江苏省的CO₂排放达峰时间及峰值水平。对于碳达峰的预测结果,学者们对中国能否在2030年左右实现达峰目标持不同观点。Mi等^[22]研究结果表明,中国碳达峰时间会在2030年之间出现;Liu和Xiao^[23]认为中国在2030年前实现碳达峰具有很大挑战性。

虽然已经有较多学者研究碳排放的时空特征、影响因素和趋势预测,但主要集中在国际尺度和省域尺度,缺乏从区域尺度分析江苏省苏南、苏中和苏北地区碳排放的差异性及影响机理。基于此,本文同时采用变异指数、基尼系数和泰尔指数3项指标,系统测度江苏省2001—2019年的碳排放区域差异,运用STIRPAT模型和岭回归方法,深入探究江苏省苏南、苏中和苏北区域碳排放的差异性影响机理,基于不同情景,预测江苏省碳达峰的时间及对应峰值,并提出差异达峰政策建议,以期为江苏省率先实现碳达峰提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 碳排放测算方法

化石燃料是碳排放的主要来源,现有研究通常通过测算化石能源的消耗量来估算碳排放量。本文借鉴刘贤赵等^[24]的方法,基于能源标准煤折算系数和碳排放系数,选取原煤、洗精煤、焦炭、原油、汽油、柴油、燃料油和天然气8种化石能源计算江苏二氧化碳排放量。

$$I = \sum_{k=1}^8 \left(E_k m_k n_k \times \frac{44}{12} \right) \quad (1)$$

式中: I 为碳排放总量; k 为能源总类; E_k 为第 k 种能源的消耗量; m_k 为第 k 种能源的这标准煤系数; n_k 为第 k 种能源的碳排放系数; $44/12$ 为二氧化碳与碳的分子量之比。折标准煤系数以及碳排放系数数分别源于《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)以及IPCC所提供的数据,见表1。

1.2 碳排放差异测度指标选取

关于碳排放差异的测度还没有专门的指标,本文采用反映区域差异的变异系数、基尼系数、泰尔指数这3项统计学指标测度碳排放的区域差异性。

变异系数 CV 在数值上等于标准差除以均值,其公式为

表1 一次能源的碳排放计算系数及折标准煤系数

能源种类	折标准煤系数	碳排放系数
原煤	0.714 3	0.755 9
洗精煤	0.900 0	0.755 9
焦炭	0.971 4	0.855 0
天然气	1.214 3	0.448 3
原油	1.428 6	0.585 7
汽油	1.471 4	0.553 8
柴油	1.457 1	0.591 9
燃料油	1.428 6	0.618 5

$$CV = \sqrt{\sum_{i=1}^n (F_i - u)^2 / n / u} \quad (2)$$

式中: F_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为第 i 个地区的碳排放指标; u 为江苏地区平均碳排放指标; n 为地区的个数。

基尼系数(Gini)的计算公式为

$$Gini = \frac{1}{2n^2 u} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |F_i - F_j| \quad (3)$$

式中: F_i 、 F_j 分别为第 i 、 j 个地区的碳排放指标。

泰尔指数(Theil)属于综合熵指数,被用来衡量经济系统中各地区差异。其计算公式为

$$Theil = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{u} \ln \frac{F_i}{u} \quad (4)$$

1.3 STIRPAT 模型

本文采用 STIRPAT 模型,探究江苏碳排放的影响机理、预测碳排放趋势以及碳达峰年份和峰值。STIRPAT 模型是由 IPAT 模型变化而来,其标准形式为

$$I_k = a P_k^b A_k^c T_k^d e \quad (5)$$

式中: I_k 为环境压力,在碳排放研究中表示碳排放量; a 为常数; P_k 为人口规模; A_k 为富裕程度; T_k 为技术水平; b 、 c 、 d 分别为 P_k 、 A_k 、 T_k 的弹性指数; e 为误差; k 为地区, $k=1, 2, 3, 4$ 。对式(5)两边取对数后,可以得到:

$$\ln I_k = \ln a + b \ln P_k + c \ln A_k + d \ln T_k + \ln e \quad (6)$$

结合国内相关研究和江苏实际,选择人口规模、经济规模、技术水平、城市化率及产业结构5个影响要素,得到扩展的 STIRPAT 模型,则式(6)可以表达为

$$\ln I_k = \ln a + b \ln P_k + c \ln A_k + d \ln U_k + f \ln IS_k + g \ln EI_k + \ln e \quad (7)$$

式中: U_k 为城市化率,用城镇人口与常住人口的比值表示,%; IS_k 为产业结构,以第二产业增加值占 GDP 的比重表示,%; EI_k 为技术水平,用能源强度,即生产单位 GDP 所消耗的能源数量表示,万 t/亿元; $\ln a$ 为常数项; b 、 c 、 d 、 f 、 g 分别为各个解释变量

的系数。本文所使用的人口规模、人均 GDP、城镇化率、产业结构等数据来源于国家统计局官网以及江苏各个地级市统计年鉴。

2 江苏碳排放差异分析

2.1 碳排放量

众所周知,江苏省的经济发展存在显著的不平衡性,区域差异十分明显。通常根据经济水平和地理位置的差异,将江苏省划分为苏南、苏中和苏北3个主要区域。为此,有必要以苏南、苏中、苏北为研究对象,从能源消耗角度分析这3大区域的碳排放现状。从图1可以直观看出,2001—2019年,江苏省整体以及苏南、苏中和苏北3大区域碳排放总量总体上呈增长趋势。2001年江苏省、苏南、苏中和苏北碳排放量分别为239.44、147.90、32.34、59.20百万t,2019年增长至840.92、521.62、117.38、201.92百万t。其中,苏南的碳排放量远远高于苏中、苏北地区,苏中的碳排放量始终保持低幅波动,历年的碳排放量均在江苏最低。江苏省、苏南和苏北地区的碳排放量均在2013年后波动幅度较小。

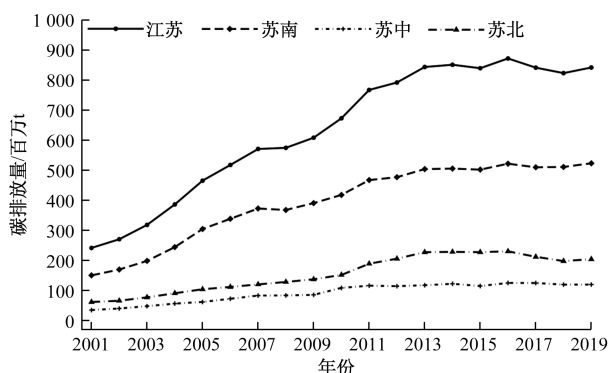


图1 2001—2019年江苏省、苏南、苏中和苏北碳排放量

2.2 碳排放差异

基于2001—2019年苏南、苏中、苏北3大区域的碳排放量,采用变异系数(CV)、基尼系数(Gini)、泰尔指数(Theil)定量测度碳排放差异,结果见表2。

从表2可以看出,苏南、苏中、苏北3大区域的碳排放差异随时间变化呈“上升-下降-再上升”的特征。2001—2005年,碳排放差异有所上升。2006年开始,3大区域的碳排放差异趋于缩小,变异系数、基尼系数和泰尔指数在2014年均达到极小值。2015—2019年,3大区域的碳排放差异小幅度上升。这一动态变化的原因可能如下:早期,江苏省整体经济蓬勃发展,尤其是苏南区域工业化步伐的加快,极大地推动了能源消耗量的激增,进而导致

表2 2001—2019年苏南、苏中、苏北碳排放差异的定量测度

年份	CV	Gini	Theil
2001	0.758	0.322	0.185
2002	0.769	0.323	0.189
2003	0.759	0.318	0.183
2004	0.782	0.327	0.194
2005	0.840	0.350	0.224
2006	0.836	0.344	0.220
2007	0.832	0.340	0.216
2008	0.801	0.331	0.202
2009	0.809	0.336	0.207
2010	0.750	0.308	0.176
2011	0.727	0.306	0.169
2012	0.717	0.306	0.166
2013	0.710	0.306	0.166
2014	0.700	0.301	0.160
2015	0.714	0.308	0.168
2016	0.709	0.304	0.164
2017	0.722	0.306	0.167
2018	0.757	0.318	0.183
2019	0.761	0.320	0.185

了碳排放量的显著增加。与此同时,尽管苏中和苏北区域的发展相对滞后,但其也在稳步推进工业化进程,碳排放量同样呈现上升趋势,只不过增速较为平缓,这在一定程度上加剧了区域间的碳排放差异。到2006年,中国在“十一五”规划中首次将节能减排纳入国家发展目标,并配套实施了一系列行动和政策。在此背景下,江苏省各地也积极响应,加大了节能减排的力度,使得苏南、苏中和苏北3大区域间的碳排放差异得以缩小。然而,后期随着对经济发展质量和效益要求的提高,苏南区域碳排放更为严格,产业结构持续优化,而苏中和苏北区域在经济发展压力下,碳排放管控有所放松,导致区域碳排放差异再次扩大。

3 江苏碳排放的影响机理

选择STIRPAT模型,运用岭回归,分别对江苏省整体及苏南、苏中、苏北3个区域的碳排放影响因素进行计量分析,探讨人口规模、经济规模、城镇化率等因素对江苏省及3大区域碳排放的影响机理。

方差膨胀因子(VIF)的检验通常用来检验变量之间是否存在明显的多重共线性,人口规模、经济规模、城镇化率、技术规模、产业结构的VIF值都远大于最大容忍度10,可以认为备选变量之间受到了明显的多重共线性干扰。因此为了消除多重共线性,选用不同岭回归对各变量进行分析。

首先,建立岭回归代码,以0.02为搜索步长,拟合岭迹图(图2),当 $K=0.4$ 、 0.3 、 0.4 、 0.3 时,江苏省、苏南、苏中和苏北各自对应的岭迹图趋于稳定,因此取各值进行拟合,模型结果见表3。

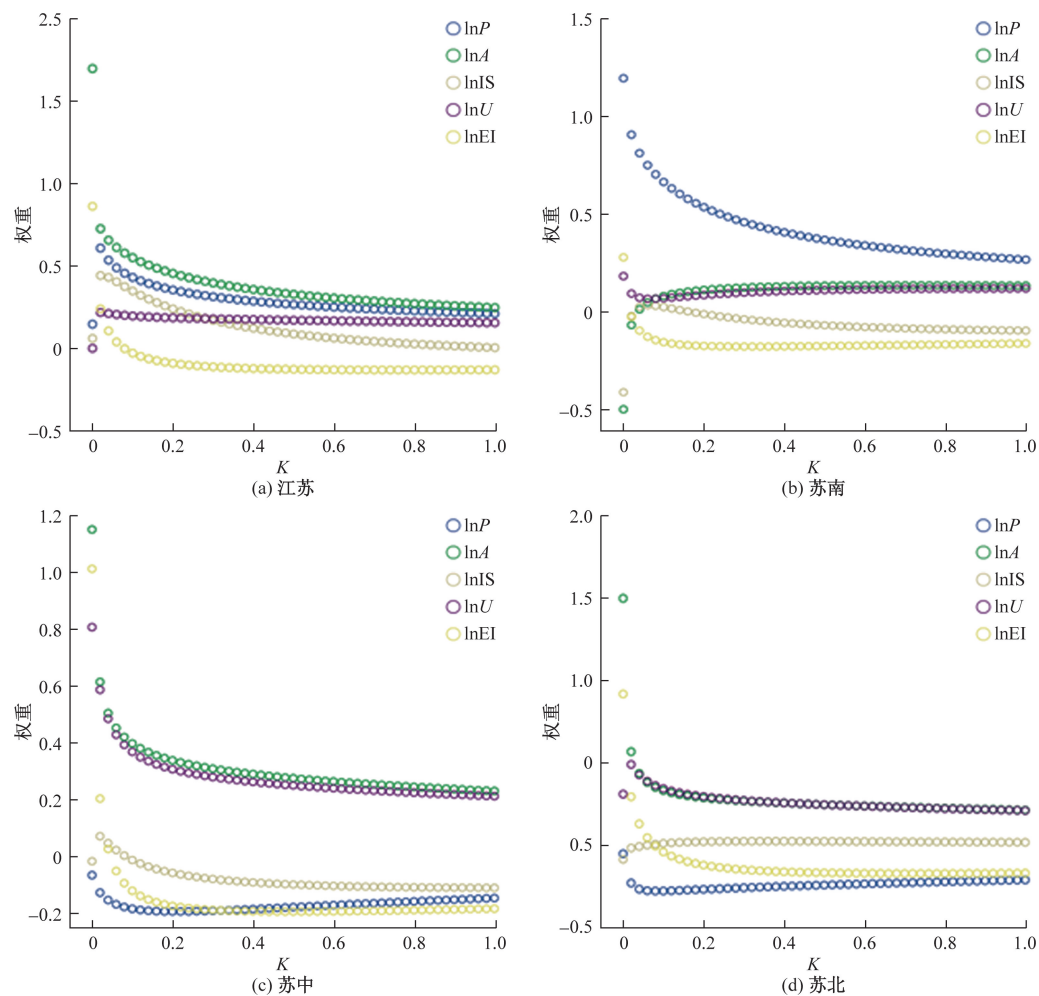


图 2 江苏省、苏南、苏中和苏北岭迹图

表 3 岭回归估计结果

地区	变量	$\ln P$	$\ln A$	$\ln U$	$\ln IS$	$\ln EI$	常量
江苏	B	2.591	0.224	0.659	0.779	-0.127	-25.048
	$SE(B)$	0.293	0.024	0.141	0.298	0.042	3.454
	Beta, std	0.310	0.393	0.176	0.166	-0.115	0.000
	t	8.837	9.181	4.672	2.611	-3.045	-7.253
	Sig.	0.000	0.000	0.000	0.022	0.009	0.000
苏南	B	0.975	0.119	-0.270	0.771	-0.163	-5.479
	$SE(B)$	0.130	0.207	0.111	0.161	0.026	1.254
	Beta, std	0.345	0.139	-0.075	0.119	-0.169	0.000
	t	7.487	5.722	-2.426	4.774	-6.366	-4.370
	Sig.	0.000	0.000	0.031	0.000	0.000	0.001
苏中	B	-13.045	0.120	-0.663	0.659	-0.171	99.678
	$SE(B)$	3.092	0.012	0.260	0.064	0.020	22.769
	Beta, std	-0.185	0.290	-0.091	0.263	-0.193	0.000
	t	-4.220	10.194	-2.553	10.292	-8.457	4.380
	Sig.	0.001	0.000	0.024	0.000	0.000	0.000
苏北	B	-4.384	0.137	0.568	0.229	-0.157	35.659
	$SE(B)$	0.508	0.010	0.047	0.315	0.033	3.756
	Beta, std	-0.255	0.272	0.276	0.028	-0.145	0.000
	t	-8.631	13.535	12.006	7.257	-4.795	9.493
	Sig.	0.000	0.000	0.000	0.048	0.000	0.000

注:江苏 $F=26.407$, Sig. (F)=0.000; 苏南 $F=22.159$, Sig. (F)=0.000; 苏中 $F=45.452$, Sig. (F)=0.000; 苏北 $F=56.782$, Sig. (F)=0.000。

从岭回归的分析结果可以看出,变量 $\ln P$ 、 $\ln A$ 、 $\ln U$ 、 $\ln IS$ 、 $\ln EI$ 都通过了 5% 的显著性水平检验。 R^2 为 0.910、0.895、0.946、0.956, F 的统计量也通过了 1% 显著性水平的检验。因此可以得出江苏省整体($k=1$)、苏南($k=2$)、苏中($k=3$)、苏北($k=4$) 碳排放量与各变量之间的相互关系:

$$\ln I_1 = -25.048 + 2.591 \ln P_1 + 0.224 \ln A_1 + 0.659 \ln U_1 + 0.779 \ln IS_1 - 0.127 \ln EI_1 \quad (8)$$

$$\ln I_2 = -5.479 + 0.975 \ln P_2 + 0.119 \ln A_2 + 0.771 \ln U_2 - 0.270 \ln IS_2 - 0.163 \ln EI_2 \quad (9)$$

$$\ln I_3 = -99.678 - 13.045 \ln P_3 + 0.120 \ln A_3 + 0.659 \ln U_3 - 0.663 \ln IS_3 - 0.171 \ln EI_3 \quad (10)$$

$$\ln I_4 = 35.659 - 4.384 \ln P_4 + 0.137 \ln A_4 + 0.568 \ln U_4 + 0.229 \ln IS_4 - 0.157 \ln EI_4 \quad (11)$$

从式(8)~式(11)的变量系数可以看出,人口规模、人均 GDP、城镇化率、产业结构与江苏省整体碳排放呈正相关,能源强度的提高会导致江苏省碳排放减少。对于苏南,碳排放量与人口规模、城镇化率和人均 GDP 之间表现为正向关系,但与产业结构和能源强度是负向关系。人均 GDP 和城镇化率的提高会促进苏中区域的碳排放,而人口规模、产业结构和能源结构与苏中区域的碳排放呈负相关。苏北区域的碳排放量与人均 GDP、城镇化率和第二产业的占比变化方向一致,与人口规模、能源强度的变化方向相反。

通过比较江苏省整体以及苏南、苏中、苏北 3 个区域碳排放影响因素的变量系数,发现这些影响因素的作用方向及影响程度存在显著差异。其中,人口规模对江苏省整体碳排放的影响最大,苏南次之。在其他变量保持不变的情况下,江苏省和苏南区域人口规模每增加 1%,碳排放量分别平均增加 2.591%、0.975%;城镇化率对苏南区域碳排放的影响大于江苏省整体和其他两个地区,在其他变量不变的情况下,苏南区域城镇化率每增加 1%,其碳排放量平均增加 0.771%;人均 GDP 对江苏省整体、苏南、苏中、苏北碳排放的影响程度接近,对江苏省整体的影响程度稍显著于 3 大区域。值得注意的是,人口因素与苏中、苏北区域碳排放之间为负向关系,其原因可能是在研究期间,这两个区域的碳排放呈增长态势,但其人口规模却表现为波动状态。2001 年苏中和苏北的人口分别为 1 688.73 万人、3 153.02 万人,2019 年分别回落至 1 650.31 万人、3 041.60 万人。能源强度对江苏省整体、苏南、苏中、苏北的碳排放量均为负向影响;随着第二产业

比重的减少,江苏省整体和苏北区域的碳排放减少,而苏南和苏区域的碳排放量却有所增加。

人口规模是江苏省整体和苏南区域碳排放快速增长的主要驱动因素,这主要是因为样本考察期间江苏省和苏南区域的人口增长迅速。随着人口数量的增加,对能源的需求也随之上升,这些能源的消耗直接导致碳排放量的增加^[25-26]。

城镇化率是苏中和苏北区域碳排放增长的主要驱动因素,其原因可能在于苏中和苏北两大区域的城镇化水平在江苏相对落后,增长幅度相对较大。城镇化的快速推进促使大量农村人口涌入城市,进而带动了居民对商品和能源需求的持续增长。在这一过程中,消费结构发生了显著变化,人们开始追求更高质量的生活,这往往伴随着对能源的更高需求,从而导致碳排放的增加^[27]。

人均 GDP 对江苏省整体和 3 大区域碳排放量存在一定影响,但不如人口规模和城镇化水平两个因素显著。人均 GDP 的增长意味着人均收入的提高,追求高质量生活的意识不断增强,消费能力也会逐步增强,但个人消费产品包括低碳环保产品,随着此类产品占总消费品的比例增加,可能导致人均 GDP 的变化对碳排放的影响程度有所下降。

第二产业占比在苏南、苏中区域对碳排放具有负向影响。可能是因为这两个区域的第二产业发展创新应用了更多清洁能源技术,使得降碳效应超过了经济增长导致的碳排放增量,因此在这两个区域第二产业占比与碳排放量呈负相关。

能源强度与江苏省整体和 3 大区域的碳排放量均呈负相关关系,变量系数分别为-0.127、-0.163、-0.171、-0.157。2001—2009 年能源强度的提高导致碳排放减少,但其对碳排放的负向影响总体较低。

4 碳排放峰值预测

4.1 情景设计

情景分析法是碳排放预测研究中常用的工具,合理的情景设置对于准确预测碳排放量至关重要。在对碳排放量之间因果关系进行显著性检验的基础上,基于江苏省人口、人均 GDP、城镇化率、第二产业比重以及能源强度等历史数据变化趋势,并结合相关国家发展战略规划,设定了基准情景下 2020—2035 年各影响要素的变化率。为了更精确地反映发展趋势,变化率的设定以 5 年为周期进行适当调整,具体变化情况如下。

(1)人口规模(P)。“十三五”规划期间,江苏

省的平均人口自然增长率为 0.35%。国务院发布的《国家人口发展规划》中认为中国到 2030 年人口登顶,随后人口规模逐年减小,但幅度较小。综合考虑上述因素并结合江苏省的实际情况,设定 2020—2025 年江苏省的平均人口自然增长率为 0.39%,2026—2030 年为 0.24%,2031—2035 年为 0.09%。

(2)人均 GDP(A)。经过计算,江苏省 2001—2019 年的人均 GDP 增长率呈缓慢下降的趋势。根据《江苏省国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》,江苏省未来力求保持经济平稳健康发展。基于这一目标,在基准情景下,2020—2025 年江苏省的人均 GDP 年均增长率被设定为 5%,2026—2030 年和 2031—2035 年人均 GDP 依次为 4%、3%。

(3)城镇化率(U)。2020 年江苏常住人口城镇化率达到了 74%,根据江苏省的“十四五”规划,2021—2025 年江苏的城镇化率目标约为 75%。基准情景中,2035 年设定江苏省域的城市化率将达到 80%,以此为基础反推计算江苏及各区域 2020—2035 年各阶段城市化率的增长速度。

(4)产业结构(IS)。产业结构升级促进经济增长,江苏省 2016—2020 年的第二产业增加值的 GDP 贡献值占比年均下降率为 1.1%,而且江苏省的产业结构值呈下降趋势。因此设定基准情景下,江苏省 2020—2025 年、2026—2030 年和 2031—2035 年第二产业占比年均下降分别为 1.6%、2.2%、2.7%。

(5)能源强度(EI)。国家“十四五”规划中明确了“单位国内生产总值碳排放值下降 18%”的目标。《江苏省“十四五”全社会节能的实施意见》把 2025 年全省单位 GDP 能耗比 2020 年下降 14% 作为目标,将 2020—2025 年江苏的能源强度变化率设定为-4%,之后在此基础上逐步放缓。

在基准值的基础上,对各影响因素变化率的低值与高值进行了设置(表 4)。依据影响因素变化率的高、低和基准值的不同组合,构建了 5 种具有代表性的碳排放情景(表 5),分别用于分析特定发展战略下的碳排放变化特征。在基准情景(S1)中,所有影响因素的变化率均设定为基准值,以模拟当前政策和规划下碳排放的演变趋势,为其他情景的比较提供参考;在产业结构升级情景(S2)中,产业结构变化率设定为高值,其他影响因素保持基准值,以探讨产业结构转型升级对未来碳排放的影响,特别

表 4 江苏省碳排放影响因素变化率设置

变化	时间	影响因素变化率/%				
		P	A	U	IS	EI
低值	2020—2025 年	—	4.5	0.8	-1.3	-3.5
	2026—2030 年	—	3.5	0.6	-1.9	-3.35
	2031—2035 年	—	2.5	0.4	-2.4	-3.2
基准值	2020—2025 年	0.39	5.0	1.0	-1.6	-4.0
	2026—2030 年	0.24	4.0	0.8	-2.2	-3.85
	2031—2035 年	-0.2	3.0	0.6	-2.7	-3.7
高值	2020—2025 年	—	5.5	1.2	-1.9	-4.5
	2026—2030 年	—	4.5	1.0	-2.5	-4.35
	2031—2035 年	—	3.5	0.8	-3.0	-4.2

表 5 碳排放情景设置

情景组合	P	A	U	IS	EI
基准情景(S1)	基准	基准	基准	基准	基准
产业升级情景(S2)	基准	基准	基准	高	基准
节能发展情景(S3)	基准	基准	基准	基准	高
绿色发展情景(S4)	基准	基准	基准	高	高
经济放缓情景(S5)	基准	低	低	基准	基准

是通过优化产业比重实现低碳的可能性;在节能发展情景(S3)中,能源强度变化率设定为高值,其余影响因素保持基准水平,以分析通过加强能源约束、提升能源利用效率以及扩大清洁能源应用比例对于碳排放的影响;在绿色发展情景(S4)中,产业结构和能源强度变化率设置均为高值,其他影响因素仍设定为基准值,从而探索以低碳发展为核心目标的情景下碳排放的发展趋势;在经济放缓情景(S5)下,同时将人均 GDP 和城镇化变化率设定为低值,而其他各影响因素维持基准值,以分析经济增长趋缓背景下的碳排放趋势。

4.2 碳达峰预测

从图 3 可以看出,江苏省在 5 种发展情景下都可以在 2030 年达到峰值,其中峰值碳排放量最大的是节能发展情景(S3),最小的是经济放缓情景(S5)和产业升级情景(S2),碳排放峰值为 1 085 百万 t。

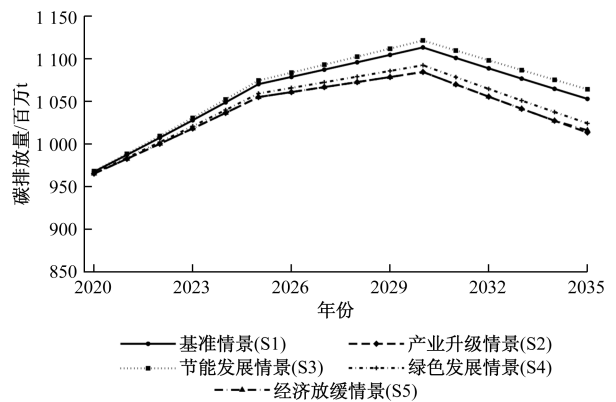


图 3 5 种情景下江苏省碳排放量峰值预测

在经济放缓情景下,碳排放趋势受到人均 GDP 和城镇化率增长放缓的显著影响。首先,人均 GDP 的提高通常伴随着居民消费水平和生活质量的提高,但这也可能导致资源与能源的需求增加,从而加剧碳排放。然而,作为全国的经济大省,江苏省通过适度降低经济增速,可以在一定程度上缓解资源与环境的压力,有助于达到减碳的目的。其次,城市已经成为主要的经济活动中心和二氧化碳排放来源,占中国总排放量的 85%。城镇化率的提高一方面会带来土地资源和生态环境的过度开发,直接推动能源消耗和碳排放的上升;另一方面快速的城镇化还可能导致交通拥堵和人口流动增加,进一步推高能源需求。由于江苏省的城市化发展较为迅速,合理控制城镇化率的增速,有助于降低对环境的压力,促进“碳达峰”目标的提前实现。同时,经济放缓情景下的碳排放峰值预计最低,为实现低碳转型提供了更多可能性。在产业升级情景下,高速产业结构升级通常表现为第二产业占比的显著下降。由于第二产业聚集了大多数高能耗行业,其比重的降低可以有效减少单位经济产出的能源需求。通过加快向服务业和高附加值产业的转型,江苏省能够显著降低对传统能源的依赖性,推动碳排放的有效削减。这一过程不仅有助于经济发展的绿色转型,还为实现碳减排目标提供了可行路径。

5 结论与建议

5.1 结论

定量测度了江苏省苏南、苏中、苏北 3 大区域的碳排放差异,运用 STIRPAT 模型分析江苏省整体以及 3 大区域的碳排放影响机理,并通过情景分析法预测江苏省的碳达峰时间及峰值,主要结论如下。

(1)碳排放变异系数、基尼系数、泰尔指数显示,江苏省整体、苏南、苏中、苏北的碳排放量存在显著差异,时序差异整体表现为波动上升。

(2)STIRPAT 模型岭回归分析结果表明,人口规模、人均 GDP、城镇化率、产业结构和能源强度对江苏省整体及 3 大区域碳排放均有显著影响。其中,人口规模是江苏省整体和苏南区域碳排放增长的主要驱动因素,城镇化率是苏中和苏北区域碳排放增长的主要驱动因素。

(3)在经济放缓情景(S5)和产业升级情景(S2)下,江苏省在 2030 年达峰,峰值为 1 085 百万 t。

5.2 政策建议

为促进江苏碳达峰目标的尽早实现,结合江苏省和 3 大区域碳排放特征,建议因地制宜地制定省

级以及区域级的绿色低碳发展策略。

(1)江苏省高速的城镇化进程加快了人口规模的扩大,由此引发的碳排放等环境问题不容忽视。江苏省应控制对土地生态的过度开发,放缓经济发展,加快产业结构升级、能源清洁化发展。

(2)苏南地区因为人口的快速增长带来了大量的碳排放。因此,应将优化人口结构、人口空间布局以及加强居民绿色低碳环保意识作为碳减排工作的重点。

(3)苏中地区应推进高质量的绿色城镇化。人均 GDP 仍是苏中区域碳排放增加不可忽视的驱动因素,因此要大力发展绿色环保产业,加强经济高质量发展。

(4)苏北地区在推进高质量的绿色城镇化的同时,也要加强绿色低碳科技创新,坚持优化调整产业结构,逐步推进第二产业绿色高质量发展,加大第三产业对经济的贡献。

参考文献

- [1] 王永琴,周叶,张荣. 碳排放影响因子与碳足迹文献综述:基于研究方法视角[J]. 环境工程, 2017, 35(1): 155-159.
- [2] 刘青. 碳足迹视角下中国建筑全产业链碳排放测算方法及减排政策研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- [3] 费杰,杨孟,张惠玉,等. 江苏省设区市尺度的碳排放核算及影响因素研究[J]. 三峡生态环境监测, 2023, 8(2): 26-35.
- [4] 张雷,黄园渐,李艳梅,等. 中国碳排放区域格局变化与减排途径分析[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 211-217.
- [5] WANG S, FANG C, WANG Y. Spatiotemporal variations of energy-related CO₂ emissions in China and its influencing factors: An empirical analysis based on provincial panel data[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 505-515.
- [6] 赵巧芝,闫庆友,赵海蕊. 中国省域碳排放的空间特征及影响因素[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2018, 20(1): 9-16.
- [7] 李建豹,揣小伟,周艳. 江苏省县域碳排放时空演化及影响因素分析[J]. 生态经济, 2023, 39(7): 36-44.
- [8] 曾伟,方泽慧,张燕华. 湖北省碳达峰情景预测:基于 STIRPAT 扩展模型[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(S2): 226-232.
- [9] 李百吉,张倩倩. 京津冀地区碳排放因素分解:兼论“新常态”下的变动趋势[J]. 生态经济, 2017, 33(4): 19-24.
- [10] 高懿君,孙宁,汤斌杰. 江苏省碳排放特征及其影响因素分析[J]. 经营与管理, 2024(10): 207-216.
- [11] 严志翰,任丽燕,刘永强,等. 浙江省碳排放时空格局及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26

- (9): 1427-1435.
- [12] 苏王新, 孙然好. 中国典型城市群城镇化碳排放驱动因子[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1975-1983.
- [13] AGHION P, DECHEZLEPRÊTRE A, HEMOUS D, et al. Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: evidence from the auto industry[J]. *Journal of Political Economy*, 2016, 124(1): 1-51.
- [14] 刘传明, 孙喆, 张瑾. 中国碳排放权交易试点的碳减排政策效应研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(11): 49-58.
- [15] 魏庆坡. “双碳”目标下碳交易体系与绿色低碳政策的互动整合研究[J]. 河北科技大学学报(社会科学版), 2022, 22(1): 19-26.
- [16] 苏瑞娟, 赵博娟, 杨文青. 碳排放权交易的 CO₂ 减排效应研究: 基于包含溢出效应的 SCM[J]. 生态经济, 2022, 38(3): 30-39.
- [17] LI P, LU Y, WANG J. Does flattening government improve economic performance? evidence from China[J]. *Journal of Development Economics*, 2016, 123: 18-37.
- [18] 邹秀清, 孙学成, 葛天越, 等. 长三角地区碳排放差异、影响机理及碳达峰预测[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(3): 548-557.
- [19] 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.
- [20] 田泽, 张宏阳, 纽文婕. 长江经济带碳排放峰值预测与减排策略[J]. 资源与产业, 2021, 23(1): 97-105.
- [21] 谢煜, 秦伟. 江苏省碳达峰预测与情景分析: 基于 STIRPAT 模型[J]. 南京林业大学学报(人文社会科学版), 2023, 23(3): 54-62.
- [22] MI Z, WEI Y M, WANG B, et al. Socioeconomic impact assessment of China's CO₂ emissions peak prior to 2030[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2227-2236.
- [23] LIU D, XIAO B. Can China achieve its carbon emission peaking? a scenario analysis based on STIRPAT and system dynamics model[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 647-657.
- [24] 刘贤赵, 杨旭, 张国桥, 等. 碳排放空间依赖视角下环境分权的碳排放效应[J]. 地理科学, 2021, 41(9): 1654-1666.
- [25] BIRDSALL N. Another look at population and global warming[M]. Washington: World Bank Publications, 1992.
- [26] 雷晓燕, 张春峰, 李昕, 等. 人口变化、消费结构与低碳转型[J]. 数量经济技术经济研究, 2025, 42(1): 5-28.
- [27] 罗栋桑, 沈维萍, 胡雷. 城镇化、消费结构升级对碳排放的影响: 基于省级面板数据的分析[J]. 统计与决策, 2022, 38(9): 89-93.

Research on Carbon Emission Differences and Impact Mechanisms in Jiangsu Province

ZHAO Chen¹, LIU Bin², ZHAO Xiyu¹, ZHAO Xujie¹

(1. School of Government Audit, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China;

2. School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Using the emission factor method, the carbon emissions of Jiangsu Province as a whole, as well as those of southern, central, and northern Jiangsu from 2001 to 2019 were calculated. The variation coefficient, Gini coefficient, and Theil index were employed to measure the disparities in carbon emissions among the three major regions of Jiangsu. Based on the STIRPAT model and using ridge regression, the driving mechanisms of carbon emissions in Jiangsu province and its subregions were explored. Furthermore, scenario analysis was applied to predict the carbon emissions and peak carbon year of Jiangsu province for the period 2020—2050. The results show that significant disparities in carbon emissions exist among the three regions of Jiangsu province during the study period, with overall differences fluctuating and increasing over time; Population size, per capita GDP, urbanization rate, industrial structure, and energy intensity all significantly impact carbon emissions in Jiangsu and its subregions. Population size is identified as the primary driver of carbon emissions growth in Jiangsu province and southern Jiangsu, while the urbanization rate is the main driver in central and northern Jiangsu; Under scenarios of economic slowdown and industrial upgrading, Jiangsu province is projected to reach its carbon emissions peak as early as 2030.

Keywords: carbon emissions; regional differences; impact mechanisms; Jiangsu Province