

长三角地区碳排放差异、影响机理及碳达峰预测¹

邹秀清 孙学成* 葛天越 邢 盛

(上海电力大学经济与管理学院, 上海 200090)

【摘要】：系统分析长三角三省一市碳排放差异、探究其影响机理及预测碳排放趋势，对促进该区域碳排放协同达峰、实现绿色一体化发展具有重要意义。根据排放系数法测算浙江、江苏、安徽和上海 2005 ~ 2019 年能源消费碳排放量，选择变异系数、基尼系数、泰尔指数分别测度长三角地区碳排放差异。基于 STIRPAT 拓展模型，采用岭回归探究长三角各省市碳排放的影响机理；运用情景分析法结合各省政策规划及发展规律，参考各变量历史变化率，设定基准发展情景预测长三角各省市 2020 ~ 2035 年碳排放量及碳达峰年份。结果表明：(1)考察期内长三角三省一市碳排放存在显著差异，碳排放差异整体上随着时间推移波动上升。(2)人口数量、城镇化水平、人均 GDP、能源强度均显著影响长三角三省一市的碳排放，能源结构仅对江苏的碳排放有显著影响；上海、浙江、安徽的碳排放驱动因素中，产业结构影响最为显著。(3)基准情景下，上海、浙江、安徽和江苏分别在 2026、2027、2028 和 2031 年实现碳达峰，峰值依次为 20 768、40 855、63 533 和 94 973 万 t。

【关键词】：碳达峰；碳排放差异；STIRPAT 模型；情景设置；长三角地区

【中图分类号】：X322；F323 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004- 8227(2023)03- 0548- 10

【DOI】：10.11870/cjlyzyyhj202303010

全球气候变化是世界各国所面临的严峻挑战之一^[1]。在其众多的影响因素中人类活动是首因，各国政府有责任采取措施应对全球气候变暖^[2]。中国政府已许诺力争在 2030 年前实现碳排放达峰，2060 年前实现碳中和。由于中国不同区域的社会经济发展条件、能源结构和碳排放特征存在较大差异，因此，各区域应根据当地碳排放驱动因素及变化趋势制定合理的低碳发展策略。长三角地区是中国经济最发达的区域，但该地区近 20 年的能源消费总量和二氧化碳排放量也占全国较大比重。在长三角地区高质量一体化发展的国家战略背景下，系统研究长三角三省一市碳排放差异、影响机理及预测碳排放趋势，对促进该区域碳排放协同达峰、实现绿色发展具有重要意义。

目前，围绕长三角地区碳排放的研究主要集中在碳排放时空格局、驱动因素及趋势预测三个方面。在研究长三角地区碳排放时空格局方面，Li 等^[3]发现长三角地区各县市碳排放呈现出空间聚集性。余倩楠等^[4]研究表明长三角地区碳排放空间分异性显著；舒心等^[5]研究得出长三角城市群碳排放与城市用地增长的时空异质性趋于同质的结论。Zhong 等^[6]发现在长三角地区各城市的工业碳排放效率差异较大，并呈现空间集群的特征。陈江龙等^[7]以泛长三角地区为例，分析了该区域典型年份碳排放的空间分异、时间演变，发现该区域碳排放总体格局稳中有变。已有文献在定量分析碳排放差异时多采用单个指标，本文则引入变异系数(CV)、基尼系数(Gini Index)、泰尔指数(GE)三项经常用来描述区域差异的统计学指标，定量测度长三角地区三省一市的碳排放差异，并分析 2005~2019 年该区域碳排放差异的演变趋势。

¹ **【收稿日期】**：2022- 05- 05；**【修回日期】**：2022- 08- 02

【基金项目】：国家社会科学基金一般项目(19BGL214)

【作者简介】：邹秀清(1973 ~)，男，教授，主要研究方向为资源经济。E-mail: zxqing888@263

【* 通讯作者 E-mail】：1839699585@qq

在探究碳排放驱动因素方面,长三角地区各城市碳排放主要影响因素存在明显差异^[8]。学者研究发现城市规模与碳排放存在负向关系^[9,10],城市化对碳排放的影响为正^[11,12],但城市化子系统对长三角碳排放的影响各异^[13]。Shao等^[14]以长三角地区为研究对象,结果显示市场分割与碳排放存在非线性关系。经济发展是长三角地区能源消费碳排放增长的主要因素^[15],且地方官员的晋升来源、任期和年龄显著影响碳排放总量^[16]。亦有研究表明人口对长三角地区碳排放的影响最为显著^[17],但人口对碳排放的正向促进作用逐渐减小^[18]。翟石艳等^[19]发现经济增长和能源消费、碳排放量之间存在单向因果关系。而宋府霖等^[20]研究发现经济产出、人口规模是长三角地区碳排放的正反馈驱动因素,能源强度和能源结构是负反馈驱动因素。长三角地区已逐渐向以服务业和先进制造业为主的工业化结构发展,导致研究期间碳排放缓慢增长^[21]。Zhang等^[22]研究结果表明工业化与碳排放效率呈U型关系。虽然已有较多学者研究长三角碳排放的影响机理,但缺乏对长三角三省一市碳排放差异性影响机理的针对性解释。本文基于STIRPAT扩展模型,采用岭回归系统探究长三角三省一市碳排放的差异性影响机理。

关于碳排放趋势预测,不少机构与学者以情景分析法为描述区域未来碳排放趋势的工具。例如,政府间气候变化专门委员会(IPCC)研究开发的典型浓度路径(Representative concentration pathway, RCP)和共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs),实现了情景假设从简单描述到定量研究的升级,帮助各地区以更加科学的方法和手段应对碳排放等环境问题^[23,24]。唐德才等^[25]基于系统动力学模型,预测长三角地区能源消耗碳排放发展趋势。岳书敬等^[26,27,28]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。王春春^[29]等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。王传磊^[30]以浙江省为研究对象,设置8种发展情景预测其碳排放强度发展趋势。王勇等^[31]对上海等超大城市进行碳排放达峰情景预测,邱立新等^[32]预计上海2023年左右实现峰值目标。目前学界关于中国碳排放达峰的研究成果丰富,但上述研究大多基于不同的情景设置和预测模型,碳排放预测结论各异。考虑到预测碳排放趋势工作的复杂性,本文围绕情景和模型两个方面展开研究,基于历史数据与碳排放发展规律,结合长三角三省一市的政策规划将其置于统一的基准情景框架,并采用相同模型进行碳排放预测,研究结论对长三角地区一体化绿色发展具有重要的比较参考价值。

鉴于此,本文同时采用变异系数、基尼系数、泰尔指数3项指标,系统测度长三角地区2005~2019年的碳排放区域差异;运用STIRPAT模型和岭回归方法,深入探究长三角三省一市碳排放的差异性影响机理;基于基准情景,预测长三角三省一市碳达峰的时间及对应峰值,并提出差异化达峰策略。

1 研究方法与数据来源

1.1 碳排放测算方法

本文选用IPCC温室气体排放指南里的碳排放系数法,对上海、浙江、江苏、安徽能源消费碳排放进行计算。

$$I = \sum_{j=1} E_j \times K_j \quad (1)$$

式中:I为碳排放总量;j为能源种类;E_j为第j种能源的消耗量,按标准煤计;K_j为第j种能源的碳排放系数。本文所使用的能源消费数据来源于《中国能源年鉴》(2006-2020)。

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(CV)、基尼系数(Gini Index)、泰尔指数(GE)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，其公式如(2)式所示：

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

式中： y_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 代表第 i 个地区的碳排放指标； u 是长三角地区平均碳排放指标； n 是地区的个数。

基尼系数(Gini Index, 缩写为 Gini)的计算公式为：

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

式中： y_i 、 y_j 分别是第 i 、 j 个地区的碳排放指标； u 和 n 的定义同式(2)。

泰尔指数(GE)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：

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

式中： y_i 是第 i 个地区的碳排放指标； u 和 n 的定义同式(2)。

1.3 STIRPAT 模型

本文采用 STIRPAT 模型，探究长三角地区三省一市碳排放的影响机理，预测碳排放趋势以及碳达峰年份和峰值。York 等^[33]研究发现碳排放量与经济发展指标间关系复杂，于是以 IPAT 与 ImPACT 模型为基础提出了 STIRPAT 模型，其标准形式为：

$$I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i \quad (5)$$

本文以 $I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i$ 为基础，取对数将 IPAT 模型变换为面板模型：

$$\ln I_i = \ln a + b \ln P_i + c \ln A_i + d \ln T_i + \ln e_i \quad (6)$$

结合长三角地区的区域特点，选择人口规模、经济规模、技术水平、城市化率、能源结构及产业结构等六个影响要素，得到扩展的 STIRPAT 模型，则式(6)可表述为：

$$\ln I_i = \ln a + b \ln P_i + c \ln A_i + d \ln EI_i + f \ln U_i + g \ln ES_i + h \ln IS_i + \ln e_i \quad (7)$$

式中： I_i 表示 i 省(市)碳排放总量(万 t)； P_i 为人口规模，以地区常住人口数(万人)表示； A_i 代表经济规模，用人均 GDP(亿元/万人)表示； EI_i 即技术水平，用能源强度，即生产单位 GDP 所消耗的能源数量(万 t/亿元)表示； U_i 表示城市化率，用城镇人口与常住人口的比值(%)表示； ES_i 表示能源结构，以能源消耗中煤类占比(%)表示； IS_i 表示产业结构，以第二产业增加值占 GDP 的比重(%)表示； i ($i=1, 2, 3, 4$) 表示长三角地区的不同省市， $\ln a$ 为常数项， b 、 c 、 d 、 f 、 g 、 h 分别为各个解释变量的系数， e 为随机干扰项。本文所使用的人口、城镇化率、GDP、产业结构等数据来源于国家统计局官网。

2 长三角地区碳排放差异分析

2.1 碳排放量测算

运用碳排放系数法计算 2005~2019 年长三角地区三省一市碳排放量，碳排放整体呈上升趋势，如图 1 所示。2005 年上海、浙江、江苏、安徽碳排放量分别为 15 893、25 582、39 610、15 667 万 t，2019 年增长至 19 291、38 141、80 459、40 806 万 t。其中，上海市碳排放始终保持低幅波动，历年的碳排放量均为长三角地区最低。浙江省碳排放量在 2011 年后波动幅度较小。2009~2013 年江苏省碳排放速度猛增，而 2013~2019 年碳排放趋于平稳上升。安徽省则以 2013 年为分界点，碳排放量增速由高速转为低速。

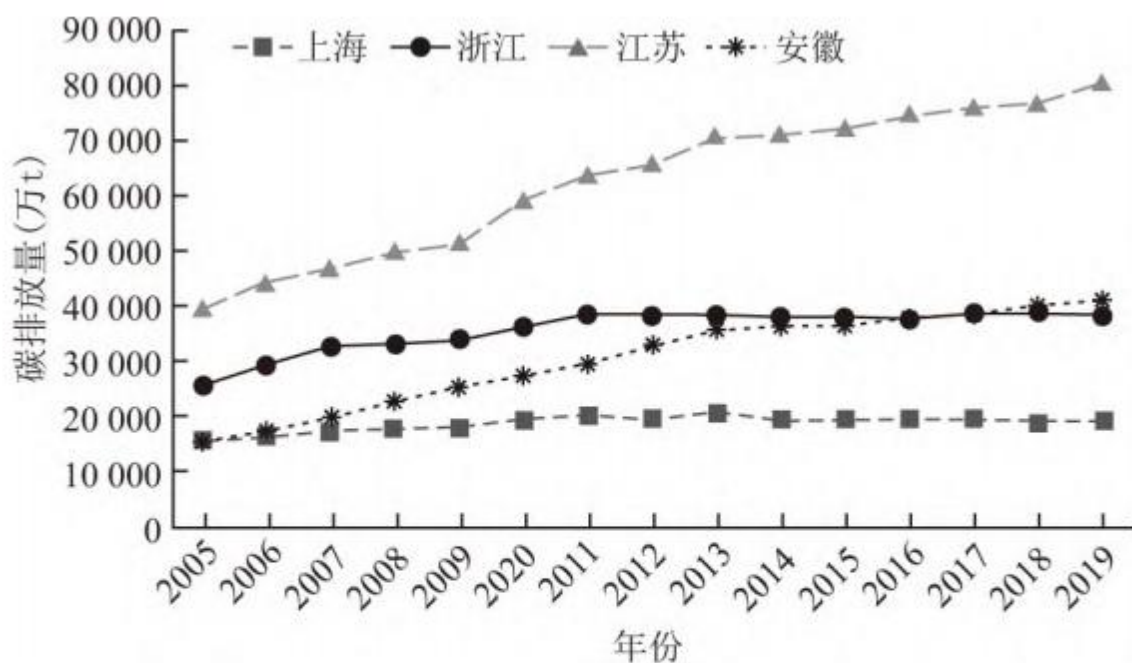


图 1 2005~2019 年长三角地区三省一市碳排放量变化

Fig. 1 Change of carbon emissions in YRD region from 2005 to 2019

2.2 碳排放差异定量测度

基于 2005~2019 年长三角地区三省一市的碳排放量,采用变异系数(CV)、基尼系数(Gini)、泰尔指数(GE)定量测度碳排放差异,结果见表 1。

表 1 长三角地区碳排放差异的定量测度

年份	变异系数 (CV)	基尼系数 (Gini)	泰尔指数 (GE)
2005	0.403 6	0.210 6	0.077 4
2006	0.414 9	0.219 5	0.082 5
2007	0.402 0	0.216 4	0.078 6
2008	0.397 7	0.215 5	0.076 5
2009	0.391 3	0.213 4	0.074 5
2010	0.417 5	0.224 4	0.083 4

2011	0.428 2	0.230 2	0.087 9
2012	0.432 2	0.231 0	0.090 4
2013	0.440 3	0.230 2	0.092 9
2014	0.452 9	0.236 8	0.099 5
2015	0.460 8	0.240 1	0.102 4
2016	0.472 4	0.243 8	0.107 4
2017	0.474 3	0.245 2	0.108 5
2018	0.475 2	0.248 3	0.110 5
2019	0.498 3	0.260 5	0.119 8

为了更加直观地体现碳排放差异的时序变化特征，以 2005 年为基期，取三项指标的相对值绘成趋势变化曲线，见图 2。

表 1 和图 2 显示，长三角地区在 15 年(2005~2019)碳排放差异整体上表现为波动中上升，其随时间变化呈 “上升一下降一再上升” 的特征。2005~2006 年，碳排放差异有所上升。2007 年开始，各省市碳排放差异趋于缩小，变异系数、基尼系数和泰尔指数在 2009 年均达到极小值。2010~2019 年间，长三角三省一市的碳排放差异大幅上升。从图 2 可见，三个测度指标随时间演变的总体走势特征相近，而且波峰、波谷点在相同时间出现，表明三个指标在测度碳排放差异方面能够满足准确一致的要求。

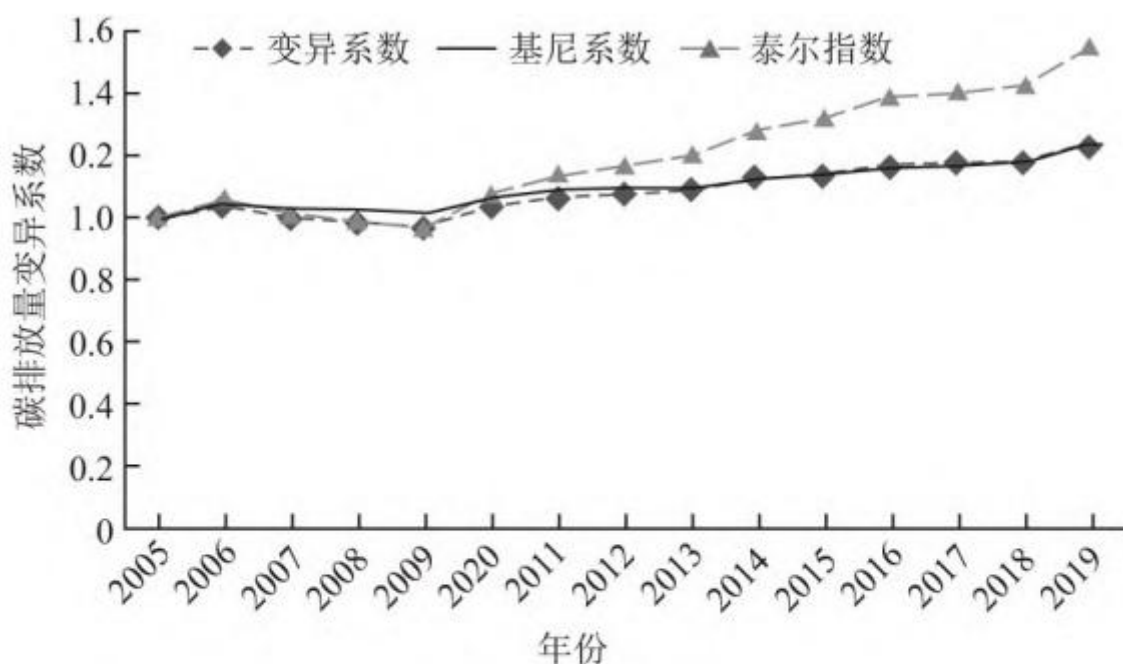


图 2 2005~2019 年长三角地区碳排放量差异的演变

Fig. 2 Evolution of regional differences on carbon emissions in YRD region from 2005 to 2019

3 长三角地区碳排放的影响机理

本文选择 STIRPAT 模型, 运用岭回归, 对上海、浙江、江苏及安徽的碳排放影响因素分别进行计量分析, 研究人口数量、城镇化率、人均 GDP、能源强度、能源结构和产业结构等因素对长三角地区三省一市碳排放的影响机理。

应用 SPSS 对模型进行 OLS 多元回归分析。各省市 STIRPAT 模型中, 上海除城镇化率外, 其他变量 VIF 值大于 10, 安徽仅有能源结构的 VIF 值小于 10, 而浙江、江苏所有变量的 VIF 值均大于 10, 说明各省市的模型均存在多重共线性。为消除多重共线性, 本文运用岭回归对各变量进行分析, 在其标准化矩阵的元素主对角线上加入岭参数 (k), 提高模型的稳定性 (岭参数为正值)^[34]。

首先, 建立岭回归代码, 以 01 为分布区域, 以 0.01 为搜索步长, 拟合岭迹图 (见图 3), 各变量趋于稳定时所对应的 k 值即为最佳值, 当 $k=0.4$ 、 0.1 、 0.2 、 0.26 时, 上海、浙江、江苏、安徽各自对应的岭迹图趋于平稳, 此时所对应的 R^2 为 0.812、0.851、0.979、0.987, 因此取各值进行拟合, 模型结果见表 2, 由结果可知拟合效果好。

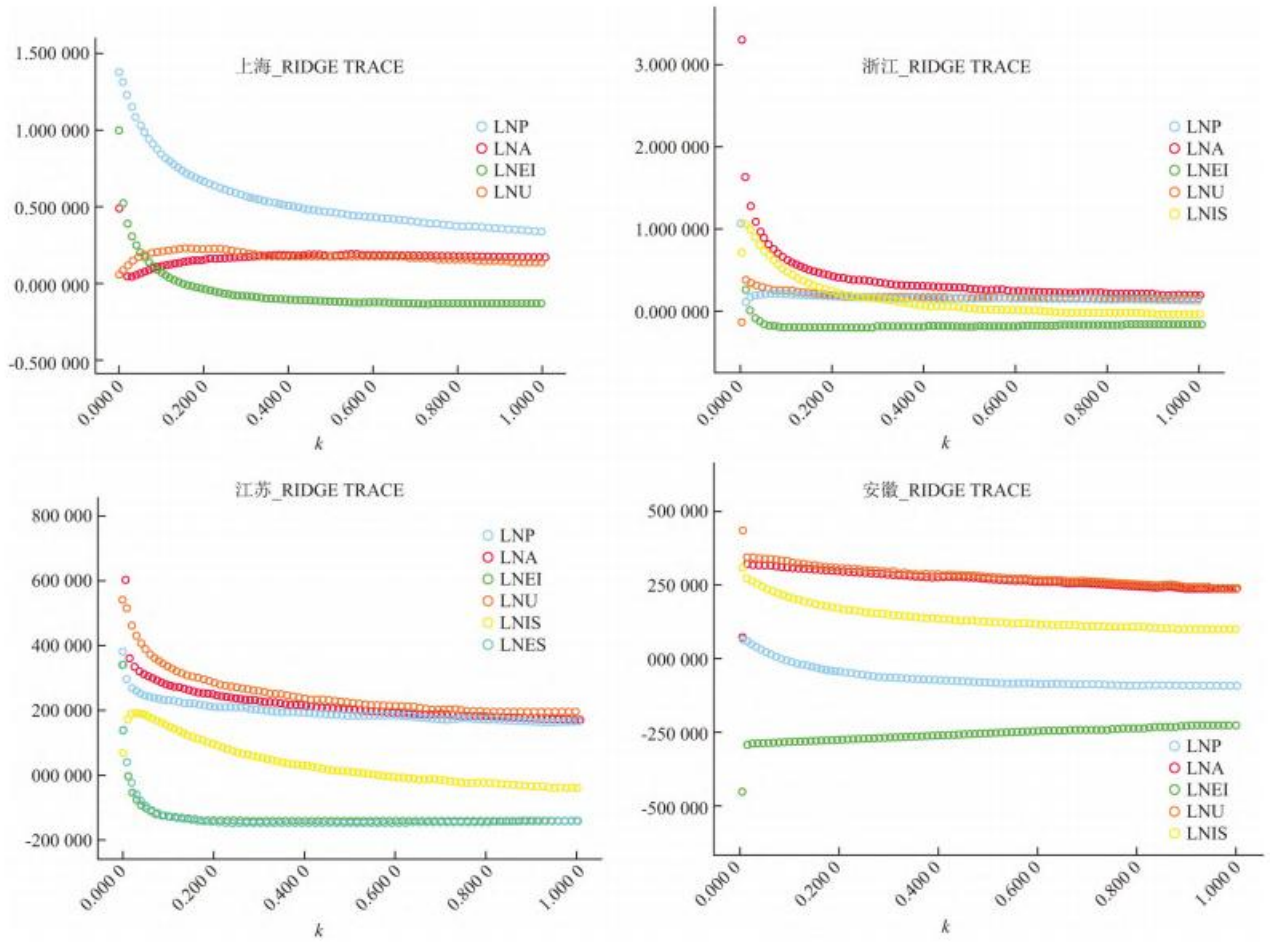


图 3 长三角地区三省一市岭迹图

Fig. 3 Ridge trace map of three provinces and one city in Yangtze River Delta

表 2 岭回归估计结果

地区		lnP	lnA	lnEI	lnU	lnES	lnIS	常量
上海	B	0.414 9	0.048 4	-0.030 7	1.970 2			6.034 7
	SE(B)	0.065 8	0.014 1	0.015 9	0.977 0			0.523 3
	Beta. std	0.505 8	0.175 4	-0.111 3	0.196 0			0.000 0
	t	6.309 6	3.437 3	-1.935 4	2.016 5			12.048 9
	Sig.	0.000 0	0.006 3	0.081 7	0.071 3			0.000 0
浙江	B	0.325 2	0.257 0	-0.107 4	0.417 2		0.728 4	5.574 0
	SE(B)	0.090 6	0.050 7	0.051 2	0.193 5		0.256 2	0.824 5

	Beta. std	0.215 4	0.641 7	-0.179 2	0.260 1		0.498 0	0.000 0
	t	3.588 1	5.066 7	-2.096 6	2.156 2		2.843 2	6.760 1
	Sig.	0.005 8	0.000 6	0.065 4	0.059 4		0.019 2	0.000 0
江苏	B	1.253 5	0.142 7	-0.128 2	0.569 9	0.365 9	-0.361 3	-1.636 9
	SE(B)	0.146 4	0.014 5	0.018 5	0.062 2	0.191 4	0.062 0	1.307 5
	Beta. std	0.214 5	0.248 9	-0.135 5	0.285 7	0.096 3	-0.141 9	0.000 0
	t	8.560 5	9.810 3	-6.933 0	9.159 8	1.911 0	-5.827 5	-1.251 9
	Sig.	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.000 0	0.092	0.000 4	0.000 0
安徽	B	-1.733 1	0.192 1	-0.371 1	0.645 0		0.569 0	24.353 1
	SE(B)	0.938 0	0.007 9	0.018 0	0.029 0		0.112 8	8.142 8
	Beta. std	-0.058 4	0.288 3	-0.269 4	0.298 0		0.154 9	0.000 0
	t	-1.847 6	24.319 0	-20.614 9	22.391 3		5.043 7	2.990 7
	Sig.	0.097 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0		0.000 6	0.015 1

注：上海(F=10.778, sig=0.000)；浙江(F= 10.273, sig= 0.000)；江苏(F=62.723, sig=0.000)；安徽(F=134.062, sig=0.000)。

上海(i=1)、浙江(i=2)、江苏(i=3)、安徽(i=4)对应的岭回归方程为：

$$\ln I_1 = 6.0374 + 0.4149 \ln P_1 + 0.0484 \ln A_1 - 0.0307 \ln EI_1 + 1.9702 \ln U_1 \quad (8)$$

$$\ln I_2 = 5.574 + 0.3252 \ln P_2 + 0.257 \ln A_2 - 0.1074 \ln EI_2 + 0.4172 \ln U_2 + 0.7284 \ln IS_2 \quad (9)$$

$$\ln I_3 = -1.6369 + 1.2535 \ln P_3 + 0.1427 \ln A_3 - 0.1282 \ln EI_3 + 0.5699 \ln U_3 + 0.3659 \ln ES_3 - 0.3613 \ln IS_3 \quad (10)$$

$$\ln I_4 = 24.3531 - 1.7331 \ln P_4 + 0.1921 \ln A_4 - 0.3711 \ln EI_4 + 0.6450 \ln U_4 + 0.5690 \ln IS_4 \quad (11)$$

从变量系数来看，人口规模、人均GDP、城镇化率与上海市碳排放成正相关，能源强度的提高会导致上海市碳排放减少。浙江省的碳排放量与人口、城镇化率、人均GDP、第二产业占比之间表现为正向关系，但与能源强度是负向关系。除人口、人均

GDP、城市化率的提高会促进江苏省能源消费碳排放外，第二产业占比、能源结构的增大也会导致碳排放量的增加，而能源强度与江苏省的碳排放呈负相关。安徽省的碳排放量与人均 GDP、城镇化率、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。

比较长三角地区各省市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各不相同。其中，人口因素对江苏能源消耗碳排放的影响远大于其他三个省市，城镇化率对上海碳排放量的影响最大；人均 GDP 对长三角三省一市碳排放的影响程度接近，对浙江的影响程度稍显著于上海、江苏和安徽。不同于其他省市，人口因素与安徽碳排放之间为负向关系，其原因是：在 2005～2019 年间，安徽省碳排放呈增长态势，但其人口规模却表现为波动状态，从 2005 年的 6 120 万人回落到 2019 年的 6 092 万人，这与宋晓晖等[35]的研究结果相似；能源强度对长三角各省市的碳排放均为负向影响，能源结构仅对江苏碳排放影响显著；随着第二产业所占比重的增加，江苏的碳排放量减少，而浙江、安徽碳排放却有所增加。

江苏省人口规模的系数为 1.253 5, 对碳排放量的影响最为显著，是江苏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的人口增长迅速。人类的生产生活活动，都会消耗能源从而导致碳氧化物排放，人口数量的高速攀升必然导致二氧化碳总量的增加。

城镇化率对上海市的碳排放量影响最大，其系数为 1.970 2。上海市城市化水平在中国最高，因此严格控制外来人口数量，放缓城镇化进程，城镇化水平对碳排放的驱动作用会逐渐减弱。

人均 GDP 水平对长三角地区各省市碳排放量存在一定影响，但不如城市化水平和人口规模两个因素显著。人均 GDP 增长使得人均收入提高，生活质量也不断改善，消费能力逐步增强。但个人消费产品也包括低碳环保产品，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。

能源强度与三省一市的碳排放量均呈负相关关系，变量系数分别为 -0.030 7、-0.107 4、-0.128 2、-0.371 1。2005～2019 年能源强度提高导致各省市碳排放减少，但其对碳排放的负向影响总体较低。

能源结构与江苏省的碳排放呈正相关关系。相比风能、太阳能等清洁能源，煤类排放更多的二氧化碳；随着煤类等化石能源占总能源比例的增加，意味着使用同等单位的能源将会排放更多的二氧化碳。

第二产业比重在江苏省对碳排放具有负向影响。其原因可能在于江苏的第二产业发展创新应用了更多清洁能源技术，采用清洁能源技术的降碳效应大于产业发展带来的碳排放增量，因此在江苏省第二产业比重与碳排放量呈负相关。

4 长三角地区碳排放峰值预测

采用模型 (8) (9) (10) (11), 对模型变量进行基准情景设置，预测长三角地区三省一市 2020～2035 年能源消费碳排放，试图探求各省市碳达峰年份及对应排放量。

4.1 情景设置

为探究长三角地区“碳达峰”前景，基于长三角三省一市碳排放驱动因素历史数据的变化趋势和相关“十四五”规划，在基准情景下对 2020～2035 年长三角各省市的影响要素分别设定变化率，并以 5 年为周期进行适当调整(见表 3)。在情景设定时，综合考虑了长三角地区各省市经济发展现状、新冠肺炎疫情冲击等对各因素变化的影响^[36]，具体设置依据如下：

表 3 模型变量基准情景设定

	年份	上海	浙江	江苏	安徽
P (%)	2020~2025	0.23	1.53	0.39	0.36
	2026~2030	0.14	0.64	0.24	0.31
	2031~2035	-0.10	-0.50	-0.20	0.28
U (%)	2020~2025	0.48	1.30	1.00	1.70
	2026~2030	0.36	0.80	0.80	1.49
	2031~2035	0.27	0.50	0.60	1.31
A (%)	2020~2025	3.90	3.90	5.00	5.60
	2026~2030	2.90	2.90	4.00	4.50
	2031~2035	1.90	1.90	3.00	3.90
EI (%)	2020~2025	-1.05	-1.46	-4.00	-3.76
	2026~2030	-0.87	-1.26	-3.85	-3.60
	2031~2035	-0.46	-1.06	-3.70	-3.52
ES (%)	2020~2025	-	-	-0.90	-
	2026~2030	-	-	-0.94	-
	2031~2035	-	-	-1.00	-
IS (%)	2020~2025	-	-1.70	-1.60	-2.10

	2026~2030	-	-2.10	-2.20	-2.60
	2031~2035	-	-2.50	-2.70	-3.10

人口规模(P):“十三五”规划期间,上海、浙江、江苏、安徽的平均人口自然增长率为0.19%、1.34%、0.35%、0.32%;此外,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长三角地区各省市的实际情况,本文设定2020~2025年上海、浙江、江苏、安徽的平均人口自然增长率为0.23%、1.53%、0.39%、0.36%,2026~2030年为0.14%、0.64%、0.24%、0.31%,2031~2035年为-0.10%、-0.50%、-0.20%、0.28%。

城镇化率(U):2020年上海、浙江、江苏、安徽常住人口城镇化率分别达到了89.3%、73%、74%、59.4%,根据三省一市的“十四五”规划,2021~2025年上海、浙江、江苏、安徽的城镇化率目标为90%、75%、75%、62%。基准情景中,2035年设定各省市城市化率将达到90%、80%、80%、70%,以此为基础反推计算出长三角地区各省市2020~2035年各阶段城市化率的增长速度。

人均GDP(A):考虑疫情对经济活动造成一定程度的影响^[37],综合中国经济结构实际情况,基准情景下2020~2025年上海、浙江、江苏、安徽的人均GDP增长率设置为3.9%、3.9%、5.0%、5.6%。假定经济发展与人均GDP增速呈反向变动关系,设定2026~2030年人均GDP增长率依次为2.9%、2.9%、4.0%、4.5%;2031~2035年依次为1.9%、1.9%、3.0%、3.9%。

能源强度(EI):国家“十四五”规划中明确了“单位国内生产总值能源消耗和碳排放值各自下降13.50%、18.00%”的目标;《浙江省节能降耗和能源资源优化配置“十四五”规划》中要求2020~2035年单位GDP能耗从0.41降至0.35t标准煤/万元;《江苏省“十四五”全社会节能的实施意见》把2025年全省单位地区GDP比2020年下降14%作为目标。基于此,本文将2020~2025年上海、浙江、江苏、安徽的能源强度变化率设定为-1.05%、-1.46%、-4.00%、-3.76%,之后在此基础上逐步放缓。

能源结构(ES):根据《中国统计年鉴》(2021)可知,2020年中国煤炭消费占比下降至54%。江苏作为能源消耗和碳排放大省,是全国碳减排的重点区域和潜力地区。因此,设定基准情境中能源结构(ES)值在2025、2035年分别为45%、40%。

产业结构(IS):产业结构升级促进经济增长,浙江、江苏、安徽2016~2020年的第二产业增加值的GDP贡献值占比年均下降率为1.2%、1.1%、1.6%,而且三省的产业结构值呈下降趋势。因此设定基准情景下,浙江、江苏、安徽2020~2025年第二产业占比年均下降1.7%、1.6%、2.1%;2026~2030年第二产业占比年均减少2.1%、2.2%、2.6%;2031~2035年第二产业占比年均减少2.5%、2.7%、3.1%。

4.2 碳排放及碳达峰预测

基于基准情景设定,应用模型(8)、(9)、(10)、(11)分别对上海、浙江、江苏、安徽2020~2035年的碳排放量进行预测,结果如图4所示。

从图4可知,在基准情景中,上海、浙江、安徽和江苏的碳排放量分别于2026、2027、2028和2031年达峰,峰值依次为20768、40855、63533和94973万t。

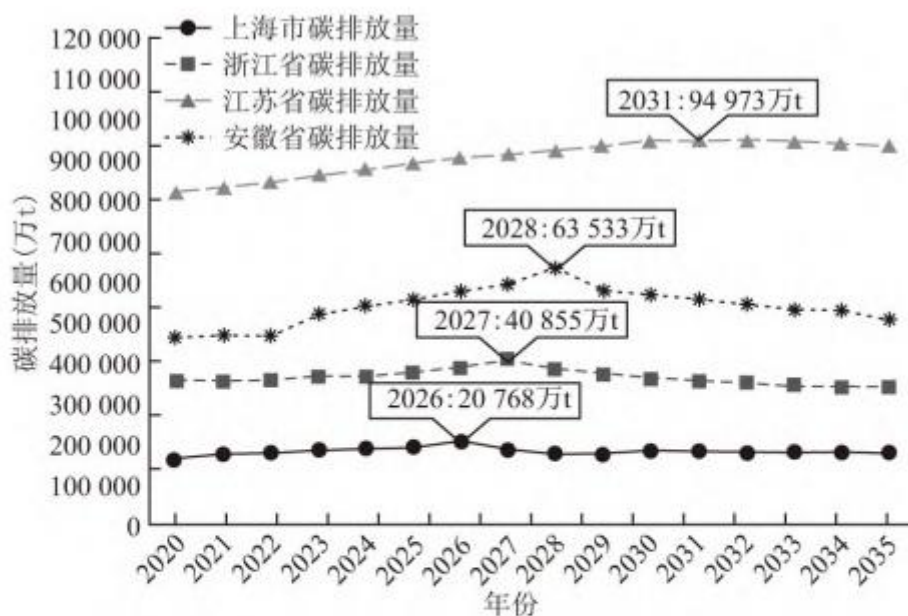


图4 基准情景下长三角地区各省市碳排放量峰值预测(万t)

Fig. 4 Prediction of peak carbon emissions in YRD region under baseline scenario (ten thousand tons)

由于本文碳排放预测模型参数是基于历史数据拟合得到,当选取历史数据发生变化以及各驱动因素变化率设置不同时,均会对碳排放预测结果产生一定影响。因此,本文参考王利兵等^[38]的研究思路,着重讨论各省市碳排放驱动因素预测数据在基准情景参数设定基础上波动 $\pm 3\%$ 时,对本文碳达峰预测工作带来的不确定性。考虑各变量扰动后,基准情景下,上海市碳达峰时间为2024~2028年,峰值为18 172~22 519万t;浙江省碳达峰时间为2025~2029年,峰值为37 712~43 997万t;安徽省碳达峰时间为2027~2030年,峰值为58 450~67 095万t;江苏省碳达峰时间为2030~2033年,峰值为89 037~97 254万t。

5 结论与建议

5.1 主要结论

本文定量测度了长三角地区三省一市的碳排放差异,运用STIRPAT模型分析上海、浙江、江苏和安徽的碳排放影响机理,并通过情景分析预测三省一市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,长三角地区三省一市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,人口数量、人均GDP、城镇化水平、能源强度对三省一市碳排放均有显著影响;能源结构只对江苏碳排放有显著影响;除上海外,产业结构对浙江、江苏、安徽碳排放具有显著影响。

(3)在基准情景下,上海、浙江、安徽和江苏分别在 2026、2027、2028 和 2031 年实现碳达峰,峰值依次为 20 768、40 855、63 533 和 94 973 万 t。

5.2 政策建议

为促进长三角地区三省一市的碳达峰目标尽早实现,结合长三角地区碳排放特征,建议因地制宜制定各省市的绿色低碳发展策略。

上海市城镇化率已于 2018 年位居全国第一,快速的城镇化带来了大量的碳排放。因此,上海市应推进高质量的绿色城镇化。人均 GDP 仍是上海市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。

浙江省应抢占绿色低碳科技创新制高点,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,兼顾经济增长与碳减排。

安徽省应持续践行绿色发展理念,稳步推进新型低碳城镇化进程;改善能源结构,增大可再生能源占比,提高能源清洁高效利用率;支持各行业绿色发展,推进行业绿色转型。

江苏省要在 2030 年达成碳达峰目标,高速的城镇化进程加速了江苏省人口规模的扩大,由此引发的碳排放等环境问题不容忽视。江苏省应秉持经济发展与环境治理“两手都要抓、两手都要硬”的管理理念,把提高碳排放效率作为碳减排工作的重点。因此,政府应帮助居民提升环保意识、引导居民形成低碳消费行为方式,促进碳减排;同时,政府应加强绿色交通体系等的公共服务设施供给,提升碳排放效率。

参考文献

- [1] 苏泳娴,陈修治,叶玉瑶,等.基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J].地理学报,2013,68(11):1513-1526.SU Y X,CHEN X Z,YE Y Y,et al.The characteristics and mechanisms of carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries[J].Acta Geographica Sinica,2013,68(11):1513-1526.
- [2] 莫建雷,段宏波,范英,等.《巴黎协定》中我国能源和气候政策目标:综合评估与政策选择[J].经济研究,2018,53(9):168-181.MO J L,DUAN H B,FAN Y,et al.China's energy and climate targets in the Paris agreement:Integrated assessment and policy options[J].Economic Research Journal,2018,53(9):168-181.
- [3] LI J,HUANG X,CHUAI X,et al.The impact of land urbanization on carbon dioxide emissions in the Yangtze River Delta,China:A multiscale perspective[J].Cities,2021,116:103275.
- [4] 余倩楠,贾文晓,潘晨,等.长三角地区城市形态对区域碳排放影响的时空分异研究[J].中国人口·资源与环境,2015,25(11):44-51.SHE Q N,JIA W X,PAN C,et al.Spatial and temporal variation characteristics of urban forms' impact on regional carbon emissions in the Yangtze River Delta[J].China Population,Resources and Environment,2015,25(11):44-51.
- [5] 舒心,夏楚瑜,李艳,等.长三角城市群碳排放与城市用地增长及形态的关系[J].生态学报,2018,38(17):6302-6313.SHU X,XIA C Y,LI Y,et al.Relationships between carbon emission,urban growth,and urban forms of urban agglomeration in the Yangtze River Delta[J].Acta Ecologica Sinica,2018,38(17):6302-6313.

-
- [6] ZHONG B, WANG J, FAN C, et al. Measuring industrial CO₂ emission efficiency in the Yangtze River Delta, China: A parametric distance function approach[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 394:052079.
- [7] 陈江龙, 李平星, 高金龙. 1990-2014 年泛长三角地区能源利用碳排放时空格局及影响因素[J]. 地理科学进展, 2016, 35(12):1472-1482. CHEN J L, LI P X, GAO J L. Spatiotemporal patterns and influencing factors of carbon emissions in the Pan-Yangtze River Delta region, 1990-2014[J]. Progress in Geography, 2016, 35(12):1472-1482.
- [8] WANG Z, ZHAO Z, WANG C. Random forest analysis of factors affecting urban carbon emissions in cities within the Yangtze River Economic Belt[J]. PLoS One, 2021, 16(6):e0252337.
- [9] YU X, WU Z, ZHENG H, et al. How urban agglomeration improve the emission efficiency? A spatial econometric analysis of the Yangtze River Delta urban agglomeration in China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 260:110061.
- [10] MA M, ROZEMA J, GIANOLI A, et al. The impacts of city size and density on CO₂ emissions: Evidence from the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Applied Spatial Analysis and Policy, 2022, 15(2):529-555.
- [11] WANG F, FAN W, CHEN C, et al. The dynamic time-varying effects of financial development, urbanization on carbon emissions in the Yangtze River Delta, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(14):14226-14237.
- [12] WU S, ZHANG K. Influence of urbanization and foreign direct investment on carbon emission efficiency: Evidence from urban clusters in the Yangtze River economic belt[J]. Sustainability, 2021, 13(5):2722.
- [13] ZHOU C, WANG S, WANG J. Examining the influences of urbanization on carbon dioxide emissions in the Yangtze River Delta, China: Kuznets curve relationship[J]. Science of the Total Environment, 2019, 675:472-482.
- [14] SHAO S, CHEN Y, LI K, et al. Market segmentation and urban CO₂ emissions in China: Evidence from the Yangtze River Delta region[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 248:109324.
- [15] 饶群. 长三角地区能源消费碳排放分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(5):189-192. RAO Q. Analysis of carbon emissions from energy consumption in Yangtze River Delta region[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(5):189-192.
- [16] MENG H, HUANG X, YANG H, et al. The influence of local officials' promotion incentives on carbon emission in Yangtze River Delta, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213:1337-1345.
- [17] 龚利, 屠红洲, 龚存. 基于 STIRPAT 模型的能源消费碳排放的影响因素研究——以长三角地区为例[J]. 工业技术经济, 2018, 37(8):95-102. GONG L, TU H Z, GONG C. Study on the influencing factors of carbon emissions from energy consumption based on STIRPAT model: The case of Yangtze River Delta region[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2018, 37(8):95-102.
- [18] 丁胜, 温作民. 长三角地区碳排放影响因素分析——基于 IPAT 改进模型[J]. 技术经济与管理研究, 2014(9):106-109. DING S, WEN Z M. Study on influential factors of carbon emissions in Yangtze River Delta: Based on IPAT improved model[J]. Technoeconomics & Management Research, 2014(9):106-109.

-
- [19] 翟石艳, 王铮. 基于 ARDL 模型长三角碳排放、能源消费和经济增长关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(1):94-103. ZHAI S Y, WANG Z. Modeling relationship among carbon emission, energy consumption and economic growth by ardl in the Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(1):94-103.
- [20] 宋府霖, 韩传峰, 滕敏敏. 长三角地区能源消费碳排放驱动因素分析及优化策略[J]. 生态经济, 2022, 38(4):21-28. SONG F L, HAN C F, TENG M M. Analysis of driving factors and optimization strategies of energy consumption carbon emissions in the Yangtze River Delta[J]. Ecological Economy, 2022, 38(4):21-28.
- [21] ZHANG S, LI H, ZHANG Q, et al. Uncovering the impacts of industrial transformation on low-carbon development in the Yangtze River Delta[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 150:104442.
- [22] ZHANG C, CHEN P. Industrialization, urbanization, and carbon emission efficiency of Yangtze River Economic Belt-empirical analysis based on stochastic frontier model[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(47):66914-66929.
- [23] 张帆, 徐宁, 吴锋. 共享社会经济路径下中国 2020-2100 年碳排放预测研究[J]. 生态学报, 2021, 41(24):9691-9704. ZHANG F, XU N, WU F. Research on China's CO₂ emissions projections from 2020 to 2100 under the shared socioeconomic pathways[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24):9691-9704.
- [24] 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. WANG S J, MO H B, FANG C L. Carbon emissions dynamic simulation and its peak of cities in the Pearl River Delta Urban Agglomeration[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(7):670-684.
- [25] 唐德才, 刘昊, 汤杰新. 长三角地区能源消耗与碳排放的实证研究——基于系统动力学模型[J]. 华东经济管理, 2015, 29(9):63-68. TANG D C, LIU H, TANG J X. An empirical study on energy consumption and carbon emissions in Yangtze River Delta region:Based on a system dynamics model[J]. East China Economic Management, 2015, 29(9):63-68.
- [26] 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. YUE S J. Factor decomposition and scenario prediction of the carbon peak of the city clusters in the Yangtze River Delta[J]. Guizhou Social Sciences, 2021(9):115-124.
- [27] 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. TIAN Z, ZHANG H Y, NIU W J. Peak prediction and reduction strategy of carbon emission in Yangtze River economic zone[J]. Resources & Industries, 2021, 23(1):97-105.
- [28] YI T, QIU M, ZHANG Z, et al. Multi-perspective influence mechanism analysis and multi-scenario prediction of carbon emissions:A case of the Yangtze River Delta, China[J]. E3S Web of Conferences, 2019, 118:04014.
- [29] 王春春, 王远, 朱晓东. 基于长期能源替代规划模型的江苏省能源 CO₂ 排放达峰时间及峰值水平[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10):3535-3543. WANG C C, WANG Y, ZHU X D. Peak volume and time of energy-related CO₂ emissions in Jiangsu Province, China based on long-range energy alternatives planning system model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(10):3535-3543.

-
- [30] 王传磊. 浙江省碳排放强度的关键影响因素分析以及未来趋势预测[J]. 现代商贸工业, 2019, 40(8):16-17. WANG C L. Analysis of key influencing factors of carbon emission intensity in Zhejiang Province and prediction of its future trend[J]. Modern Business Trade Industry, 2019, 40(8):16-17.
- [31] 王勇, 许子易, 张亚新. 中国超大城市碳排放达峰的影响因素及组合情景预测——基于门限-STIRPAT 模型的研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12):4284-4292. WANG Y, XU Z Y, ZHANG Y X. Influencing factors and combined scenario prediction of carbon emission peaks in megacities in China:Based on Threshold-STIRPAT Model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(12):4284-4292.
- [32] 邱立新, 袁赛. 中国典型城市碳排放特征及峰值预测——基于“脱钩”分析与 EKC 假设的再验证[J]. 商业研究, 2018(7):50-58. QIU L X, YUAN S. Features of carbon emission and peak prediction in typical Chinese Cities:A revalidation based on “decoupling” and EKC hypothesis[J]. Commercial Research, 2018(7):50-58.
- [33] YORK R, ROSA E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and ImPACT:Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3):351-365.
- [34] 吴敬锐, 杨兆萍, 阿达衣·赛肯. 基于 STIRPAT 模型分析新疆能源足迹的影响因素[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1):187-193. WU J R, YANG Z P, ADAYI S. Impact factors and temporal variation of environmental pressure of Xinjiang based on STIRPAT model[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(1):187-193.
- [35] 宋晓晖, 张裕芬, 汪艺梅, 等. 基于 IPAT 扩展模型分析人口因素对碳排放的影响[J]. 环境科学研究, 2012, 25(1):109-115. SONG X H, ZHANG Y F, WANG Y M, et al. Analysis of impacts of demographic factors on carbon emissions based on the IPAT model[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(1):109-115.
- [36] 刘晴川, 李强, 郑旭煦. 基于化石能源消耗的重庆市二氧化碳排放峰值预测[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4):1582-1593. LIU Q C, LI Q, ZHENG X X. The prediction of carbon dioxide emissions in Chongqing based on fossil fuel combustion[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(4):1582-1593.
- [37] 胡方芳, 陈前利. 新疆碳排放峰值预测[J]. 区域治理, 2019(42):37-41. HU F F, CHEN Q L. Prediction of peak carbon emission in Xinjiang[J]. Regional Governance, 2019(42):37-41.
- [38] 王利兵, 张赞. 中国能源碳排放因素分解与情景预测[J]. 电力建设, 2021, 42(9):1-9. WANG L B, ZHANG Y. Factors decomposition and scenario prediction of energy-related CO₂ emissions in China[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9):1-9.