

# 长三角城市群多部门碳排放的时空特征、影响要素与空间规划响应研究\*

Temporal and Spatial Dynamic Characteristics, Influencing Factors and Corresponding Planning Strategies of Carbon Emissions by Sectors in the Yangtze River Delta

刘超 张洪博 黄雨嫣 LIU Chao, ZHANG Hongbo, HUANG Yuyan

**摘要** 从碳排放总量及工业、民用、交通、电力四部门排放量出发,可视化分析长三角城市群碳排放的时空特征,构建模型分析其影响要素,并从国土空间规划的视角提出响应策略。首先,对1990—2021年长三角碳排放进行时空数据可视化;其次,通过空间自相关分析碳排放空间协同性;再次,考虑国土空间规划分区,采用改进STIRPAT模型遴选出社会经济、建成环境方面对总量、地均碳排放的显著影响因子及其弹性系数;最后,提出针对长三角地区碳减排的空间规划策略。结果表明,碳排放以区域性中心城区为聚集,城市化水平、人口要素、人均财富等要素会促进区域碳排放。基于此,提出碳排放分区划定、低碳产业引导、用地分类与格局优化等空间响应策略。

**Abstract** In this paper, we visualize and analyze the spatial and temporal characteristics of carbon emissions in the Yangtze River Delta urban agglomeration from the perspective of total carbon emissions and emissions from the industrial, civil, transportation, and electric power sectors, construct a model to analyze influencing factors, and propose a response strategy from the perspective of territorial spatial planning. Firstly, the spatial and temporal data of carbon emissions in the Yangtze River Delta from 1990 to 2021 are visualized. Secondly, the spatial pattern of carbon emissions is analyzed through spatial autocorrelation. Thirdly, taking into consideration of national spatial planning zones, the improved STIRPAT model is used to select the factors and their elasticity coefficients of the socioeconomic and built-environmental factors that have significant impacts on the total amount of carbon emissions and the average per capita carbon emissions. Finally, spatial planning strategies for reducing carbon emissions in the Yangtze River Delta region are proposed. The results show that carbon emissions are clustered in the regional central city, and urbanization level, population factor, per capita wealth, and other factors contribute to regional carbon emissions. Based on this, spatial response strategies are proposed, including delineation of carbon emission zoning, guidance of low-carbon industries, and optimization of land use classification and pattern.

**关键词** 碳排放;STIRPAT模型;国土空间规划;时空特征;长三角

**Key words** carbon emission; STIRPAT Model; territorial spatial planning; temporal and spatial dynamic characteristics; Yangtze River Delta

文章编号 1673-8985 (2024) 04-0040-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20240406

## 作者简介

刘超

同济大学建筑与城市规划学院 助理教授,博士  
自然资源部国土空间智能规划技术重点实验室  
研究员, liuchao1020@tongji.edu.cn

张洪博

同济大学建筑与城市规划学院 硕士研究生

黄雨嫣

同济大学建筑与城市规划学院 硕士研究生

## 0 引言

在“碳达峰、碳中和”(以下简称“双碳”)目标下,区域与城市的碳排放成为重要议题。长三角地区碳排放总量大且密集,作为全国经济发展的先行地区,其在双碳实施路径中已制定了相关政策与实施办法。《上海市碳达峰实

施方案》确定上海市于2030年前实现碳达峰,并以此制定“碳达峰十大行动”<sup>[1]</sup>;2021年,浙江省率先颁布的《浙江省碳达峰碳中和科技创新行动方案》为我国首个省级双碳行动方案,此后江苏省、安徽省也于2022年分别印发《碳达峰实施方案》。基于长三角三省一市

\*基金项目:中国青年自然科学基金项目“基于人工智能的城市PM<sub>2.5</sub>时空格局、影响机制与规划响应研究”(编号52108060);上海市科技支撑双碳专项“面向区域碳中和的超大城市规划设计关键技术”(编号22DZ1207800);上海市启明星人才项目“长三角城市群CO<sub>2</sub>与PM<sub>2.5</sub>协同减排下的空间规划技术研究”(编号22QB1404900)资助。

碳排放的行动与长三角一体化的发展目标,分析长三角地区的碳排放的时空特征,聚焦影响碳排放的具体因素,从而落实碳减排的各项行动与目标,可以对区域一体化乃至全国的双碳目标实施提供借鉴。

碳排放的时空特征有助于识别碳排放的时空变化趋势与高低值范围,对于展示城市群内部的分异规律有着重要作用。目前时空碳排放数据来源主要有基于温室气体清单指南的估算法<sup>[2]</sup>、环境监测站或手持二氧化碳监测仪器<sup>[3]</sup>、涡度相关技术<sup>[4]</sup>和卫星监测技术<sup>[5]</sup>等。此外,城市碳排放时空特征通常是计算总量,鲜有研究区分各个碳排放部门,而长三角地区在全国工业发展较快、人均生活水平较高、电力转移较多的现状则为分部门研究提供了必要性。

在区域层面,国内外学者从城市群<sup>[6-7]</sup>、市域<sup>[8]</sup>、县域<sup>[9]</sup>等尺度研究碳减排与空间规划的关系。在城市群的层面,空间规划更加侧重城市群内部城市之间如何协同实现公平与效率兼顾的发展<sup>[7]</sup>,而双碳目标应更加注重各层级、各类规划的衔接与支撑,全面提升城市群的综合减碳效能。学者研究表明,空间规划方面对碳排放的影响要素主要包括城市空间形态<sup>[10]</sup>、土地利用<sup>[11]</sup>、人口密度<sup>[12]</sup>、建成环境<sup>[13]</sup>等。这些要素在城市群内部同样具有差异性,所以需要城市群内部差异化的地区发展开展针对性研究。龚利等<sup>[14]</sup>采用STIRPAT模型,分析能源消费碳排放量与人口、人均GDP、外商直接投资等影响因素之间的关系,并将投入—产出模型融入其中技术层面的影响因素。在空间方面, Li等<sup>[15]</sup>采用极限梯度提升和多尺度地理加权回归模型,研究了城市的社会经济和城市形态驱动因素对二氧化碳排放的不同重要性、空间多尺度变异和空间异质性,从时空尺度分析碳排放的影响因素。这些模型对于明确城市群低碳规划中各个要素的重要性,并进行科学调控起到重要的支撑作用。

作为引领性的结构调整式的减排途径,空间规划具有不可替代的碳约束作用,是达成区域长远碳约束目标的系统性、根本性途径<sup>[16]</sup>,因而识别影响因素并引导各部门减碳,

能够响应低碳空间规划要求,并为落实“双碳”目标做出努力。总的来说,区域城市群的碳排放研究集中于总量与城市群内区域尺度的研究,在分部门、分产业研究方面存在空缺;在空间规划引导方面,也缺乏基于地域、产业部门的策略。

因此,本文从长三角区域双碳目标下空间规划的需求出发,依托中国多尺度排放清单模型MEIC数据及统计年鉴数据,利用GIS空间数据与面板数据分析1990—2021年长三角区域碳排放的时空特征及其空间变化热点,进而通过改进STIRPAT模型回归分析长三角碳排放时空变化的影响因素,最终以空间规划的策略形式响应以引导长三角的一体化融合与空间低碳发展。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区域概况

长三角地区包含江苏省、浙江省、安徽省与上海市4个省级行政单位,为我国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一<sup>[17]</sup>。2023年,长三角地区以全国3.74%的国土面积和16.00%的人口,创造了全国24.2%的经济总量,地区生产总值之和约为30.5万亿元。

### 1.2 数据来源

各部门碳排放数据依托中国多尺度排放清单模型MEIC,其中包括1990—2021年的省级排放数据,以及利用ArcGIS软件构建的分辨率0.25°经纬度的2011—2020年MEIC排放数据。MEIC是基于自下而上技术方法构建的排放清单模型框架,模型涵盖了固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源和废弃物处理源等6大类人为排放源<sup>[18]</sup>。

空间信息均基于全国县级行政区,筛选其中属于长三角的区域。在改进STIRPAT研究模型中的其他数据中,路网信息来源于OpenStreetMap公开数据集,土地利用采用当年源自 Landsat 的年度中国土地覆盖数据集 (CLCD) <sup>[19]</sup>,各个县市社会经济主要指标来源于当地的统计年鉴与政府公报。由于多

元数据的统计年限不一, STIRPAT分析采用2017年数据。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 时空碳排放计算与可视化方法

对经过预处理的长三角二氧化碳分部门排放栅格数据进行投影处理,叠加长三角县级行政边界数据,计算得出各行政单位分部门排放情况;并采用柱状图与折线图等方式,直观呈现长三角部门碳排放随时空变化的规律。

### 1.3.2 区域碳排放空间特征分析方法

在空间上,要成为具有显著统计学意义的热点,要素应具有高值,且被其他同样具有高值的要素包围<sup>[20]</sup>。基于此,本文主要采用全局莫兰指数 (Moran's I) 量化长三角地区排放空间自相关,并绘制基于高低值聚类与z-score分析的冷热点图,反映长三角地区各部门碳排放协同性。全局空间自相关描述的是研究区域内测算单元属性与周围测算单元内空间要素的依赖程度,采用Moran's I指数来判断区域内要素整体性的聚散程度<sup>[21]</sup>。局部空间自相关用于分析空间某要素与相邻要素的相关程度。表征其在内部空间及邻域范围内的聚集状态<sup>[22]</sup>,为后期碳排放管控区进行划分。

### 1.3.3 影响要素分析的STIRPAT模型

为探究影响环境要素的更多影响因子, Dietz和Rosa在IPAT模型的基础上发展出STIRPAT模型<sup>[23]</sup>,该模型是IPAT模型的扩展形式。在总量STIRPAT模型的基础上,基于高质量发展的需求进行了地均模型分析。

现有文献研究表明,二氧化碳排放量是由多种因素共同作用决定的<sup>[24-29]</sup>。针对研究地区的具体情况,本文改进STIRPAT模型,添加了建成环境因素与社会经济因素,用以探究城市碳排放格局的影响因子。本文的被解释变量为二氧化碳四部门 (工业、电力、交通、民用) 地均和总量的排放格局,解释变量在STIRPAT模型变量的基础上根据需要改进,引入多个与建成环境、国土空间规划相关的影响因素。这些因素分为社会经济因素与建成环境因素。

①人口规模 (P)。人口规模是影响碳排放量的一个重要因素。通常情况下,人口的增长会导致碳排放量的增加,特别是在人口超过环境承载能力时,可能会对生态环境造成破坏,进而增加碳排放。由于数据可得性的限制,本文选择户籍人口作为衡量人口规模的数据源。

②人均财富 (A)。人均GDP常被用作衡量人均财富增长的指标。在长三角地区,由于处于工业化中期阶段,产业转移和产业转入并存,人均财富的变化对碳排放有着重要影响。

③技术水平 (T)。技术的不断进步可以提高能源利用的效率,进而降低单位能源的碳排放量。单位能耗碳排放量受多种因素影响,包括碳排放系数、能源利用效率,以及碳捕获技术等。

④产业结构 (I)。不同产业部门对资源的消耗模式各不相同,因此地区三次产业结构的差异会导致碳排放量的不同。特别是第二产业,在三次产业中碳排放占比最大,其占比越高,碳排放量也相应越高。

⑤交通与土地 (R)。交通领域的碳排放占总碳排放量的相当比例,为10%—20%之间。考虑到轨道交通与飞机的碳排放具有区域性,且在县域层面难以准确量化,因此我们选择县域路网密度作为量化交通碳排放的指标。

⑥农业空间 (A)。这包括耕地、园地等各类农业用地面积。虽然农业空间是国土空间规划中重点保护的用地类型,但耕作过程中也会产生碳排放,尽管农作物在一定程度上能吸收碳排放。

⑦生态空间 (G)。生态空间包括林地、灌木地、草地和水体等面积。这些绿地和水体是重要的碳汇集地,具有固碳作用。大面积的绿地和水体可以有效地吸收碳排放。

⑧城镇空间 (U)。这里指的是建设用地面积。随着城市化水平的提升,更多的能源被用于生产和生活,这也会对碳排放产生影响。

综上所述,本文改进STIRPAT模型的碳排放影响因素回归分析公式为:

$$Y_i = a \cdot P^{b_1} \cdot A^{b_2} \cdot T^{b_3} \cdot I^{b_4} \cdot L^{b_5} \cdot R^{b_6} \cdot G^{b_7} \cdot U^{b_8} \cdot \varepsilon \quad (1)$$

通常写作对数形式,为:

$$\ln Y_i = a + b_1 \cdot \ln P + b_2 \cdot \ln A + b_3 \cdot \ln T + b_4 \cdot \ln I + b_5 \cdot \ln L + b_6 \cdot \ln R + b_7 \cdot \ln G + b_8 \cdot \ln U + \varepsilon \quad (2)$$

式中:Y<sub>i</sub>为二氧化碳四部门(工业、电力、交通、民用)总量或地均的排放量;P、A、T、I、L、U、G、R为各类社会经济因素、建成环境因素的影响因子(见表1);a为常数项,b<sub>1</sub>、b<sub>2</sub>、b<sub>3</sub>……b<sub>8</sub>是待测参数,ε为随机误差。由于县域面积大小不一,而县域面积对于碳排放量影响较大,部分指标采用地均指标。

表1展示了列入方程的可能影响碳排放总量的因素及可能影响地均碳排放量的因素,包含社会经济因素及建成环境因素两大类。

## 2 长三角城市群部门碳排放的时空特征

### 2.1 总量与部门碳排放空间分布

2020年,长三角地区上海市、江苏省、安徽省、浙江省碳排放量分别为15 000万t、7 000万t、38 000万t、36 000万t,占全国碳排放总量的百分比分别为1.49%、6.97%、3.78%、3.59%,2021年长三角各省(直辖市)各部门碳排放量及2020年长三角地区各省市碳排放量分别如图1和表2所示。

长江以北地区的民用建筑碳排放显著高于以南地区,沿海地区碳排放量高于内陆地区,长三角地区生活能耗与碳排放总量呈现上升趋势,交通部门的碳排放空间特征与工业部门的情况非常相似。具体来说,工业部门上海市和苏州市在长三角地区工业碳排放最高,形成以上海苏州为中心向内陆周边递减的空间特征。在交通部门,上海市、苏州市、杭州市作为地区内部的交通枢纽城市碳排放最高。在电力部门,上海市、宁波市、镇江市电力碳排放最高。在电力部门碳排放存在由沿海向内陆递减的趋势。总结得出:(1)人口密集、经济发达的省会城市、交通枢纽城市碳排放量较高;(2)在民用建筑领域,长三角地区碳排放量北方显著高于南方;(3)除民用建筑领域外,碳排放量存在以上海为中心,从沿海向内陆递减的趋势(见表3)。

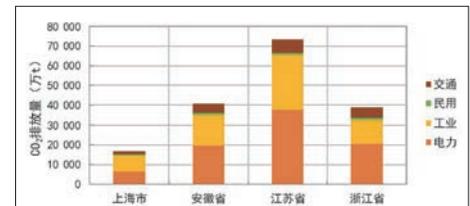


图1 2021年上海市、江苏省、浙江省、安徽省各部门碳排放量

Fig.1 Carbon emissions from sectors in the Yangtze River Delta region and in provinces in 2021

资料来源:笔者自绘。

表1 改进STIRPAT模型的自变量

Tab.1 Influencing factors of the adjusted STIRPAT Model

因素	总量排放方程			地均排放方程			数据来源
	因素	内容	单位	因素	内容	单位	
社会经济因素	人口规模 (P)	县级年末户籍人口	万人	人口密度 (PI)	县域总人口与面积的比值	人/m <sup>2</sup>	《中国县域统计年鉴》
	人均财富 (A)	人均GDP	元/人	人均财富 (A)	人均GDP	元/人	《中国县域统计年鉴》
	技术水平 (T)	每产出10元GDP消耗的标准煤吨数	t	技术水平 (T)	每产出10元GDP消耗的标准煤吨数	t	根据《中国县域统计年鉴》计算
	产业结构 (I)	工业增加值占GDP比例	%	产业结构 (I)	工业增加值占GDP比例	%	根据《中国县域统计年鉴》计算
建成环境因素	交通与土地 (L)	道路总长度	m	交通与土地 (LI)	道路总长度与行政区面积比值	/	www.openstreetmap.org
	农业空间 (R)	耕地等面积	m <sup>2</sup>	农业空间 (RI)	农业空间面积占行政区比例	%	根据CLCD数据集计算
	生态空间 (G)	林灌草、水体等面积	m <sup>2</sup>	生态空间 (GI)	生态空间面积占行政区比例	%	根据CLCD数据集计算
	城镇空间 (U)	建设用地面积	m <sup>2</sup>	城镇空间 (UI)	城镇面积占行政区比例	%	根据CLCD数据集计算

资料来源:《中国县域统计年鉴》、CLCD数据集、OpenStreetMap。

## 2.2 长三角部门碳排放变化趋势

在1990—2021年中国多尺度排放清单模型MEIC的中国碳排放数据<sup>[31-32]</sup>中,长三角地区的碳排放总量及各部门碳排放量总体呈上升趋势。20世纪90年代,江苏省的碳排放总量是其他三省市的近2倍,这主要归因于当时江苏省工业化进程的快速推进和能源消耗的大

幅增加。与此同时,上海市、江苏省、浙江省的碳排放总量与增长趋势均相近,这反映了当时长三角地区整体经济的快速发展和工业化水平的同步提升(见图2)。

进入21世纪以来,上海市的碳排放量相对较为稳定,这可能与上海市较早开始实施严格的环保政策和产业结构调整有关。浙江省和安徽省在前10年的碳排放增长幅度较大,这主要

受到两省工业化、城市化进程加速,以及能源消耗快速增长的影响。而江苏省则始终处于碳排放的快速增长中,可能是受江苏省持续的工业扩张影响。长三角民用碳排放量一直处于稳定低位并缓慢增长,30年内从29 043万t增长至40 733万t,增长了40%。这可能与居民生活水平的提高和能源使用方式的相对稳定有关。相比之下,长三角交通、工业、电力部门的碳排

表2 2020年长三角地区各省市碳排放总量  
Tab.2 Carbon emissions in the Yangtze River Delta region and in provinces and cities in 2020

省(直辖市)及其碳排放总量/万t	地级市	碳排放总量(按地级市)/万t
上海市/ 11 603.54	—	—
	南京市	8 268.84
	无锡市	7 099.18
	徐州市	6 556.06
	常州市	5 826.23
	苏州市	11 796.11
	南通市	5 678.97
	连云港市	1 741.63
	淮安市	1 853.15
	盐城市	3 084.15
江苏省/ 66 747.97	扬州市	3 811.12
	镇江市	6 659.65
	泰州市	3 054.14
	宿迁市	1 318.74
	杭州市	6 525.66
	宁波市	7 071.77
	温州市	3 054.95
	嘉兴市	2 653.25
	湖州市	2 849.53
	绍兴市	2 702.25
浙江省/ 33 978.90	金华市	3 027.64
	衢州市	2 195.37
	舟山市	707.38
	台州市	2 662.66
	丽水市	528.42
	合肥市	4 867.48
	芜湖市	3 934.57
	蚌埠市	1 429.34
	淮南市	5 011.19
	马鞍山市	2 842.33
安徽省/ 39 418.61	淮北市	2 983.85
	铜陵市	2 657.00
	安庆市	2 326.67
	黄山市	333.51
	滁州市	2 138.05
	阜阳市	1 852.71
	宿州市	1 956.27
	六安市	1 310.24
	亳州市	1 356.64
	池州市	2 017.38
宣城市	2 401.38	

资料来源:MEIC中国碳排放清单。

表3 2020年长三角地区各市交通、电力、民用、工业部门碳排放量  
Tab.3 Carbon emissions from transportation, electricity, civilian and industrial sectors in the Yangtze River Delta region and in cities in 2020

省/直辖市	市(地级市及直辖市)	交通/万t	电力/万t	民用/万t	工业/万t
上海市	上海市	1 251.64	3 546.46	643.44	6 161.99
	南京市	763.10	2 627.46	173.39	4 704.88
	无锡市	674.25	1 722.13	89.47	4 613.33
	徐州市	491.98	2 704.03	124.20	3 235.84
	常州市	372.98	1 357.16	43.03	4 053.05
	苏州市	1 143.92	3 556.44	166.04	6 929.72
	南通市	447.85	2 582.95	100.36	2 547.82
	连云港市	258.65	685.46	60.28	737.23
	淮安市	256.29	614.32	57.92	924.63
	盐城市	377.58	1 002.55	92.98	1 611.04
江苏省	扬州市	283.53	1 486.28	66.78	1 974.54
	镇江市	261.41	3 489.83	37.76	2 870.66
	泰州市	289.16	1 244.86	51.67	1 468.45
	宿迁市	305.38	225.43	57.90	730.03
	杭州市	927.14	927.32	377.23	4 293.97
	宁波市	674.92	4 288.64	278.82	1 829.39
	温州市	486.37	1 495.12	212.26	861.19
	嘉兴市	351.73	1 050.77	148.29	1 102.47
	湖州市	247.80	743.15	94.19	1 764.39
	绍兴市	469.11	408.23	143.47	1 681.43
浙江省	金华市	487.14	710.12	173.85	1 656.52
	衢州市	126.00	302.27	102.21	1 664.89
	舟山市	51.48	409.09	32.60	214.22
	台州市	305.00	1 454.69	264.24	638.73
	丽水市	169.24	22.12	112.23	224.83
	合肥市	572.08	1 078.75	246.39	2 970.26
	芜湖市	262.36	930.83	141.45	2 599.93
	蚌埠市	181.32	483.06	68.81	696.15
	淮南市	204.22	4 160.95	77.18	568.84
	马鞍山市	185.71	1 221.68	92.96	1 341.98
安徽省	淮北市	114.78	2 298.94	56.08	514.05
	铜陵市	98.94	1 088.38	40.33	1 429.35
	安庆市	213.30	1 015.19	135.82	962.36
	黄山市	100.22	2.26	27.97	203.05
	滁州市	335.94	453.64	96.74	1 251.72
	阜阳市	442.20	870.73	156.66	383.11
	宿州市	334.18	538.59	113.69	969.80
	六安市	304.73	483.67	90.23	431.61
	亳州市	402.09	555.52	111.39	287.64
	池州市	103.54	402.47	31.33	1 480.04
宣城市	215.78	860.56	49.69	1 275.35	

资料来源:MEIC中国碳排放清单。

放量分别增长了821%、381%、998%，这主要受到这些部门快速发展、能源消耗大幅增加和能源结构变化等多重因素的影响。

## 2.3 碳排放空间特征性分析

### 2.3.1 全局空间自相关分析

从近10年的全局空间自相关系数来看，长三角地区的二氧化碳排放格局的莫兰指数(Moran's I)均大于0，p值均小于0.01，检测结果显著，二氧化碳排放分布模式趋近于聚集模式。在经历了开始几年莫兰指数的缓慢下降后，近两年莫兰指数趋于稳定，表明近年来，长三角地区碳排放的集中程度有所降低，近两年聚集程度相对稳定(见图3)。

### 2.3.2 长三角碳排放局部空间自相关分析结果

以市县区为研究单位，在总量的角度上，高值聚集型(以下简称“HH型”：该区域及周边区域碳排放均较高)、低值聚集型(以下简称“LL型”：该区域及周边区域碳排放均较低)都是组团积聚型分布，其中，HH型分布于长江下游周边城市，例如上海、苏州、南通等，LL型主要位于浙江南部及安徽西部和南部的县市区。低值包含高值异常型(以下简称“HL型”：该区域碳排放较高，该区域周边地区碳排放较低)及高值包含低值异常型(以下简称“LH型”：该区域碳排放较低，该区域周边地区碳排放较高)零星分布，其中LH型主要零星分布于HH型周边地区，HL型相对较少(见图4)。

从部门角度，HH型主要以组团积聚式分布，在四部门中，电力、交通、工业部门的HH型主要位于上海市及周边苏州、无锡等地的市县中，且分布模式较为类似，民用部门的HH型的分布与其他部门有所不同。LL型同样以组团式积聚分布，主要分布于安徽南部与浙江南部的内陆城市。四部门中非显著型区域(以下简称“NN型”：没有明显的聚类特征)占据所有市县区的70%左右。LH型和HL型呈零星分布，且在四部门中均位于长三角的中部地区(见图5)。

基于空间自相关分析结果进行冷热点分

析，冷热点分析结果与局部空间自相关分析结果相似，四部门的热点区域同样呈现组团积聚式分布，其中热点区域与HH型高度重合。冷点区域同LH型和HL型类似，呈零星分布，主要分布于安徽南部与浙江西部的内陆城市。

## 3 基于STIRPAT的影响因子分析

### 3.1 模型回归分析

数据处理采用SPSS Statistics 24，对于选定的影响因素面板数据无量纲化，以消除不同类型数据大小对于回归分析的影响；由于各因子差距过大且有正负向因素，因而在模型之外还增加了一步无量纲化过程。本文回归拟合采用偏最小二乘法，可得碳排放驱动因子的弹性系数<sup>[33]</sup>。对长三角地区县域碳排放总量、地均碳排放量与碳排放影响因素进行多元回归分析采用SPSS的分析结果如表5所示。调整后总量 $R^2=0.676$ ，地均 $R^2=0.561$ ，也通过了1%在方差分析(ANOVA)中的显著性检验，解释变量之间多重共线性程度较低( $VIF < 10$ )。地均F值为31.720，总量F值为51.105。

### 3.2 关键影响要素识别

从回归结果来看，模型模拟的效果显著且与实际情况具有高度的一致性。就弹性系数而言，碳排放总量模型中6个影响要素起到增加的作用，1个作用不显著，1个起到减少作用，地均碳排放模型中除了产业结构作用不显著外，其他6个影响要素也与地均碳排放呈正相关。

通过偏最小二乘法回归拟合得到长三角地区县域碳排放总量与各变量的多元线性模型。就弹性系数而言，P、A、T、L、U、R这6项要素都会促进长三角地区县域碳排放总量增加，弹性系数为0.108—0.475；G要素减少长三角地区的碳排放总量。县级年末户籍人口、人均GDP、每10元GDP消耗的标准煤吨数、工业增加值占GDP比例、道路总长度、耕地面积、林灌草与水体面积、建设用地面积每增加1%，将引起长三角地区县域碳排放总量

变化0.177%、0.475%、0.108%、0.034%、0.201%、0.145%、0.203%、-0.084%。

## 4 总结与讨论

本文采用1990—2021年的中国多尺度碳排放清单模型MEIC的长三角三省一市四部门碳排放数据，重点分析2020年的碳排放空间分布和2017年建成环境、社会环境面板数据，可视化其时空分布特征，基于改进STIRPAT模型回归分析影响因素，并提出针对性的空间规

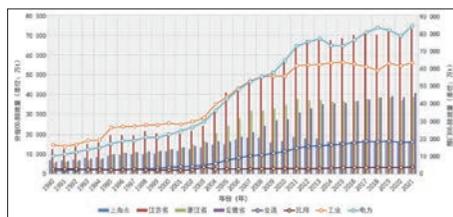


图2 1990—2021年上海市、江苏省、浙江省、安徽省各部门碳排放量

Fig.2 Carbon emissions from various sectors in Shanghai, Jiangsu Province, Zhejiang Province, and Anhui Province from 1990 to 2021

资料来源：笔者自绘。

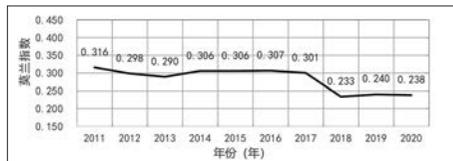


图3 2011—2020年空间自相关变化趋势

Fig.3 Spatial autocorrelation trend from 2011 to 2020

资料来源：笔者自绘。

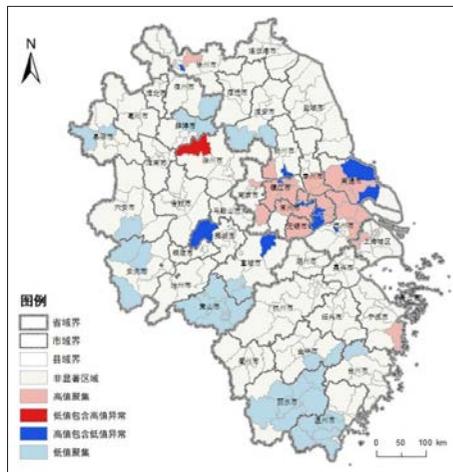


图4 2020年长三角碳排放总量局部空间自相关分析

Fig.4 Local spatial autocorrelation analysis of carbon emissions in the Yangtze River Delta Region in 2020

资料来源：笔者自绘。

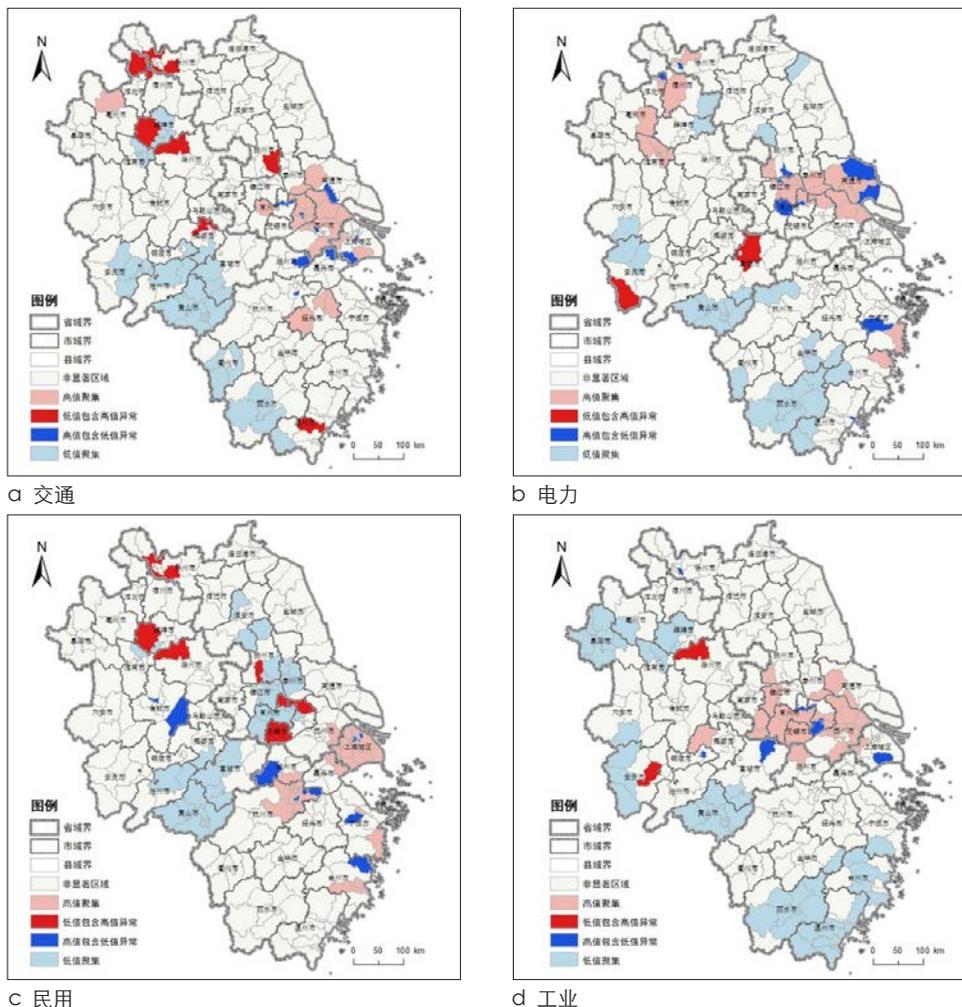


图5 2020年长三角各部门碳排放局部空间自相关分析  
Fig.5 Local spatial autocorrelation analysis of carbon emissions from various sectors in the Yangtze River Delta Region in 2020

资料来源:笔者自绘。

表4 最小二乘法估计结果

Tab.4 Least squares estimation results

总量变量	系数	标准误差	标准化系数	地均变量	系数	标准误差	标准化系数
常量	-8.814	0.041	—	常量	-1.612	0.048	—
lnP	0.177	0.090	0.177	lnPl	0.346	0.088	0.346
lnA	0.475	0.069	0.475	lnA	0.123	0.063	0.123
lnT	0.108	0.055	0.108	lnT	0.133	0.064	0.133
lnI(不显著)	0.034	0.055	0.034	lnI	-0.211	0.155	-0.211
lnL	0.201	0.068	0.201	lnLI	0.206	0.122	0.206
lnR	0.145	0.094	0.145	lnRI	0.267	0.082	0.267
lnU	0.203	0.118	0.203	lnUI	0.323	0.160	0.323
lnG	-0.084	0.059	-0.084	lnGI	-0.082	0.068	-0.082

资料来源:笔者自制。

划建议。研究表明:从部门碳排放差异来看,长三角部门碳排放差异巨大,电力、工业为主要排放部门;从碳排放空间分异来看,以上海、南京、杭州、合肥等直辖市、省会城市碳排

放为区域性碳排放中心向外扩散,并存在沿海较高、内陆较低的空间分异规律;从碳排放空间自相关来看,局部空间自相关显著,分布模式均为聚集模式,其中工业聚集模式最明显。

通过溯源在碳减排过程中既需要关注社会经济发展,也要关注城市建成环境因素。在与碳排放相关的不同的因素中可分别着力,提出相应策略。

(1) 城市群管理中落实部门减排

由于碳排放的路径不同且长三角地区各部门碳排放特征差异显著,着力于部门减排能有效转换目标、技术、政策,针对不同原因提出减排策略。从四部门碳排放特征看,工业和电力部门是减排重点。其中,电力部门可从优化电源结构、倡导绿色生产生活、提升用电效率3方面入手:贯彻低碳技术创新改造,减少化石能源依赖,建设以可再生能源发电、新能源为主的新型电力系统,使风电、太阳能发电成为新增电力需求主体。对于上海碳排放占比最高的工业部门而言,可从提高技术水平、打造低碳产业集群、关注减排重点领域3方面着力。

(2) 管控分区划定与协作减排

通过本文对长三角地区碳排放的时空特征分析,可将长三角地区的城市分为4个区域,促进情况相似、地理位置相近的城市共同落实减排策略。第1个区域为以上海、苏州为中心沿长江向杭州、南京等省会城市扩展的长三角经济发达地区,减排策略侧重于共建平台下的技术提升、产业类型置换、低碳生活倡导及电源结构优化;第2个区域为长三角沿海地区,减排策略侧重于产业结构调整、交通运输智能化及能源结构优化,可实行交通与工业减排的协同措施;第3个区域为除去以上2类区域的长江以北区域,在减排策略上侧重于技术创新,在能源结构优化上尤以冬季取暖能源为重;第4个区域则是非沿海的长江以南区域,策略上可引进一批技术、搭建合作关系,从而落实低碳技术创新改造。

(3) 空间协同的地区分类与政策引导

根据研究中长三角地区区县在碳排放上自相关类型的不同,可分别在4个部门中划分5类地区,“HH型”为核心减排类地区,“HL型”、“LH型”为发展提升类地区,“LL型”为综合改良类地区,“NN型”为因需调整类地区,对每个类别的地区提出不同的双碳策略。

表5 溯源减排策略

Tab.5 Emission reduction strategy from traceability

因素	项目	影响原理	策略
社会经济因素	人口规模(P)	人口密度差异大是造成区域内部分异的重要原因。长三角地区大城市的市中心人口密度较高	评估环境承载力,并以此为依据控制城市人口,避免因过多人口而引起环境破坏加剧碳排放
	人均财富(A)	人均财富水平影响对绿色发展的重视程度。区域总体较发达,但区域内人均GDP存在差异	持续投入低碳技术创新以提升技术水平,降低单位GDP碳排放量;促进产业升级,发展第三产业以推进经济健康绿色发展
	技术水平(T)	长三角技术水平差异对碳排放影响不大,可能与产业转移连带现有技术转移有关	
	产业结构(I)	从结果来看,在长三角地区对碳排放影响不显著,可能是由于产业转移	持续推进产业结构健康高效发展,健全碳交易市场
建成环境因素	交通与土地(L)	更多、更密集的铁路和城市道路带来更高的碳排放量	加强城市公共交通体系与低碳技术和流程支持下的城际交通建设,发展低碳运输结构
	城市化水平(U)	建成区为汇聚大量碳源的生产生活聚集地	注重优化城市空间结构,在适度集聚和多中心结构中推进城市化进程
	绿地水体(G)	绿地水体面积与碳排放的弱正相关可能是由于地区水网密布,且经济发达地区更注重绿地建设	注重城市生态环境、绿地建设与水体保护,发挥固碳作用

资料来源:笔者自制。

在核心减排区,工业减碳压力大,空间规划上推进科技园、产业园等适宜集中地区间的协作科技创新,集中生产要素,进而减少产品运输碳排放;在发展提升区,应注重可实现相邻县区间碳交易,集中规划长三角碳交易市场,提升绿色发展水平;在综合改良区,注重产业结构及其对应的空间规划调整,重点规划商业商务、居住区,减少低效工业区面积,以促进双碳进程中的发展水平提升;在按需调整区则针对各个部门的情况,给出空间规划策略。同时,从局部空间自相关分析及冷热点分析可看出上海市中心区及各大城市作为主要的电力、交通、民用的热点集中区域,其在减排中应作为其分区中的引领城市。

## 5 结语

根据本文研究,可见影响碳排放的社会经济因素与建成环境因素多样,且影响因素随时间变化而变化的可能性较大。基于此,本文提出在城市运行中落实部门减排、管控分区划定与协作减排、空间自相关中的地区分类与政策引导、碳排放影响溯源减排的空间策略,在今后长三角的发展过程中也需要在立足区域特征的前提下,明确关键影响因子,从而达成区域双碳目标。此外,本文在数据获取上存在一定的局限性,同时研究结论受数据年限、统

计方式等的限制,可能存在偏误,未来需进一步获取完整的人口数据,并结合卫星与监测数据等进行辅助研究。

(感谢同济大学创新创业学生团队成员陈迪菲、蔡灿、邵雨辰、于禾在数据准备和图文编辑方面的工作。)

## 参考文献 References

- [1] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.  
HU An'gang. China's goal of peaking carbon dioxide emissions before 2030 and the main ways to achieve it[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 李雨晨,秦宇,杨柳,等. 长江上游大中型水库碳排放量估算与分析:以IPCC国家温室气体清单指南为基础[J]. 湖泊科学, 2023, 35(1): 131-144.  
LI Yuchen, QIN Yu, YANG Liu, et al. Estimation and analysis of carbon emissions from large and medium-sized reservoirs in the upper reaches of the Yangtze River: based on the IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(1): 131-144.

- [3] 赵俊,王迪,付士磊. 基于二氧化碳通量监测的低碳城市研究进展与思考[J]. 城市建筑空间, 2022, 29(5): 243-245.  
ZHAO Jun, WANG Di, FU Shilei. Research progress and reflections on low-carbon cities based on carbon dioxide flux monitoring[J]. Urban Architecture and Space, 2022, 29(5): 243-245.
- [4] 孟天佑. 城市碳排放规律及基于CO<sub>2</sub>响应系数的无限长线源扩散模型研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.  
MENG Tianyou. Research on urban carbon emission patterns and infinite long line source diffusion model based on CO<sub>2</sub> response coefficient[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [5] 刘良云,陈良富,刘毅,等. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战[J]. 遥感学报, 2022, 26(2): 243-267.  
LIU Liangyun, CHEN Liangfu, LIU Yi, et al. Satellite remote sensing monitoring methods, progress, and challenges for global carbon inventory[J]. Journal of Remote Sensing, 2022, 26(2): 243-267.
- [6] 彭竞霄. 长株潭城市群碳排放仿真模拟及低碳空间规划策略研究[D]. 株洲:湖南工业大学, 2021.  
PENG Jingxiao. Simulation of carbon emissions and low-carbon spatial planning strategies for the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[D]. Zhuzhou: Hu'nan University of Technology, 2021.
- [7] 王伟,邹伟,张国彪,等. “双碳”目标下的城市群国土空间规划路径与治理机制[J]. 环境保护, 2022, 50(s1): 64-69.  
WANG Wei, ZOU Wei, ZHANG Guobiao, et al. Land spatial planning path and governance mechanism for urban agglomerations under the "dual carbon" goal[J]. Environmental Protection, 2022, 50(s1): 64-69.
- [8] 鄢金明,王建军. 双碳目标下的广州国土空间规划编制思考[C]//面向高质量发展的空间治理——2021中国城市规划年会论文集. 北京:中国建筑工业出版社, 2021:525-532.  
YAN Jinming, WANG Jianjun. Thoughts on the compilation of Guangzhou's territorial spatial planning under the dual carbon goal[C]//Spatial governance for high-quality development - proceedings of the 2021 China Annual National Planning Conference. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021: 525-532.
- [9] 张赫,王睿,于丁一,等. 基于差异化控碳思路的县级国土空间低碳规划方法探索[J]. 城市规划学刊, 2021(5): 58-65.  
ZHANG He, WANG Rui, YU Dingyi, et al. Exploring low-carbon planning methods for county-level territorial space based on differentiated carbon control ideas[J]. Urban Planning Forum, 2021(5):

- 58-65.
- [10] DONG J, LI C. Structure characteristics and influencing factors of China's carbon emission spatial correlation network: a study based on the dimension of urban agglomerations[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 853: 158613.
- [11] WANG G Z, HAN Q, DE VRIES B. The multi-objective spatial optimization of urban land use based on low-carbon city planning[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107540.
- [12] ZHANG A X, DENG R G. Spatial-temporal evolution and influencing factors of net carbon sink efficiency in Chinese cities under the background of carbon neutrality[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 365: 132547.
- [13] HONG S F, HUI E C, LIN Y Y. Relationship between urban spatial structure and carbon emissions: a literature review[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109456.
- [14] 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 Li, TU Hongzhou, GONG Cun. Research on influencing factors of carbon emissions from energy consumption based on STIRPAT model - taking the Yangtze River Delta as an example[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2018, 37(8): 95-102.
- [15] LI Z, WANG F, KANG T T, et al. Exploring differentiated impacts of socioeconomic factors and urban forms on city-level CO<sub>2</sub> emissions in China: spatial heterogeneity and varying importance levels[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 84: 104028.
- [16] 闫凤英, 杨一苇. 空间规划的碳排放约束机制与治理框架[J]. *西部人居环境学刊*, 2021, 36(3): 37-45.
- YAN Fengying, YANG Yiwei. Carbon emission constraint mechanism and governance framework for spatial planning[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2021, 36(3): 37-45.
- [17] 国家发展改革委, 住房和城乡建设部. 长江三角洲城市群发展规划(2015—2030)[R]. 2016.
- National Development and Reform Commission, Ministry of Housing and Urban-Rural Development. *Yangtze River Delta urban agglomeration development plan (2015-2030)*[R]. 2016.
- [18] 何斌, 梅士龙, 陆琛莉, 等. MEIC排放清单在空气质量模式中的应用研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(10): 3658-3668.
- HE Bin, MEI Shilong, LU Chenli, et al. Application of MEIC emission inventory in air quality modeling[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(10): 3658-3668.
- [19] GONG P, CHEN B, LI X C, et al. Mapping essential urban land use categories in China (EULUC-China): preliminary results for 2018[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(3): 182-187.
- [20] 陈彦光. 基于Moran统计量的空间自相关理论发展和方法改进[J]. *地理研究*, 2009, 28(6): 1449-1463.
- CHEN Yanguang. Development and improvement of spatial autocorrelation theory based on Moran's statistic[J]. *Geographical Research*, 2009, 28(6): 1449-1463.
- [21] 孙俊, 潘玉君, 和瑞芳, 等. 地理学第一定律之争及其对地理学理论建设的启示[J]. *地理研究*, 2012, 31(10): 1749-1763.
- SUN Jun, PAN Yujun, HE Ruifang, et al. The debate on the first law of geography and its enlightenment to the construction of geographical theory[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1749-1763.
- [22] 林彤, 高建岗, 王亚华. 基于国家耕地质量等别指数和空间自相关的苏北地区耕地保护分区[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(3): 525-533.
- LIN Tong, GAO Jian'gang, WANG Yahua. Farmland protection zoning in northern Jiangsu based on national farmland quality grade index and spatial autocorrelation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 525-533.
- [23] 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(3): 46.
- [24] 王瑛, 何艳芬. 中国省城二氧化碳排放的时空格局及影响因素[J]. *世界地理研究*, 2020, 29(3): 512-522.
- WANG Ying, HE Yanfen. Spatio-temporal pattern and influencing factors of carbon dioxide emissions in China's provinces[J]. *World Geographic Research*, 2020, 29(3): 512-522.
- [25] 任晓松, 赵国浩. 中国工业碳排放及其影响因素灰色预测分析——基于STIRPAT模型[J]. *北京交通大学学报(社会科学版)*, 2014, 13(4): 18-24.
- REN Xiaosong, ZHAO Guohao. Gray prediction analysis of China's industrial carbon emissions and its influencing factors - based on the STIRPAT model[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University (Social Science Edition)*, 2014, 13(4): 18-24.
- [26] 陈邦丽, 徐美萍. 中国碳排放影响因素分析——基于面板数据STIRPAT-Alasso模型实证研究[J]. *生态经济*, 2018, 34(1): 20-24.
- CHEN Bangli, XU Meiping. Analysis of the influencing factors of China's carbon emissions - empirical research based on the STIRPAT-Alasso model of panel data[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(1): 20-24.
- [27] 高明, 吴雪萍, 郭施宏. 城市化进程、环境规制与大气污染——基于STIRPAT模型的实证分析[J]. *工业技术经济*, 2016, 35(9): 110-117.
- GAO Ming, WU Xueping, GUO Shihong. Urbanization process, environmental regulation and air pollution - based on the empirical analysis of the STIRPAT model[J]. *Industrial Technology Economy*, 2016, 35(9): 110-117.
- [28] 陈占明, 吴施美, 马文博, 等. 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[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(10): 45-54.
- CHEN Zhanming, WU Shimei, MA Wenbo, et al. Analysis of the influencing factors of carbon dioxide emissions in cities above the prefecture level in China: based on the extended STIRPAT model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(10): 45-54.
- [29] 宋德勇, 徐安. 中国城镇碳排放的区域差异和影响因素[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(11): 8-14.
- SONG Deyong, XU An. Regional differences and influencing factors of urban carbon emissions in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(11): 8-14.
- [30] 孙敬水, 陈雅蕊, 李志坚. 中国发展低碳经济的影响因素研究——基于扩展的STIRPAT模型分析[J]. *审计与经济研究*, 2011, 26(4): 85-93.
- SUN Jingshui, CHEN Zhirui, LI Zhijian. Research on the influencing factors of China's development of low-carbon economy - based on the analysis of the extended STIRPAT model[J]. *Audit and Economic Research*, 2011, 26(4): 85-93.
- [31] BO Z, DAN T, MENG L, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(19): 14095-14111.
- [32] LI M, LIU H, GENG G, et al. Anthropogenic emission inventories in China: a review[J]. *National Science Review*, 2017, 4(6): 834-866.
- [33] 张乐勤, 李荣富, 陈素平, 等. 安徽省1995—2009年能源消费碳排放驱动因子分析及趋势预测——基于STIRPAT模型[J]. *资源科学*, 2012, 34(2): 316-327.
- ZHANG Leqin, LI Rongfu, CHEN Suping, et al. Analysis and trend prediction of driving factors of energy consumption carbon emissions in Anhui Province from 1995 to 2009 - based on the STIRPAT model[J]. *Resource Science*, 2012, 34(2): 316-327.