

长三角经济增长与碳排放异速关系及形成机制

李在军¹, 尹上岗², 姜友雪³, 吕玉兰⁴

(1. 扬州大学苏中发展研究院, 扬州 225009; 2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023;

3. 江苏经贸职业技术学院金融学院, 南京 210007; 4. 山东财经大学金融学院, 济南 250014)

摘要: 低碳经济是长三角高质量一体化发展的内在要求。针对2000—2017年长三角地区经济增长与碳排放时空关联、异速增长关系及影响因素的研究发现:(1)长三角地区经济增长与碳排放具有正向关联, 关联强度总体呈“V”型波动变化。2000—2008年高关联强度区相对集中分布于苏南、苏北及浙中等地区, 2009—2017年空间关联强度明显下降, 大体呈“南低北高”分布。(2)长三角地区经济增长与碳排放异速变化以经济扩张弱型为主, 大部分地区经济增长与碳排放异速关系实现由正转负。(3)地理探测器诊断第二产业比例、第三产业比例、城市化和人口密度是驱动长三角地区经济增长与碳排放异速变动的主要因子。(4)多尺度地理加权回归表明人口密度显著负向影响长三角地区经济增长与碳排放异速变化, 投资强度和财政支出强度起到抑制作用, 城市化和消费水平表现出先促进后抵消作用, 第二产业与第三产业占比及固碳水平则起到先抑制后促进作用。

关键词: 碳排放; 经济增长; 异速增长关系; 形成机制; 长三角地区

气候变暖是普遍关注的全球性重要环境问题, 大量二氧化碳被认为是引致全球气候变暖的重要因素。针对严峻的气候问题, 国际社会逐渐达成节能减排合作共识, 先后签订《京都议定书》与《巴黎气候变化协定》。中国政府积极响应, 成为协定缔约方, 主动践行减排义务。2020年12月, 习近平总书记在气候雄心峰会进一步宣称, 到2030年, 中国单位GDP二氧化碳排放降幅65%以上, 力争达到碳峰值, 并于2060年前实现碳中和, 承诺为世界作出绿色贡献。因此, 平衡经济高质量稳定增长与碳排放有序下降不仅关乎中国经济社会可持续发展, 且影响中国建设清洁美丽世界的绿色承诺。在绿色低碳发展背景下, 分析区域经济增长与碳排放异速演化规律, 对促进经济社会绿色发展转型具有重要指导意义。

碳排放是学术界关注的热点问题, 国内外学者针对碳排放形成了与特定分析尺度相适应的测定手段, 基于碳排放因子构建^[1]、碳足迹模拟^[2,3]、投入产出分析链^[4]、夜间灯光反演^[5]、实测调查^[6,7]等方法进行估算。相关研究囊括了全球不同国家^[8,9]、省域^[10,11]、市域^[12]及居民消费^[13]等多尺度, 并涉及不同产业^[14]、行业^[15,16]、部门^[17]的碳排放分析。针对碳排放影响因素的分析, 逐渐由结构分解、指数分解、STIRPAT等方法向空间计量模型延伸^[18,19], 并纳入人口规模、城市化、产业结构、技术进步、财政支出等多维指标诊断碳排放的影响因素^[20-22]。碳排放与经济增长关系是学界研究的重要问题, 其中, 碳排放环境库

收稿日期: 2021-02-08; 修订日期: 2021-03-25

基金项目: 教育部人文社会科学基金项目 (20YJCZH080, 17YJCZH236); 江苏省社会科学基金项目 (220SHD009)

作者简介: 李在军 (1989-), 男, 山东临沂人, 博士, 助理研究员, 研究方向为区域经济发展。

E-mail: junzailinyi@gmail.com

通讯作者: 吕玉兰 (1986-), 女, 山东潍坊人, 博士, 讲师, 研究方向为环境经济学。E-mail: yulanlv0729@163.com

兹涅茨曲线 (Environmental Kuznets Curve, EKC) 是研究经济增长与碳排放关系使用最普遍、争议最广泛、应用最直接的一个假说^[23]。由于不同研究尺度、研究时段、研究方法 & 控制变量选取的影响, 一些学者证实经济增长与碳排放存在“倒U”型关系^[24,25], 另一些学者发现经济增长与碳排放并非呈“倒U”型关系, 但具有其他形状的长期变动关系^[26,27], 而其他学者认为经济增长与碳排放 EKC 不存在^[28,29]。此外, 一些学者基于脱钩弹性模型分析经济增长与碳排放之间的关系, 从速度耦合视角刻画了两者间的脱钩状态^[30,31], 并从经济增长的碳强度与经济增长的碳排放绩效对经济增长的碳排放效应进行评价^[32,33]。虽然相关研究从理论上阐释了碳排放成因的来源, 碳排放的时空变化特征, 碳排放的社会经济环境影响, 及自然与社会经济因素对碳排放影响贡献, 并据此提出一些减排应对策略, 但仍有待进一步扩展: (1) 脱钩分析无法量化经济增长对碳排放的影响程度, 环境库兹涅茨曲线缺乏对全部研究单元经济增长与碳排放关系的检验, 而基于横向与纵向异速增长视角有助于揭示经济增长对碳排放的影响变化程度, 且对二者异速变动形成机制解析有助于寻求合理碳减排手段; (2) 已有研究较少关注县域尺度碳排放与经济增长的时空变化关系, 而低碳城市建设与低碳经济发展目标实现依赖于县域经济发展与碳排放达标协同助力。

长三角地区是中国经济快速发展的地带之一, 受区域经济发展阶段、工业化、城市化及市场化进程等不平衡发展的影响, 经济增长面临不同程度的资源环境压力。那么, 长三角地区经济增长与碳排放是否具有异速变化关系? 县域经济增长与碳排放异速变化程度如何? 异速变化的驱动力如何? 在长三角高质量一体化发展背景下, 探究经济增长与碳排放异速变化关系, 旨在制定合理经济增长策略, 调控区域碳减排合作与补偿及推进碳减排技术落实提供决策参考, 从而实现区域碳排放达标。

1 研究方法 & 数据来源

1.1 研究方法

为检验经济增长与碳排放的时空作用关系, 首先, 采用面板灰色关联模型分析二者时空关联阶段变动特征; 其次, 借助异速增长模型识别不同时段、地区的异速变动程度; 最后, 采用地理探测器模型诊断不同时段异速变化驱动力, 并借助多尺度地理加权回归模型分析驱动因素空间异质性。

1.1.1 面板灰色关联模型

面板灰色关联通过扩展以指数函数为基础的灰色关联度模型, 针对面板数据的时间 & 对象维度特征进行分析, 提取两维度不同的发展程度和方向信息, 将指标间的“增量差”和“离差的差”的绝对值转化为度量曲线形状的相似程度, 将方向差异作为正负关联的判断依据, 具体理论过程与公式参考文献 [34]。

1.1.2 异速增长模型

异速增长揭示了一个系统的局部相对生长速率与系统整体的比例关系, 分为纵向异速与横向异速。其中, 纵向异速增长反映全部样本单元时序变化的异速关系, 横向异速则反映各样本单元时序变化的异速关系。其表达式为^[35]:

$$A_t = aE_t^b \quad (1)$$

对式 (1) 同时取对数, 根据最小二乘法估计方程得到:

$$\ln A_t = \ln a + b \ln E_t$$

(2)

式中： A_t 为 t 时间区域碳排放量（万t）； E_t 为 t 时间区域经济增长（万元）； a 为比例系数； b 为标度因子，即异速增长系数。通常，异速增长系数 b 介于 $2/3\sim 1$ 之间，平均值约为 $0.85^{[36]}$ ，即 $b=0.85$ 时，经济与碳排放等速增长； $b>0.85$ 时，为正异速生长，此时经济增速小于碳排放增速；当 $b<0.85$ 时，为负异速生长，此时经济增速大于碳排放增速。为更好判别经济增长与碳排放的异速变动关系，将正、负异速增长分别划分为三级，各异速级别划分与特征见表1。

表1 经济增长—碳排放异速关系的协调性分级

Table 1 The coordination classification of allometric relationship between economic growth and CO₂ emissions

异速增长类型	异速级别	划分标准	异速关系类型	异速关系特征
正异速生长	正异速三级	$3 < b$	碳排放扩张强型	碳排放相对增长速度远远高于经济相对增长速度，单位GDP碳排放大幅上升
	正异速二级	$1 < b < 3$	碳排放扩张弱型	碳排放相对增长速度高于经济相对增长速度，单位GDP碳排放小幅上升
	正异速一级	$0.85 < b < 1$	基本协调型	碳排放相对增长速度略高于经济相对增长速度
负异速生长	负异速一级	$0.5 < b < 0.85$	经济扩张弱型	碳排放相对增长速度低于经济相对增长速度，单位GDP碳排放小幅下降
	负异速二级	$0 < b < 0.5$	经济扩张强型	碳排放相对增长速度远远低于经济相对增长速度，单位GDP碳排放大幅下降
	负异速三级	$b < 0$	收缩型	碳排放和经济规模其中一个减少或同时减少

1.1.3 地理探测器模型

地理探测器借助因子探测能够有效诊断具有统计显著性变量及其对异速增长系数的解释程度，其表达式为^[37]：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

(3)

式中： h 为因变量和自变量的分层； N_h 和 N 分别为层 h 和研究单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和研究区整体的方差； q 取值 $0\sim 1$ ， q 值越大说明解释力越强，反之越弱。

1.1.4 多尺度地理加权回归模型

多尺度地理加权回归（Multi-scale Geographically Weighted Regression，MGWR）基于不同变量的空间异质性，允许每个变量拥有各自不同空间尺度的权重，能够更真实揭示各变量的空间异质性影响。其表达式为^[38]：

$$y_i = \sum_{j=1}^k \beta_{bwj}(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon$$

(4)

式中： bwj 为第 j 个变量回归系数的带宽； β_{bwj} 为第 j 个变量的回归系数； x_{ij} 为第 j 个变量在观测点 i 的值； (u_i, v_i) 是第 i 个样本点的空间地理位置坐标； ε 为随机误差项。MGWR的核函数和带宽选择标准延续传统GWR的几种典型核函数和带宽选择准则，本文选用最常用的二次核函数和AICc准则。

1.2 变量选取与数据来源

不同于遥感灯光反演碳排放，Chen等^[39]开发基于粒子群—反向传播的算法，统一1997—2017年DMSP/OLS和NPP/VIIRS的卫星图像尺度，测算得到中国2735个县级能源相关的碳排放量及陆地植被固碳量，从而有效刻画了县域尺度的碳排放。相关碳排放量

和固碳能力数据获取于中国碳排放数据库 (<https://www.ceads.net>)。

由于碳排放受多种因素影响,基于扩展STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology)模型从人口规模、集聚效应、产业结构、投资及消费等方面选取相关控制变量,以探测其对经济增长与碳排放异速变动的的影响。其中,人口密度增加带来大规模生活与生产活动聚集,从而促进能源消费和碳排放^[40],以单位面积人口数(万人/km²)表征人口密度(*pop*)。城市化一方面通过集聚大量经济活动、建设大规模基础设施、带动能源消费增长等方式提高碳强度,另一方面,城市化通过发挥规模经济、引导绿色能源消费、建设生态城镇等途径降低碳排放^[10,41],以城市人口占常住人口比例(%)反映城市化水平(*urb*)。不同产业结构对碳排放影响不同,工业化是化石能源的主要消费源,工业化占比越大,碳排放强度则越高,以第二产业占GDP比例(%)表征工业化水平(*sec*);第三产业占比越高,总体上越有利于减少碳排放^[42],以第三产业占GDP比例(%)表征服务业水平(*ter*)。地方财政通过环保、教育及科学技术等支出能够起到改善环境质量、提升居民环保意识及促进节能技术进步的作用,从而降低二氧化碳排放,但不同地区社会经济条件的差异会影响财政支出的碳减排效应^[43],以地方财政支出占GDP比例表征财政支出对碳排放的影响(*fin*)。固定资产投资通过投资规模、投资配置效率、投资碳强度对碳排放起到直接影响作用^[44],以固定资产投资额占GDP比例(%)表征投资水平(*fix*)。居民消费水平越高,消费需求越强,将直接或间接地增加碳密集型产品消耗量,促进生活能源碳排放^[45],以社会消费品零售额占GDP比例(%)表征居民消费水平(*con*)。陆地植被在吸收和固定二氧化碳排放方面起到积极作用,以植被固定碳汇量反映固碳能力(*car*)。

由于部分市辖区统计数据连续性较差,难以获取,为与碳排放数据相匹配,基于2020年的行政区划,将数据缺失地区与所属地市市辖区合并,如将苏州工业园区、镇江新区分别合并至苏州市市区、镇江市市区,最终获得236个研究单元(包括县、区及市辖区)。为消除物价因素影响,将GDP数据折算至2000年的可比价,相关统计数据依据《江苏省县域统计年鉴》(2001—2018年)、《安徽省县域统计年鉴》(2001—2018年)、《浙江省统计年鉴》(2001—2018年)及各地市统计年鉴整理计算获得。

2 结果分析

2.1 经济增长—碳排放的时空关联特征

采用面板灰色关联模型测度2000—2017年长三角地区经济增长与碳排放的时序关联强度值(图1)。由图1可知,经济增长与碳排放时序关联强度总体趋于波动下降,且呈现明显的阶段性变化特征。其中,关联强度值由2000年的0.536下降至2008年的0.474,之后波动变化上升至2017年的0.523,说明经济增长总体上对碳排放增加具有长期正向影响效应,且呈现出明显的阶段性变化特征。

据此,分别测度2000—2008年和2009—2017年两个研究时段内各县(市、区)经济增长与碳排放的空间关联强度值,并采用ArcGIS 10.6软件进行可视化(图2)。由图2可知,2000—2008年经济增长和碳排放关联强度均值为0.765,说明大部分地区经济增长面临较高碳排放压力,高关联强度区相对集中分布于苏南、苏北及浙中等部分县(市、区)。2009—2017年经济增长和碳排放关联强度均值为0.277,说明大部分地区经济增长

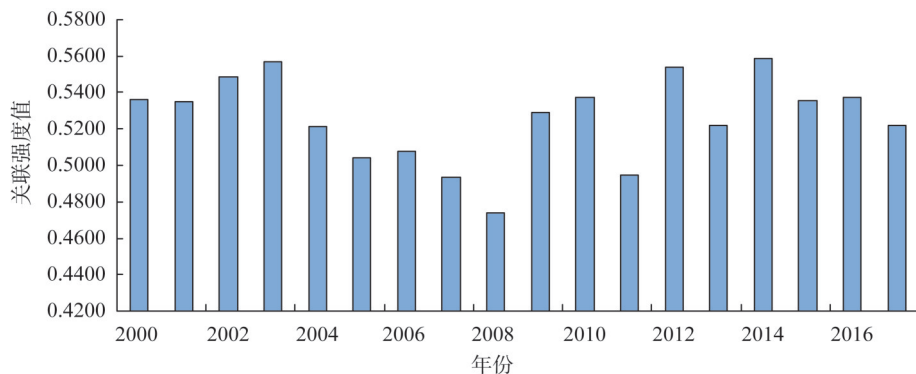


图1 长三角地区经济增长与碳排放的时序关联强度

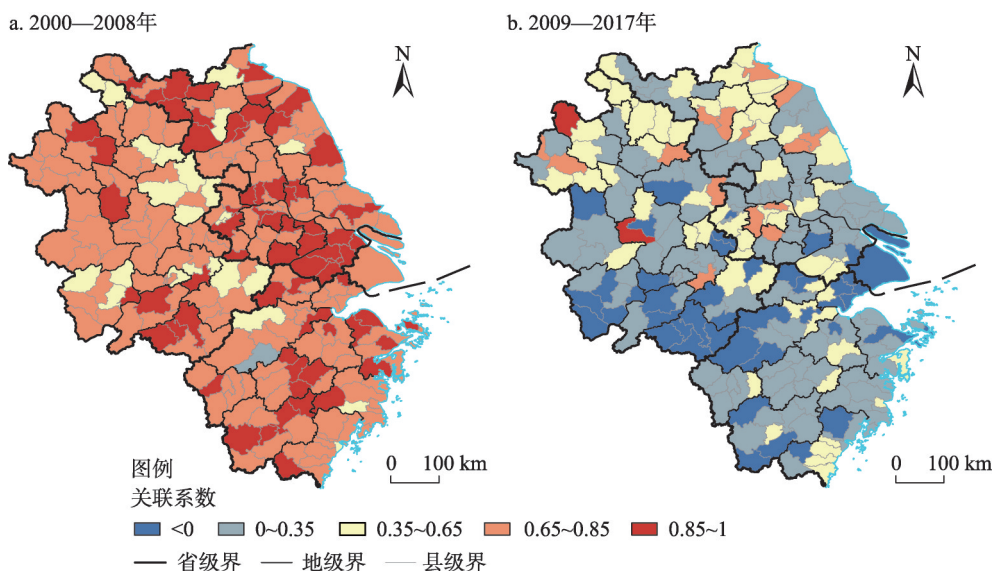
Fig. 1 The temporal correlation intensity between economic growth and CO₂ emissions in Yangtze River Delta

图2 长三角地区经济增长与碳排放的空间关联强度

Fig. 2 The spatial correlation intensity between economic growth and CO₂ emissions in Yangtze River Delta

与碳排放关联趋于下降,关联强度空间上整体呈“南低北高”的分布态势。其中,负向关联强度值占比为18.64%,集中分布于皖南、皖西南、浙西北、浙南、浙东北及上海等地区,说明其经济增长与碳排放基本实现脱钩;关联强度高值区分布于阜阳、淮北、宿州、连云港、宿迁、淮安、常州、马鞍山及温州等地市大部分辖区,其经济增长仍未摆脱“高投入、高能耗、低产出”的粗放型模式,经济增长仍面临着一定的碳减排压力。

2.2 经济增长—碳排放的时空异速特征

根据式(2)进一步测算经济增长与碳排放的异速变化程度,得到长三角地区经济增长与碳排放异速增长拟合模型(表2)。由表2可知,方程的拟合效果较好,历年拟合优度均大于0.7,标度指数总体低于0.85,且趋于波动下降变化,说明碳排放增速低于经济相对增速。具体来看,2000—2001年标度指数快速下降,由2000年的峰值0.820下降至

表2 2000—2017年长三角经济增长与碳排放异速增长拟合模型

Table 2 Allometric growth fitting model between economic growth and CO₂ emissions in Yangtze River Delta during 2000-2017

年份	拟合方程	标度指数 <i>b</i>	拟合优度 <i>R</i> ²	异速级别
2000	$\ln A = -10.3620 + 0.8197 \ln E$	0.8197	0.7210	负异速一级
2001	$\ln A = -10.1772 + 0.7984 \ln E$	0.7984	0.7140	负异速一级
2002	$\ln A = -9.8031 + 0.7723 \ln E$	0.7723	0.7215	负异速一级
2003	$\ln A = -9.7039 + 0.7722 \ln E$	0.7722	0.7385	负异速一级
2004	$\ln A = -9.8271 + 0.7777 \ln E$	0.7777	0.7555	负异速一级
2005	$\ln A = -9.7722 + 0.7766 \ln E$	0.7766	0.7666	负异速一级
2006	$\ln A = -9.8032 + 0.7797 \ln E$	0.7797	0.7767	负异速一级
2007	$\ln A = -9.8268 + 0.7776 \ln E$	0.7776	0.7850	负异速一级
2008	$\ln A = -10.0589 + 0.7889 \ln E$	0.7889	0.7993	负异速一级
2009	$\ln A = -9.9985 + 0.7834 \ln E$	0.7834	0.8028	负异速一级
2010	$\ln A = -10.0081 + 0.7802 \ln E$	0.7802	0.8054	负异速一级
2011	$\ln A = -9.6772 + 0.7555 \ln E$	0.7555	0.7812	负异速一级
2012	$\ln A = -9.9931 + 0.7722 \ln E$	0.7722	0.8041	负异速一级
2013	$\ln A = -10.034 + 0.7678 \ln E$	0.7678	0.7956	负异速一级
2014	$\ln A = -10.1772 + 0.774 \ln E$	0.7740	0.7825	负异速一级
2015	$\ln A = -10.3323 + 0.7771 \ln E$	0.7771	0.7794	负异速一级
2016	$\ln A = -10.3617 + 0.7769 \ln E$	0.7769	0.7732	负异速一级
2017	$\ln A = -10.1108 + 0.7555 \ln E$	0.7555	0.7390	负异速一级

2001年的0.798，2002—2008年标度指数略呈波动抬升变化，2008年达到次峰值0.789，说明此阶段碳排放增速与经济相对增速差异较小，单位GDP碳排放较高；2009—2018年标度指数趋于波动下降，由0.783波动下降至2017年的0.756，说明碳排放增速与经济相对增速差距趋于扩大，单位GDP碳排放趋于减少。

整体来看，长三角地区经济增长与碳排放异速增长处于经济扩张弱型阶段，尽管2000年来碳排放增速趋于波动下降，但降幅较小，当前长三角地区经济增长仍面临相当的碳减排压力。

进一步拟合2000—2008年和2009—2017年长三角地区经济增长与碳排放的异速增长模型，并利用ArcGIS 10.6软件对标度指数类型进行可视化（图3）。由图3可知，2000—2008年长三角地区经济增长与碳排放异速类型以负异速为主，负异速县（市、区）为164个，占比达69.49%。其中，负异速二级县（市、区）为11个，空间分布较分散；负异速一级县（市、区）达153个，占负异速城市比例达93.29%，遍布于苏北、苏中、皖北、皖中、浙中、浙东等地区，其标度均值为0.702。正异速县（市、区）为72个，占比30.51%，正异速一级为46个，其标度均值为0.918，分布于安徽省安庆、滁州、宣城等市区，浙江省杭州、金华、丽水、台州等市区，以及江苏省镇江、盐城、苏州等少数市区；正异速二级地区为26个，标度均值为1.220，集中分布于安徽省黄山、滁州、宣城等市区，浙江、江苏省正异速二级地区多呈零星分布，这些地区单位GDP碳排放压力较大。

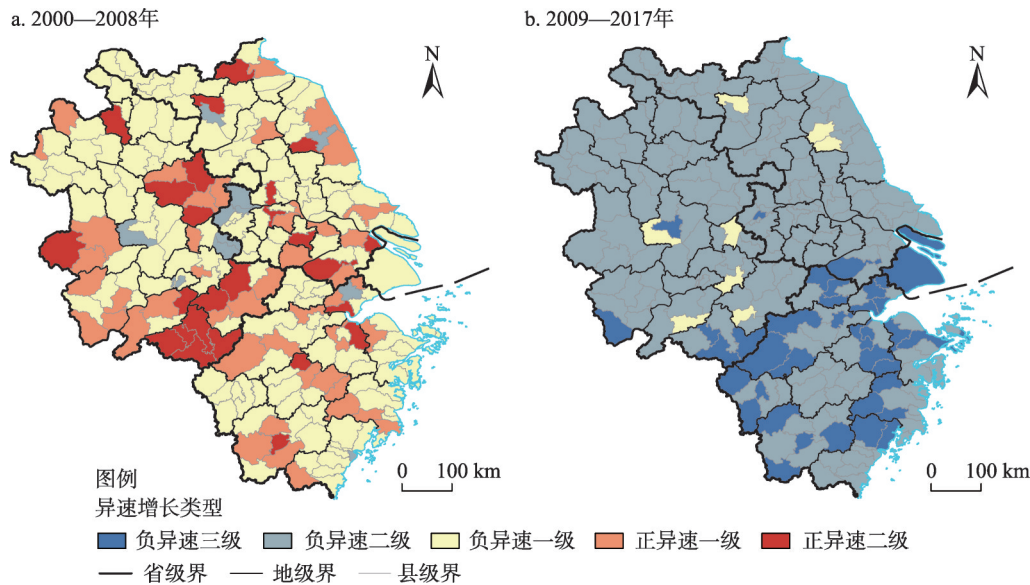


图3 长三角地区经济增长与碳排放异速增长空间格局

Fig. 3 The spatial allometric types between economic growth and CO₂ emissions in Yangtze River Delta

2009—2017年长三角地区经济增长与碳排放均呈负异速增长，且主要以负异速二级为主，占比达80.08%；其次是负异速三级地区，占比为16.52%，而负异速一级地区占比最低，仅为3.39%；这说明大部分地区碳排放相对增长速度远远低于经济相对增长速度，单位GDP碳排放大幅下降。其中，负异速二级地区遍布于江苏、安徽和浙江省，而负异速三级地区主要分布于浙江省。对比两个时段发现，长三角大部分县（市、区）经济增长与碳排放异速增长类型均由正转负，说明长三角地区经济增长碳强度明显下降。

2.3 经济增长—碳排放异速增长的影响因子探测

利用R软件GD包分别对2000—2008年和2009—2017年各影响因子进行最佳分层，借助地理探测器因子探测诊断空间异速分异的驱动力（表3）。由表3可知，第一阶段（2000—2008年），财政支出占比、人口密度、二产占比、三产占比、城市化率及消费占比对碳排放与经济增长异速变化具有显著影响，且影响强度依次减弱，而碳吸收与固定资产投资占比的影响未通过显著性检验。第二阶段（2009—2018年），碳吸收、二产占比、三产占比、城市化率、固定资产投资占比及人口密度对异速增长变化起到显著影响，且解释力依次降低，而财政支出占比与消费占比影响并不显著。可以发现，二产占比、三产占比、城市化率、人口密度是影响两个时段内长三角地区碳排放与经济增长异速增长

表3 地理探测器回归结果

Table 3 Results of geo-detector regression

驱动因子	2000—2008年		2009—2017年	
	$q_{D,U}$	P值	$q_{D,U}$	P值
pop	0.1667***	0.0000	0.0662*	0.0570
urb	0.0802*	0.0566	0.1387***	0.0002
sec	0.1226**	0.0226	0.1618***	0.0067
ter	0.1214***	0.0009	0.1454***	0.0002
fin	0.0603	0.9901	0.0836***	0.0052
fix	0.1528***	0.0027	0.0316	0.5259
con	0.0702*	0.0525	0.0902	0.1139
car	0.1412	0.2048	0.2568***	0.0000

注：*、**、***分别为统计量在10%、5%、1%置信水平显著。

系数变动的主要驱动因子。

2.4 经济增长—碳排放异速增长影响因子作用的空间差异

采用多尺度地理加权回归模型分析各影响因子对异速增长的局部作用方向与程度，并借助 ArcGIS 10.6 软件对影响系数可视化（图4、图5）。

由图4、图5可知，2000—2008年人口密度对异速增长系数影响显著为负，均值

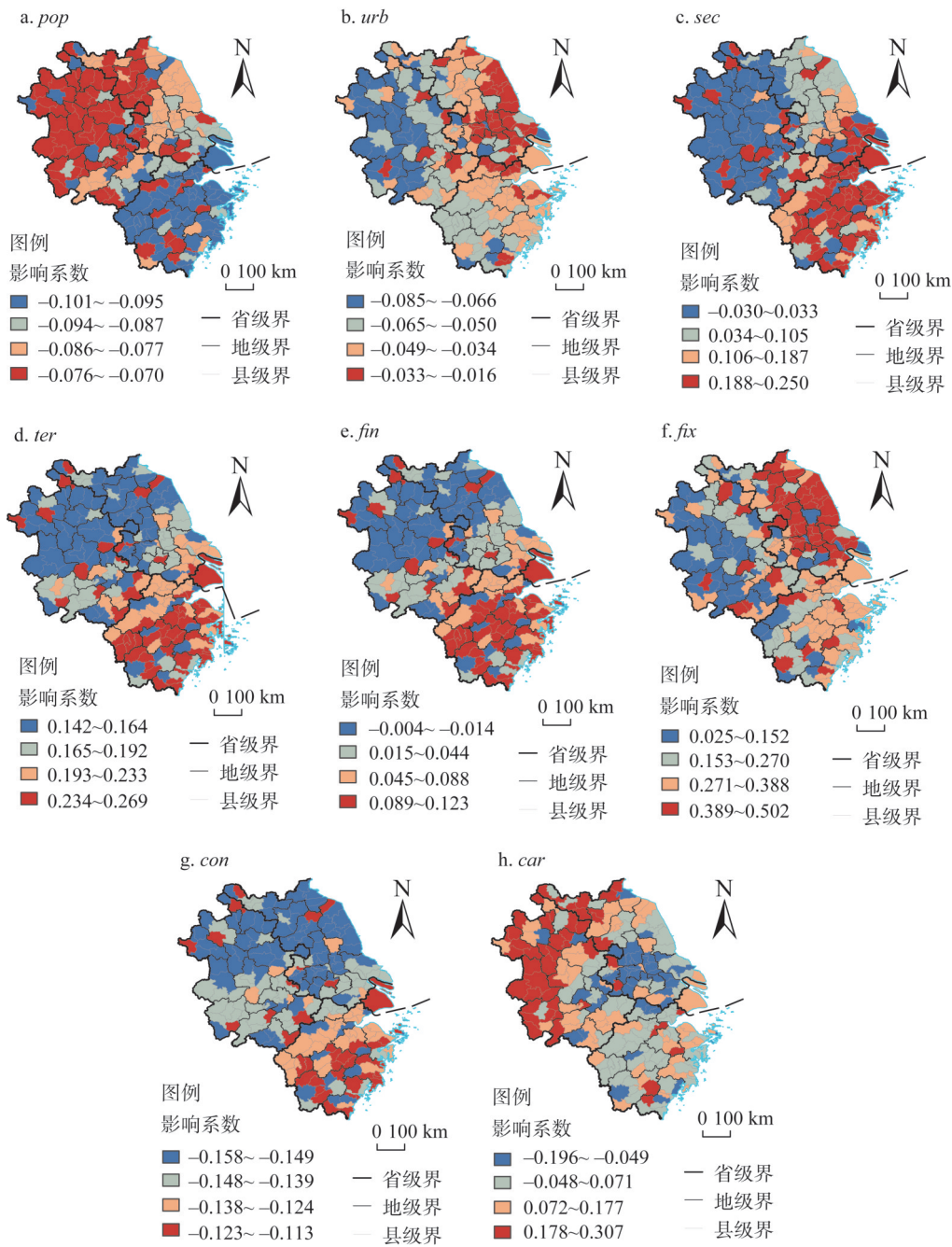


图4 2000—2009年多尺度地理加权回归系数的空间格局
Fig. 4 Spatial patterns of coefficients in the MGWR during 2000-2009

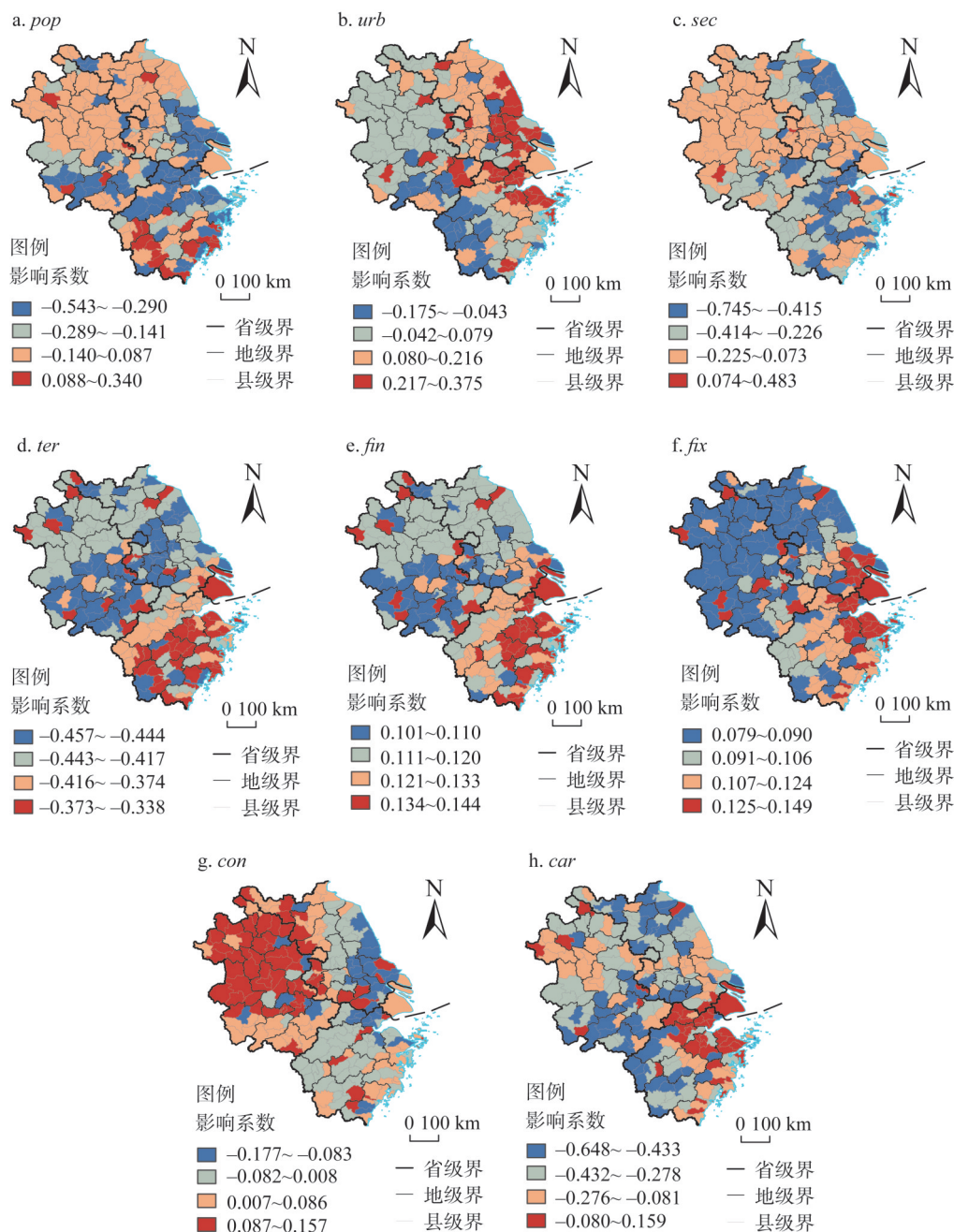


图5 2009—2017年多尺度地理加权回归系数的空间格局

Fig. 5 Spatial patterns of coefficients in the MGWR during 2009–2017

为-0.085，其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为-0.079、-0.082、-0.094及-0.100，且影响强度由东南向西北递减。这是由于人口密度增加为高端生产服务类的低能耗高价值活动提供充裕人口，提高了经济增长的碳排放效率，节约减排成本^[19,46]，使得经济增长与碳排放异速变化系数缩小。2009—2017年人口密度对异速增长系数影响均值为-0.144，其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化

系数影响均值分别为-0.139、-0.166、-0.128及-0.007,而对浙江温州、台州、衢州、金华、丽水等多数市辖区及江苏、安徽等少数市辖区的影响显著为正。由于这些地区人口密度增加,对能源资源消费和基础设施需求增大,导致碳排放增加,抵消了经济规模的增量效应^[47],使得经济增长与碳排放异速变化系数趋于扩大。

2000—2008年城市化负向影响异速增长系数,均值为-0.050,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为-0.060、-0.042、-0.047及-0.044,影响强度格局总体呈西高东低,安徽省大部分地区及浙西南、苏北等少数地区异速增长系数受城市化影响强度更大。该时段由于城市化驱动经济增长的规模效应,一定程度上抵消碳排放增加效应,从而对异速增长系数形成负向影响。2009—2017年城市化对异速增长系数影响均值为0.095,对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为0.044、0.149、0.091及0.120,而影响强度格局演变为东高西低,仅对皖南、浙西南等地区具有负向影响。这是由于城市进一步扩张改变了土地利用类型,影响了城市碳汇功能和碳循环过程,促进了碳排放^[33],使得经济增长与碳排放异速增长系数趋于扩大。

2000—2008年第二产业比例对异速增长系数影响为正,均值为0.113,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为0.055、0.096、0.184及0.249,影响强度由东南向西北递减,对安徽省少数地区的影响显著为负。这是由于传统经济增长模式多依靠高能耗、高污染、高碳排放的重化工业,是碳排放的重要来源,使得经济增长与碳排放异速增长系数扩大。2009—2017年第二产业比例对异速增长系数影响均值为-0.238,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为-0.177、-0.254、-0.285及0.010,对皖南、苏北及浙中和浙北等地区影响强度较高。步入工业化中后期,长三角积极进行工业结构转型升级,以新型工业化引领高质量发展,减少了环境污染危害,降低碳排放,从而使得经济增长与碳排放异速增长系数趋于缩小。

2000—2008年第三产业占比对异速增长系数影响为正,均值为0.194,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为0.178、0.176、0.228及0.263,影响强度整体呈南高北低分布。第三产业是以第二产业为基础的价值延伸,第二产业快速发展带来交通运输、批发零售等低端产业过度集聚,其生产和能源利用的低效率抵消了第三产业的碳减排效应^[48,49]。2009—2017年第三产业占比对异速增长系数影响显著为负,均值为-0.416,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为-0.430、-0.434、-0.344及-0.385,影响强度总体呈中间高南北低。这是由于市场经济的不断深化,居民对文化娱乐、网络购物等消费需求日增,长三角第三产业逐渐向信息传输、技术服务、现代物流、金融等高端服务产业方向演进,高端服务产业集聚有利于提升制造业服务化水平,优化能源利用结构,促进碳减排^[50]。

2000—2008年投资强度对异速增长系数影响为正,均值为0.092,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为0.030、0.029、0.082及0.117,影响强度整体呈南高北低分布。2009—2017年投资强度对异速增长的正向影响增强,均值为0.203,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为0.114、0.117、0.129及0.142,影响强度总体呈东高西低。投资是促进和维系经济增长的重要手段,尤其针对建筑、基础设施及工业设施等生产性和服务性投资,既驱动能源资源消耗,也促进非能源商品和服务的消耗,实现碳排放^[51]。

2000—2008年财政支出强度对异速增长影响显著为正,均值为0.173,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为0.200、0.354、0.295及0.348,影响强度大体由东向西递减。2009—2017年政支出强度对异速增长的正向影响趋于下降,均值为0.113,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为0.093、0.098、0.114及0.134。这是由于长三角环保科技与教育支出占财政支出比例较低,对绿色产业发展的支持和投资力度不够^[52]。此外,由于长三角地区财政支出强度空间差异较大,地方政府在服务地方经济发展的同时,形成逐底竞争或搭便车行为,从而弱化了环境规制对碳排放的抑制作用^[53]。

2000—2008年消费比例对异速增长系数影响显著为负,均值为-0.141,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为-0.144、-0.149、-0.131及-0.117,影响强度自北向南递减。伴随经济快速发展,长三角社会消费需求结构逐渐由生存性消费调整为享受型消费,非基本生活消费需求增加不仅促进产业结构高级化演进,且有利于提高能源利用效率,减少碳排放^[54]。2009—2017年消费比例对异速增长影响为正,均值为0.029,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为0.083、0.003、0.001及0.070,而对苏中、浙中、浙北地区影响为负。伴随出口拉动经济受挫、经济增长进入新常态,刺激消费成为拉动经济增长的重要驱动力,这引致大量生活和生产性投资,加剧了对能源资源的消耗,带动碳排放增多。

2000—2008年固碳水平总体对异速增长系数具有正向影响,均值为0.145,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为0.125、0.019、0.110及0.055,影响强度高值区集聚于安徽省西北部,这是由于工业化、服务业、固定资产投资等快速发展超过区域生态承载能力,使得碳排放量超过林业、农业等碳吸收量^[55],而对大部分苏中、苏南地区影响为负,这些地区由于重视生态绿化建设,生态功能相对较强,碳汇功能大于碳排放量,一定程度上缓解了碳排放压力^[56]。2009—2017年固碳能力对异速增长系数具有负向影响,均值为-0.274,其对安徽省、江苏省、浙江省及上海市异速变化系数影响均值分别为-0.326、-0.360、-0.203及0.070,影响强度高值区分布于皖南、浙西及苏北等地区,对浙东北少数地区的影响为正。伴随生态城市、低碳城市、绿色城市发展理念的渗透,城市化进入新阶段,通过城市绿化建设、绿色建筑投资、绿色低碳生活方式等绿色实践提高固碳能力,对碳排放起到一定抑制作用。而浙江湾区经济带部分县域由于城市蔓延侵占大量平原耕地,破坏土壤碳汇能力,加剧了碳排放^[46]。

综上可见,长三角地区经济增长—碳排放异速增长变化受多因素叠加影响(图6)。其中,人口密度增加通过发挥集聚规模效应促进经济增长与碳排放的正向异速关系向负向异速关系转变;投资强度和财政支出强度通过环保投资挤出效应抑制了经济增长与碳排放的正向异速关系向负向异速关系转变;城市化快速发展和消费提质增效促进经济规模增量,抵消了第一阶段碳排放增长效应,而城市扩张和消费需求对第二阶段经济增长的正向影响受到传统经济增长方式形成的碳排放压力冲击,从而对经济增长—碳排放异速变化表现出先降低后促进的影响;受工业化主导、低端产业集聚及土地利用类型转变的影响,第二产业占比、第三产业占比和固碳水平对第一阶段经济增长—碳排放异速关系具有正向影响,而伴随产业结构的高级化、绿色生态化演进,有效促降了第二阶段经济增长与碳排放异速变化程度。

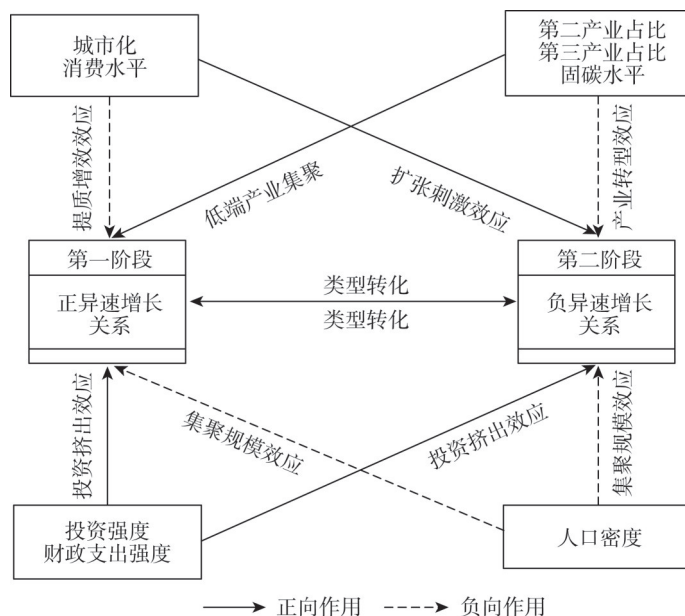


图6 长三角地区经济增长与碳排放异速增长形成机制

Fig. 6 The driving mechanism of allometric growth between economic growth and CO₂ emissions in Yangtze River Delta

3 结论与讨论

3.1 结论

以长三角 2000—2017 年间 236 个地区为研究单元, 本文利用面板灰色关联、异速增长模型、地理探测器模型及多尺度地理加权回归模型探究经济增长—碳排放的时空异速增长规律及形成机制, 得到以下结论:

(1) 长三角地区经济增长与碳排放具有长期正向关联性, 关联强度总体呈“V”型波动变化, 2000—2008 年高关联强度区相对集中分布于苏南、苏北及浙中等地区, 2009—2017 年空间关联强度明显下降, 关联强度整体呈“南低北高”的分布态势, 负向关联强度地区集中分布于皖南、皖西南、浙西北、浙南、浙东北及上海等地区。

(2) 长三角地区经济增长与碳排放异速增长处于经济扩张弱型阶段, 碳排放增速与经济相对增速差距趋于扩大, 2000—2008 年长三角地区经济增长与碳排放异速类型以负异速为主, 空间分布较分散, 2009—2017 年则以负异速二级为主, 且遍布于各省份。

(3) 长三角地区经济增长与碳排放异速增长的阶段变化主要受二产占比、三产占比、城市化率及人口密度共同影响。其中, 人口密度显著负向影响长三角地区经济增长与碳排放异速阶段变化, 投资强度和财政支出强度起到抑制作用, 城市化和消费水平表现出先促进后抵消作用, 而二产业占比、三产业占比及固碳水平则起到先抑制后促进作用。

3.2 讨论

长三角城市群作为绿色高质量发展的先行示范区, 在碳达峰、碳中和的严峻形势下, 亟需合理评价经济增长的碳排放影响。异速增长模型作为识别经济增长碳排放压力的一种有效手段, 既能够定量刻画经济增长—碳排放的脱钩耦合程度, 又能够捕捉经济

增长—碳排放的交互响应规律,为实施针对性碳减排策略提供可靠依据。目前,长三角地区实现了经济增长—碳排放异速变化类型由正异速转变为负异速,但长三角地区经济发展水平差异较大,碳排放不平衡格局显著,导致经济增长—碳排放负异速增长程度呈现明显空间异质性。而这种异质性影响可能会被进一步强化,这是由于伴随生态文明建设与新型工业化运动的开展,经济发达地区通过发挥人口规模集聚、环保投资治理、产业优化转型、土地集约利用等效应,将持续促进碳排放的下降与负异速增长的收缩。今后经济增长—碳排放负异速增长地区应继续淘汰落后产能,优化产业和能源消费结构,提高碳排放绩效;同时,应发挥市场机制调控碳排放交易权,加强低碳技术研发,推进碳减的供需联动与区域联动,从而推动长三角整体经济增长—碳排放异速变化类型持续转负。

诚然,本文还存在一些不足:一是不同时段划分测算的经济增长与碳排放异速增长系数,存在着较大的波动性;二是将不同等级行政单元进行统一比较分析,且未单独考察正负异速类型地区的影响因素,这会导致对形成机制分析的偏误;三是对异速增长类型及其影响因素的分析仅从省域整体视角进行概括,缺乏省域内更细尺度空间划分的对比分析。此外,采用静态的线性模型拟合各样本的异速增长系数,忽略了不同地区的异质性与地区间的交互性。这些均有待进一步深入探究。

参考文献(References):

- [1] SHAN Y L, GUAN D B, HUBACEK K, et al. City-level climate change mitigation in China. *Science Advances*, 2018, 4(6): eaaq0390, Doi: 10.1126/sciadv.aaq0390.
- [2] BROWN M A, SOUTHWORTH F, SARZYNSKI A. The geography of metropolitan carbon footprints. *Policy and Society*, 2009, 27(4): 285-304.
- [3] 张琦峰, 方恺, 徐明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展. *自然资源学报*, 2018, 33(4): 696-708. [ZHANG Q F, FANG K, XU M, et al. Review of carbon footprint research based on input-output analysis. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(4): 696-708.]
- [4] 孟凡鑫, 苏美蓉, 胡元超, 等. 中国及“一带一路”沿线典型国家贸易隐含碳转移研究. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(4): 18-26. [MENG F X, SU M R, HU Y C, et al. Embodied carbon in trade of China and typical countries along the 'Belt and Road'. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(4): 18-26.]
- [5] 王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率SBM模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测. *地理学报*, 2020, 75(6): 1316-1330. [WANG S J, GAO S, HUANG Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(6): 1316-1330.]
- [6] 马静, 柴彦威, 刘志林. 基于居民出行行为的北京市交通碳排放影响机理. *地理学报*, 2011, 66(8): 1023-1032. [MA J, CHAI Y W, LIU Z L. The mechanism of CO₂ emissions from urban transport based on individuals' travel behavior in Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(8): 1023-1032.]
- [7] 杨文越, 梁斐雯, 曹小曙. 多尺度建成环境对居民通勤出行碳排放的影响: 来自广州的实证研究. *地理研究*, 2020, 39(7): 1625-1639. [YANG W Y, LIANG F W, CAO X S. Examining the effects of the multi-scale built environment on residents' CO₂ emissions from commuting: An empirical study of Guangzhou. *Geographical Research*, 2020, 39(7): 1625-1639.]
- [8] DONG K Y, JIANG H D, SUN R J, et al. Driving forces and mitigation potential of global CO₂ emissions from 1980 through 2030: Evidence from countries with different income levels. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 335-343.
- [9] LIU H G, LACKNER K, FAN X M. Value-added involved in CO₂ emissions embodied in global demand-supply chains. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2021, 64(1): 76-100.

- [10] WANG P, WU W S, ZHU B Z, et al. Examining the impact factors of energy-related CO₂ emissions using the STIRPAT model in Guangdong province, China. *Applied Energy*, 2013, 106: 65-71.
- [11] 邓吉祥, 刘晓, 王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 189-200. [DENG J X, LIU X, WANG Z. Characteristics analysis and factor decomposition based on the regional difference changes in China's CO₂ emission. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 189-200.]
- [12] CAI B F, GUO H X, CAO L B, et al. Local strategies for China's carbon mitigation: An investigation of Chinese city-level CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 178: 890-902.
- [13] YANG W Y, ZHOU S H. Using decision tree analysis to identify the determinants of residents' CO₂ emissions from different types of trips: A case study of Guangzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277, Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124071.
- [14] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析. *地理学报*, 2010, 65(9): 1048-1057. [ZHAO R Q, HUANG X J, ZHONG T Y. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1048-1057.]
- [15] 陶玉国, 黄震方, 吴丽敏, 等. 江苏省区域旅游业碳排放测度及其因素分解. *地理学报*, 2014, 69(10): 1438-1448. [TAO Y G, HUANG Z F, WU L M, et al. Measuring carbon dioxide emissions for regional tourism and its factor decomposition: A case study of Jiangsu province. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(10): 1438-1448.]
- [16] 崔盼盼, 赵媛, 郝丽莎, 等. 中国能源行业碳排放强度下降过程中的省际减排成效评价. *地理研究*, 2020, 39(8): 1864-1878. [CUI P P, ZHAO Y, HAO L S. Evaluation on the effectiveness of provincial emission reduction in the process of carbon emission in China's energy industry. *Geographical Research*, 2020, 39(8): 1864-1878.]
- [17] 黄蕊, 钟章奇, 孙翊, 等. 区域分部门贸易的隐含碳排放: 以北京为例. *地理研究*, 2015, 34(5): 933-943. [HUANG R, ZHANG Z Q, SUN Y, et al. Measurements of regional sectoral embodied CO₂ emissions: A case study of Beijing. *Geographical Research*, 2015, 34(5): 933-943.]
- [18] 田华征, 马丽. 中国工业碳排放强度变化的结构因素解析. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 639-653. [TIAN H Z, MA L. Study on the change of China's industrial carbon emission intensity from the perspective of sector structure. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 639-653.]
- [19] 沈杨, 汪聪聪, 高超, 等. 基于城市化的浙江省湾区经济带碳排放时空分布特征及影响因素分析. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 329-342. [SHEN Y, WANG C C, GAO C, et al. Spatio-temporal distribution and its influencing factors of carbon emissions in economic zone of Zhejiang Bay Area based on urbanization. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 329-342.]
- [20] 原嫒, 席强敏, 孙铁山, 等. 产业结构对区域碳排放的影响: 基于多国数据的实证分析. *地理研究*, 2016, 35(1): 82-94. [YUAN Y, XI Q M, SUN T S, et al. The impact of the industrial structure on regional carbon emission: Empirical evidence across countries. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 82-94.]
- [21] 范建双, 周琳. 城镇化及房地产投资对中国碳排放的影响机制及效应研究. *地理科学*, 2019, 39(4): 644-653. [FAN J S, ZHOU L. The mechanism and effect of urbanization and real estate investment on carbon emissions in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(4): 644-653.]
- [22] WU H T, XU L N, REN S Y, et al. How do energy consumption and environmental regulation affect carbon emissions in China? New evidence from a dynamic threshold panel model. *Resources Policy*, 2020, 67, doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101678.
- [23] 余东华, 张明志. “异质性难题”化解与碳排放 EKC 再检验: 基于门限回归的国别分组研究. *中国工业经济*, 2016, (7): 57-73. [YU D H, ZHANG M Z. Resolution of "the heterogeneity difficulty" and re-verification of the carbon emission EKC: Based on the country grouping test under the threshold regression. *China Industrial Economics*, 2016, (7): 57-73.]
- [24] CHEN H X, ZHANG X L, WU R W, et al. Revisiting the environmental Kuznets curve for city-level CO₂ emissions: Based on corrected NPP-VIIRS nighttime light data in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121575.
- [25] LE H P, OZTURK I. The impacts of globalization, financial development, government expenditures, and institutional quality on CO₂ emissions in the presence of environmental Kuznets curve. *Environmental Science and Pollution Re-*

- search, 2020, 27: 22680-22697.
- [26] FRIEDL B, GETZNER M. Determinants of CO₂ emissions in a small open economy. *Ecological Economics*, 2003, 45 (1): 133-148.
- [27] JIANG L, HE S X, ZHONG Z Q, et al. Revisiting environmental Kuznets curve for carbon dioxide emissions: The role of trade. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2019, 50: 245-257.
- [28] AZOMAHOU T, LAISNEY F, VAN NGUYEN P. Economic development and CO₂ emissions: A nonparametric panel approach. *Journal of Public Economics*, 2006, 90(6-7): 1347-1363.
- [29] 冯烽, 叶阿忠. 中国的碳排放与经济增长满足EKC假说吗: 基于半参数面板数据模型的检验. *预测*, 2013, 32(3): 8-12. [FENG F, YE A Z. Does the relationship between economic development and CO₂ emissions in China follow EKC hypothesis? A test based on semiparametric panel data model. *Forecasting*, 2013, 32(3): 8-12.]
- [30] 潘竞虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应. *地理学报*, 2021, 76(1): 206-222. [PAN J H, ZHANG Y N. Spatiotemporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 206-222.]
- [31] 武红, 谷树忠, 关兴良, 等. 中国化石能源消费碳排放与经济增长关系研究. *自然资源学报*, 2013, 28(3): 381-390. [WU H, GU S Z, GUAN X L, et al. Analysis on relationship between carbon emissions from fossil energy consumption and economic growth in China. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(3): 381-390.]
- [32] LEI M, YIN Z H, YU X W, et al. Carbon-weighted economic development performance and driving force analysis: Evidence from China. *Energy Policy*, 2017, 111: 179-192.
- [33] 王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素. *地理学报*, 2019, 74(6): 1131-1148. [WANG S J, HUANG Y Y. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1131-1148.]
- [34] 党耀国, 尚中举, 王俊杰, 等. 基于面板数据的灰色指标关联模型构建及其应用. *控制与决策*, 2019, 34(5): 1077-1084. [DANG Y G, SHANG Z J, WANG J J, et al. Grey incidence model for relationship between indicators of panel data and its application. *Control and Decision*, 2019, 34(5): 1077-1084.]
- [35] 焦利民, 雷伟倩, 许刚, 等. 中国城市标度律及标度因子时空特征. *地理学报*, 2020, 75(12): 2744-2758. [JIAO L M, LEI W Q, XU G, et al. Urban scaling and the spatio-temporal characteristics of scaling exponents in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(12): 2744-2758.]
- [36] 李郇, 陈刚强, 许学强. 中国城市异速增长分析. *地理学报*, 2009, 64(4): 399-407. [LI X, CHEN G Q, XU X Q. Urban allometric growth in China: Theory and facts. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 399-407.]
- [37] WANG J F, ZHANG T L, FU B J. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250-256.
- [38] YU H C, FOTHERINGHAM A S, LI Z Q, et al. Inference in multiscale geographically weighted regression. *Geographical Analysis*, 2019, 52(1): 87-106.
- [39] CHEN J D, GAO M, CHENG S L, et al. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997-2017. *Scientific Data*, 2020, 7, doi.org/10.1038/s41597-020-00736-3.
- [40] WANG Z H, YIN F C, ZHANG Y X, et al. An empirical research on the influencing factors of regional CO₂ emissions: Evidence from Beijing city, China. *Applied Energy*, 2012, 100: 277-284.
- [41] WANG Q, WU S D, ZENG Y E, et al. Exploring the relationship between urbanization, energy consumption, and CO₂ emissions in different provinces of China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 1563-1579.
- [42] WANG S J, LIU X P, ZHOU C S, et al. Examining the impacts of socioeconomic factors, urban form, and transportation networks on CO₂ emissions in China's megacities. *Applied Energy*, 2017, 185: 189-200.
- [43] CHENG S L, CHEN Y T, MENG F X, et al. Impacts of local public expenditure on CO₂ emissions in Chinese cities: A spatial cluster decomposition analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 164, doi.org/10.1016/j.rescon-rec.2020.105217.
- [44] 邵帅, 张曦, 赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径: 广义迪氏指数分解和动态情景分析. *中国工业经济*, 2017, (3): 44-63. [SHAO S, ZHANG X, ZHAO X R. Empirical decomposition and peaking pathway of carbon dioxide emissions of China's manufacturing sector: Generalized divisia index method and dynamic scenario analysis. *China*

- Industrial Economics, 2017, (3): 44-63.]
- [45] ZHA D, ZHOU D D, ZHOU P. Driving forces of residential CO₂ emissions in urban and rural China: An index decomposition analysis. *Energy Policy*, 2010, 38(7): 3377-3383.
- [46] 朱恩燕. 浙江省碳排放时空格局动态及其对城镇化的响应研究. 杭州: 浙江大学, 2020. [ZHU E Y. Study on the spatial-temporal pattern of carbon emission and its response to urbanization in Zhejiang province. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.]
- [47] 李建豹, 黄贤金, 孙树臣, 等. 长三角地区城市土地与能源消费 CO₂ 排放的时空耦合分析. *地理研究*, 2019, 38(9): 2188-2201. [LI J B, HUANG X J, SUN S C, et al. Spatio-temporal coupling analysis of urban land and carbon dioxide emissions from energy consumption in the Yangtze River Delta region. *Geographical Research*, 2019, 38(9): 2188-2201.]
- [48] 韩峰, 谢锐. 生产性服务业集聚降低碳排放了吗: 对我国地级及以上城市面板数据的空间计量分析. *数量经济技术经济研究*, 2017, 34(3): 40-58. [HAN F, XIE R. Does the agglomeration of producer services reduce carbon emissions?. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2017, 34(3): 40-58.]
- [49] 刘书瀚, 于化龙. 城市群生产性服务业集聚对经济增长的空间溢出效应: 基于长三角、珠三角和京津冀城市群的比较分析. *预测*, 2020, 39(4): 83-89. [LIU S H, YU H L. Spatial spillover effect of producer services agglomeration on economic growth in urban agglomerations: Based on the comparative analysis of Yangtze River Delta, Pearl River Delta and Beijing Tianjin Hebei Urban Agglomerations. *Forecasting* 2020, 39(4): 83-89.]
- [50] 陈晓峰, 周晶晶. 生产性服务业集聚、空间溢出与城市绿色全要素生产率: 来自长三角城市群的经验证据. *经济经纬*, 2020, 37(4): 89-98. [CHEN X F, ZHOU J J. Productive services agglomeration, spatial spillover and urban green total factor productivity: Based on the empirical evidence from Yangtze River Delta. *Economic Survey*, 2020, 37(4): 89-98.]
- [51] FU F, MA L W, LI Z, et al. The implications of China's investment-driven economy on its energy consumption and carbon emissions. *Energy Conversion and Management*, 2014, 85: 573-580.
- [52] 余倩倩. 长三角地区产业结构绿色转型升级评价研究. 南京: 南京邮电大学, 2020. [YU Q Q. Research on evaluation of green transformation and upgrade of industrial structure in the Yangtze River Delta region. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.]
- [53] CHENG S L, FAN W, CHEN J D, et al. The impact of fiscal decentralization on CO₂ emissions in China. *Energy*, 2020, 192, doi: 10.1016/j.energy.2019.116685.
- [54] 郭文, 孙涛. 人口结构变动对中国能源消费碳排放的影响: 基于城镇化和居民消费视角. *数理统计与管理*, 2017, 36(2): 295-312. [GUO W, SUN T. Effect of population structure change on carbon emission in China: Based on perspective of urbanization and residents' consumption. *Journal of Applied Statistics and Management*, 2017, 36(2): 295-312.]
- [55] 龙思梦, 杨建州. 长江经济带经济—生态系统评价及碳排放空间分异. *江苏农业学报*, 2020, 36(1): 108-115. [LONG S M, YANG J Z. Economic-ecological system evaluation and carbon emission spatial differentiation in the Yangtze River Economic Belt. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(1): 108-115.]
- [56] 张赫, 彭千芮, 王睿, 等. 中国县域碳汇时空格局及影响因素. *生态学报*, 2020, 40(24): 8988-8998. [ZHANG H, PENG Q R, WANG R, et al. Spatiotemporal patterns and factors influencing county carbon sinks in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(24): 8988-8998.]

Analysis of allometric relationship and formation mechanism between economic growth and carbon emissions in the Yangtze River Delta

LI Zai-jun¹, YIN Shang-gang², JIANG You-xue³, LYU Yu-lan⁴

(1. Research Institute of Central Jiangsu Development, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China;

2. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. School of Finance,

Jiangsu Vocational Institute of Commerce, Nanjing 210007, China; 4. School of Finance, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China)

Abstract: Low-carbon economy is the inherent requirement to achieve high-quality integrated development in the Yangtze River Delta. This paper analyzes the spatiotemporal correlation, allometric growth relationship, and driving forces between economic growth and carbon emissions in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2000 to 2017. The findings show that: (1) There exists a positive correlation between economic growth and carbon emissions in the study area, and the overall correlation intensity presents a "V-shaped" fluctuation. From 2000 to 2008, the areas with high correlation intensity were relatively concentrated in Southern Jiangsu, Northern Jiangsu and Central Zhejiang. From 2009 to 2017, the spatial correlation intensity decreased significantly, and generally presented a spatial pattern of "low in the south and high in the north". (2) The allometric variation between economic growth and carbon emissions is dominated by weak economic expansion, and the allometric relationship between economic growth and carbon emissions in most areas has turned from positive to negative. (3) The geo-detector diagnoses that the proportions of secondary and tertiary industries, as well as urbanization and population density are the main factors driving the allometric variation between economic growth and carbon emissions. (4) Multi-scale geographical weighted regression shows that the population density has a significantly negative impact on allometric variation between economic growth and carbon emissions, investment intensity and the intensity of fiscal expenditure have an inhibitory effect, urbanization and consumption level show the effect of first promoting and then offsetting, while the proportions of secondary and tertiary industries, and the carbon sequestration ability show the effect of first inhibition and then promotion.

Keywords: carbon emissions; economic growth; allometric growth; formation mechanism; Yangtze River Delta region