

# 长三角工业经济规模与污染排放异速关系及互动机制

尹上岗<sup>1,2</sup>, 杨 山<sup>1,2</sup>, 龚海波<sup>1,2</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023;

2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

**摘要:** 正确处理经济增长与环境污染关系是实现区域高质量发展和构建“双循环”新发展格局的关键问题。本文以2000—2018年长三角地区工业经济规模与工业污染指数为研究对象, 构建工业经济规模—污染排放异速增长模型, 分析两者关系的时空变化规律, 并借助增强回归树模型探究异速增长的影响机制。结果表明: ① 长三角地区工业经济规模与工业污染指数空间格局具有较强的稳定性和较高的相似性, 呈现出由东向西递减的空间态势; 随着工业经济规模的扩大, 工业污染指数总体呈下降趋势。② 在纵向异速上, 长三角地区总体沿着经济环境基本协调—经济扩张弱型—经济环境基本协调变化; 在横向异速上, 多数城市工业污染指数相对增速低于工业经济规模增速, 标度指数多呈下降趋势。③ 城市生态基础、能源利用效率、工业发展水平、科技发展水平、对外开放水平和财政投入水平是影响异速增长的主导因子, 这些因素在前期对异速增长具有正向影响, 后期转变为负向影响。④ 经济增长的市场主导与环境保护的政府主导间的错位关系产生经济环境异速增长, 并促使区域一体化出现, 区域一体化与经济环境异速增长相互促进、相互影响。推动长三角地区经济生态一体化建设, 实现绿水青山与金山银山的有机统一, 是实现区域高质量发展的必由之路。

**关键词:** 工业经济规模; 工业污染指数; 异速增长; 增强回归树; 长三角地区

DOI: 10.11821/dlxb202209005

## 1 引言

2000年以来中国经济增速逐渐由高速向中高速转变, 产业结构也在不断调整中, 至2012年第三产业占比超过第二产业。2000—2018年工业增加值占GDP的比由40.15%降至33.90%, 工业污染排放量也呈下降趋势, 其中工业废水排放量和工业二氧化硫排放量分别下降9.89%和72.30%。长期以来, 中国出口导向型经济模式过度依赖资源消耗, 造成严重的环境污染。过分依赖国际市场, 阻碍了“绿水青山”向“金山银山”的转化, 成为经济绿色发展的瓶颈。在此背景下, 党中央提出“逐步形成以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局”, 以推动中国开放型经济向更高层次发展, 促进经济与生态的和谐绿色发展。在快速城镇化进程中, 中国经济发展与生态环境关系虽有所改善, 但环境问题依然严峻, 因此生态城镇化应运而生, 生态文明建设也成为中国特色社会主义事业“五位一体”总体布局的重要组成部分。当前中国生态文明建设正处于压力叠加、负重前行的关键期, 已进入提供更多优质生态产品以满足人民日益增长的优

收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2022-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171200, 41771171) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42171200, No.41771171]

作者简介: 尹上岗(1993-), 男, 安徽太和人, 博士生, 研究方向为城市地理与区域发展。E-mail: yinshanggang@163.com

通讯作者: 杨山(1963-), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 研究方向为城乡发展与国土空间规划。

E-mail: yangshan@njnu.edu.cn

美生态环境需要的攻坚期,也到了有条件有能力解决生态环境突出问题的窗口期。城市群作为城镇化和工业化发展到高级阶段的产物<sup>[1]</sup>,也是中国推进新型城镇化和新型工业化的主要载体,城市群城镇化水平提高和工业集聚在促进地区经济社会繁荣进步的同时,也导致城镇污染和工业污染排放量的增长。在中国经济进入高质量发展阶段,城市群工业经济规模与工业污染排放量间的矛盾仍然尖锐,且可能影响到中国“十四五”期间乃至更长时期经济社会的可持续发展。因此,厘清城市群工业经济规模与工业污染排放量间的关系,不仅满足人民日益增长的优美生态环境需求,也有利于探索城市群绿色发展路径,促进区域持续健康发展和社会全面进步。

经济增长与环境污染关系的问题是经济地理学、区域经济学和环境经济学研究的重要内容<sup>[2-4]</sup>。国际上关于经济增长与环境污染关系的研究始于20世纪90年代,美国经济学家Grossman等通过对空间污染物与地区收入水平的研究,发现经济增长与污染水平呈倒“U”型关系<sup>[5-6]</sup>。Panayotou将经济发展与环境污染间的倒“U”型关系定义为“环境库兹涅茨曲线(Environmental Kuznets Curve, EKC)”<sup>[7]</sup>,此后EKC逐渐成为研究经济水平与环境质量关系的经典理论,引发众多学者的大量实证研究。国内对经济与环境关系的研究开始于20世纪90年代末期,多借助EKC理论进行相关研究。21世纪以来国内外对经济与环境关系的研究增多,研究重点主要集中在经济发展水平与污染物排放量关系<sup>[8-10]</sup>,如工业废水排放与经济增长关系<sup>[11-13]</sup>、大气污染与经济发展关系<sup>[14-16]</sup>、外商投资与环境污染的关系<sup>[17-18]</sup>等,此外还拓展到环境污染的空间格局及驱动因素<sup>[19-21]</sup>、工业化进程中环境污染响应<sup>[2, 22]</sup>、工业污染集聚的空间效应<sup>[10, 23]</sup>等方面。研究方法上,主要运用EKC模型<sup>[11, 14, 18]</sup>、LMDI指数分解模型<sup>[22, 24]</sup>、脱钩指数模型<sup>[8, 25]</sup>、耦合协调度模型<sup>[4, 9]</sup>及空间计量模型<sup>[12, 16, 21, 23]</sup>等方法,分析污染物排放强度与经济发展的关系及影响机制。研究尺度上,以全国层面省级尺度和地级市尺度研究居多<sup>[20-21, 26]</sup>,省域层面的研究主要集中在工业经济较为发达的地区,如广东、江苏和山东等省份<sup>[11, 27-28]</sup>;城市层面主要以东部经济发展水平较高的直辖市或省会为例。随着城市群在引领带动经济发展作用的日益凸显,城市群已成为经济发展与环境污染关系研究的新热点区域,其中京津冀、长三角和粤港澳大湾区三大城市群为学者关注的焦点<sup>[4, 8]</sup>。可见,已有研究主要存在以下不足:①相关研究只是通过建立模型分析经济发展与环境污染间的关系,忽略了经济规模增长速度与环境污染速度间的关系;②EKC、LMDI等模型主要探究经济发展对环境污染的单向作用,环境污染对经济发展的影响考虑不足;③相关研究偏向于省域层面或全国层面的面板数据,忽视了城市群这一重要功能区的空间作用。

鉴于已有研究的不足,本文以中国综合实力最强的长三角城市群为例,构建工业经济规模与污染排放指数的异速增长模型,探究经济发展与环境污染的相对增长关系。在此基础上,引入机器学习(Machine Learning)这一由数据驱动的智能化探索型数据分析技术<sup>[29]</sup>,挖掘异速增长的影响机制,以期扩展经济发展与环境污染关系的研究,实现“绿水青山”向“金山银山”的转化,为长三角更高质量一体化发展提供理论指导与实践依据,更好支撑城市群“双循环”新发展格局及区域可持续发展。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究区域与数据来源

根据2019年12月印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》,长三角地区包括上海市、江苏省、浙江省和安徽省全域,区域面积35.67万km<sup>2</sup>,是中国经济最具活力、

开放程度最高、创新能力最强的区域之一。长三角城市群处于“一带一路”和长江经济带的交汇地带,对长江经济带乃至中国经济发展起到重要的引领作用。

本文以长三角为研究区域,根据2018年行政区划,研究区域内41个地级以上城市为研究的基本单元。以行政区工业增加值表示城市工业经济规模,行政区工业废水排放量、工业二氧化硫排放量和工业烟(粉)尘排放量的综合指数表示城市工业污染排放程度,相关数据来自2001—2019年的各省市统计年鉴、《中国城市统计年鉴》及《中国城市建设统计年鉴》。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 工业污染指数计算** 利用工业废水排放量、工业二氧化硫排放量和工业烟(粉)尘排放量<sup>[21, 30-31]</sup>构建工业污染综合指数。采用熵值法确定3项指标的权重,熵值法能客观真实反映隐含在指标数据中的有效信息,并降低评价的主观性<sup>[32]</sup>。使用极差法对3项指标进行标准化处理,随后计算各指标的信息熵和权重,得到2000—2018年工业废水排放量、工业二氧化硫排放量和工业烟(粉)尘排放量的权重分别为0.5917、0.2606和0.1477,利用加权求和法计算长三角各城市的工业污染指数,其公式如下:

$$P_i = \sum_{j=1}^3 Z_{ij} \times w_j \quad (1)$$

式中:  $P_i$  为  $i$  城市的工业污染综合指数;  $Z_{ij}$  为  $i$  城市  $j$  变量的标准化值;  $w_j$  为  $j$  变量的权重。

**2.2.2 异速增长模型** 异速增长 (Allometric Growth) 是生物学和生态学经典的标度概念,反映生物体局部与整体的几何测度关系<sup>[33]</sup>。异速增长关系通常定义为一个系统的局部相对生长速率与系统整体或系统的另一个局部的相对生长速率的常数比例关系<sup>[34-35]</sup>。异速增长可以分为纵向异速和横向异速,纵向异速增长揭示空间单元在时间序列上的异速关系,横向异速探究不同空间单元在某一时间尺度上的异速关系。异速增长模型计算公式为<sup>[36]</sup>:

$$D_t = aE_t^b \quad (2)$$

对式(2)两边同时取对数,可得:

$$\ln D_t = \ln a + b \ln E_t \quad (3)$$

式中:  $D_t$  为  $t$  时刻城市工业污染指数;  $E_t$  为  $t$  时刻城市工业经济规模;  $a$  为比例系数;  $b$  为标度指数,也被称为异速增长系数。经众多学者研究表明,异速增长系数  $b$  处于  $2/3 \sim 1$  之间,平均值约为  $0.85^{[37-39]}$ ,即  $b = 0.85$  时,工业经济规模与工业污染排放等速增长;  $b > 0.85$  时,为正异速生长,此时工业经济规模相对增速小于工业污染排放相对增速;  $b < 0.85$  时,为负异速生长,此时工业经济规模相对增速大于工业污染排放相对增速。将正、负异速增长分别划分为3级,各异速级别划分标准及特征见表1。

**2.2.3 增强回归树** 增强回归树 (Boosted Regression Tree, BRT) 是基于分类回归树 (Classification And Regression Tree, CART) 算法的一种自学习方法,该方法结合回归树 (Regression Tree) 模型与提升 (Boosting) 算法,通过多次随机选择和自学习建立多重回归树,进而提高回归树模型的稳定性和预测精度<sup>[40-41]</sup>。BRT模型在运算过程中多次随机抽取一定量的数据,分析自变量对因变量的影响程度,剩余数据用于拟合结果的检验,最后对生成的多重回归树取均值并输出。BRT模型在处理不同数据格式时具有较强的灵活性,对预测变量的独立性无需作出事先假设,能够适应复杂的非线性关系,目前该模型已广泛运用到生态学、地理学和环境科学等领域<sup>[42]</sup>。

以长三角地区各城市工业经济规模—污染排放异速增长系数为因变量,建立异速增长的影响因素体系,利用BRT模型对各影响因素与异速增长的关系进行拟合,探测各因

表1 工业经济规模—污染排放异速关系的协调性分级表  
Tab. 1 The coordination classification of allometric growth relationship between the size of industrial economies and the emissions of industrial pollution

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3级	$3 \leq b$	污染扩张强型	污染排放相对增长速度远远高于工业经济规模相对增长速度
	正异速2级	$1 \leq b < 3$	污染扩张弱型	污染排放相对增长速度高于工业经济规模相对增长速度
	正异速1级	$0.85 \leq b < 1$	经济环境基本协调	污染排放相对增长速度稍高于工业经济规模相对增长速度
负异速生长	负异速1级	$0.5 \leq b < 0.85$	经济扩张弱型	污染排放相对增长速度低于工业经济规模相对增长速度
	负异速2级	$0 \leq b < 0.5$	经济扩张强型	污染排放相对增长速度远远低于工业经济规模相对增长速度
	负异速3级	$b < 0$	经济环境有所收缩	污染排放和工业经济规模其中一个减少或同时减少

素在其他因素取均值时，该因素与工业经济规模—污染排放异速增长系数之间的数量关系，并计算各因素对城市间异速增长系数差异的贡献率。BRT模型使用R语言的Dismo包构建，其参数设置如下：树的复杂程度（Tree Complexity）为3，学习速率（Learning Rate）为0.01，其他参数使用默认设置。

3 长三角地区工业经济规模 污染排放异速增长特征

3.1 工业经济规模与污染排放的空间分布格局

计算2000—2018年长三角地区工业污染指数，利用ArcGIS软件自然间断点分级法对2000年和2018年长三角地区工业增加值和工业污染指数进行空间可视化（图1）。

在工业增加值方面，2000年和2018年空间格局较为稳定，均呈自东向西递减的空间态势，上海、苏州、无锡、杭州、宁波长期居于前列，浙江西南部、安徽北部和南部等城市群外围一直处于较低水平。各城市工业增加值均有所增加，其中江苏、安徽中部和东部工业增加值增长较快，城市群平均值由2000年的240亿元上升至2018年的1947亿元。

在工业污染指数方面，工业污染格局也具有较强的稳定性，上海、杭州、苏州、南京等核心城市工业污染排放较高，安徽北部和南部工业污染排放较低。2000—2018年长三角工业污染排放总体呈下降趋势，城市群工业污染指数均值由2000年的0.1218下降至2018年的0.0678，其中上海、南京、杭州、镇江、徐州等城市工业污染排放下降较多，少数城市工业污染排放有所增加，如绍兴、宿迁、无锡、芜湖、马鞍山、嘉兴等城市。

比较工业增加值与工业污染指数的分布特点可以发现，工业增加值与工业污染排放空间格局具有较高的相似性，均呈城市群东部至西部递减的总体趋势，随着工业增加值的增加，工业污染排放呈现出下降态势，即长三角工业污染治理水平不断提高。

3.2 工业经济规模—污染排放的纵向异速关系

建立工业经济规模与污染排放指数的异速增长模型，对其进行双对数线性拟合，得到长三角地区工业经济规模—污染排放异速增长的拟合模型（表2）。

2000—2018年标度指数在0.7903~0.9852范围内波动变化，各年份拟合优度均超过0.67，拟合效果较好。由标度指数的变化特点，将长三角地区工业经济规模—污染排放



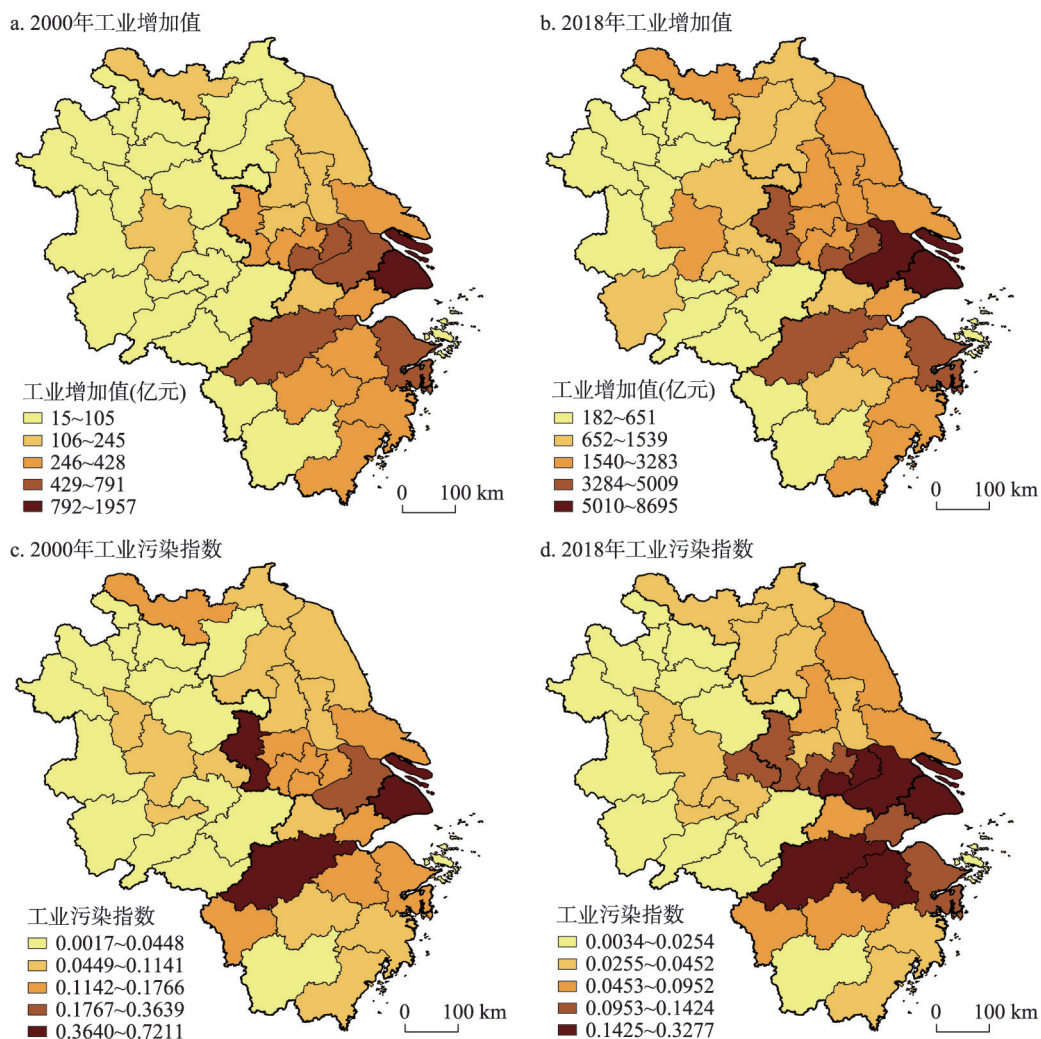


图1 2000年和2018年长三角城市工业经济规模与工业污染指数的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the size of industrial economies and industrial pollution index in the Yangtze River Delta in 2000 and 2018

的纵向异速划分为2000—2009年和2010—2018年两个阶段。2000—2009年标度指数总体呈波动下降趋势，由2000年的0.8611变动至2009年的0.7903，其中2000—2003年标度指数超过0.85，处于污染排放增速稍高于工业经济规模相对增速的经济环境基本协调阶段，2004—2009年标度指数均低于0.85，处于污染排放增速低于工业经济规模相对增速的经济扩张弱型阶段。2010—2018年标度指数表现出波动上升态势，由2010年的0.8627变动至2018年的0.9852，其中2010年、2012—2013年和2016—2018年标度指数高于0.85，2011年和2014—2015年标度指数低于0.85，且均高于0.82，反映出此阶段多处于污染排放增速稍高于工业经济规模相对增速的经济环境基本协调阶段。

总体来看，长三角地区工业经济规模—污染排放异速增长的标度指数呈先降后升的变化趋势，即研究初期和末期标度指数相对较高，多处于经济环境基本协调阶段，研究中期标度指数相对较低，多处于经济扩张弱型阶段。随着工业在国民经济中比重下降，工业经济规模的增速也有所减缓<sup>[43]</sup>，工业污染排放治理面临着巨大挑战。

表2 2000—2018年长三角工业经济规模—污染排放异速增长拟合模型  
Tab. 2 Fitting model of allometric growth between the size of industrial economies and the emissions of industrial pollution in the Yangtze River Delta during 2000-2018

年份	拟合方程	标度指数	拟合优度	异速级别
2000	$\ln D = -3.3321 + 0.8611 \ln E$	0.8611	0.7067	正异速1级
2001	$\ln D = -3.6933 + 0.8869 \ln E$	0.8869	0.7248	正异速1级
2002	$\ln D = -3.4535 + 0.8654 \ln E$	0.8654	0.7365	正异速1级
2003	$\ln D = -3.7496 + 0.8735 \ln E$	0.8735	0.7623	正异速1级
2004	$\ln D = -3.1888 + 0.8250 \ln E$	0.8250	0.7630	负异速1级
2005	$\ln D = -3.2923 + 0.8289 \ln E$	0.8289	0.7738	负异速1级
2006	$\ln D = -2.9271 + 0.7977 \ln E$	0.7977	0.7584	负异速1级
2007	$\ln D = -3.1206 + 0.8008 \ln E$	0.8008	0.7731	负异速1级
2008	$\ln D = -3.8566 + 0.7956 \ln E$	0.7956	0.7379	负异速1级
2009	$\ln D = -3.2194 + 0.7903 \ln E$	0.7903	0.6744	负异速1级
2010	$\ln D = -4.4946 + 0.8627 \ln E$	0.8627	0.7312	正异速1级
2011	$\ln D = -4.3899 + 0.8462 \ln E$	0.8462	0.7423	负异速1级
2012	$\ln D = -5.5241 + 0.9085 \ln E$	0.9085	0.7561	正异速1级
2013	$\ln D = -5.2054 + 0.8835 \ln E$	0.8835	0.7597	正异速1级
2014	$\ln D = -4.6676 + 0.8434 \ln E$	0.8434	0.7230	负异速1级
2015	$\ln D = -4.3140 + 0.8216 \ln E$	0.8216	0.7210	负异速1级
2016	$\ln D = -6.7816 + 0.9558 \ln E$	0.9558	0.7716	正异速1级
2017	$\ln D = -6.9398 + 0.9497 \ln E$	0.9497	0.7297	正异速1级
2018	$\ln D = -7.6318 + 0.9852 \ln E$	0.9852	0.7368	正异速1级

3.3 工业经济规模—污染排放的横向异速关系

由纵向异速增长对标度指数划分的两个阶段，利用工业经济规模与污染排放的异速增长模型，计算2000—2009年、2010—2018年各城市工业经济规模—污染排放异速增长的拟合模型，并对拟合方程的标度指数类型及其变化进行可视化表达（图2）。

2000—2009年长三角地区工业经济规模—污染排放异速类型以负异速为主，负异速增长型城市37个，占有所有城市的90.24%，地域分布较为广泛。负异速城市中，负异速一级城市仅舟山，负异速二级城市25个，占负异速城市的67.57%，主要分布在江苏中部和南部、浙江中部和北部、安徽北部和西部等地区。负异速三级城市11个，占负异速城市的29.73%，主要分布在上海、江苏北部和西南部、安徽中东部等地区。正异速增长型城市4个，占有所有城市的9.76%，其中正异速一级城市仅宣城，正异速二级城市为丽水、黄山和滁州3个。2010—2018年长三角地区工业经济规模—污染排放异速类型均为负异速，其中负异速一级城市仅马鞍山，负异速二级城市仅阜阳，负异速三级城市39个，占长三角的95.12%，广泛分布在各地区。

比较2000—2009年和2010—2018年两个阶段异速类型的变化（图2c），向下变动型（跨级向下和逐级向下）城市29个，占研究区的70.73%。跨级向下型城市5个，其中2000—2009年4个正异速增长城市均跨级向下转变为负异速城市，即丽水、黄山和滁州均由正异速二级降至负异速二级，宣城由正异速一级降至负异速二级，而舟山则由负异速一级降至负异速三级，表明这些城市工业污染排放下降较快，城市环境质量明显提升。逐级向下型城市24个，主要分布在江苏中部和南部、浙江中部和北部、安徽的北部和西部，且这些城市均为负异速二级降至负异速三级，说明这些地区工业污染排放增速

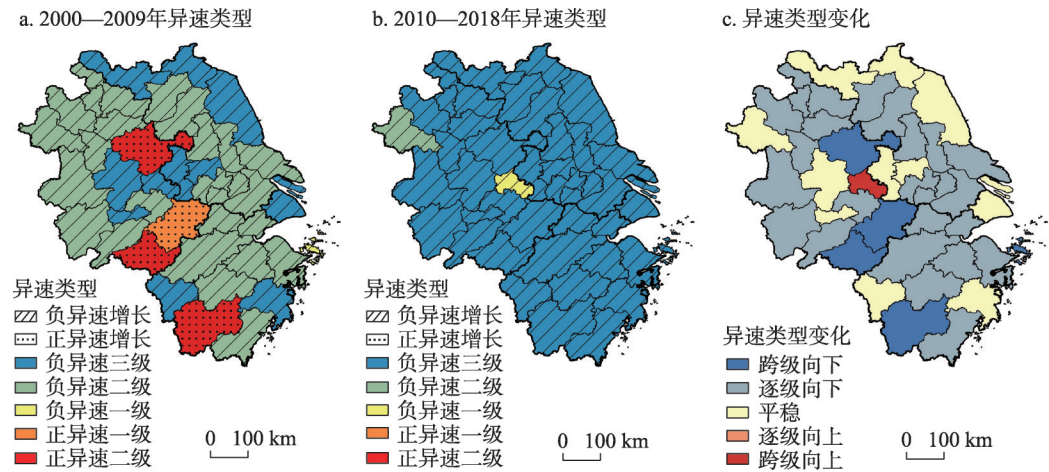


图2 2000—2018年长三角城市异速类型及其变化分布

Fig. 2 The types of allometric growth and their spatial distribution in the Yangtze River Delta during 2008-2018

有所降低，地区环境水平有所提高。平稳型城市11个，占研究区的26.83%，主要分布在上海、江苏北部和西南部、安徽中部等地区，这些地区工业污染排放增速一直保持在较低水平，城市环境质量稳步改善。向上变动型城市仅马鞍山，且由负异速三级跨级向上转变为负异速一级，反映出马鞍山工业污染排放增速虽仍低于工业经济规模相对增速，但工业污染排放增速有所上升。

总体来看，长三角地区多数城市工业污染排放相对增速低于工业经济规模相对增速，且多数城市工业经济规模—污染排放异速增长类型发生了向下变化，即工业污染排放增速与工业经济规模增速的差距逐渐扩大。

4 长三角地区工业经济规模 污染排放异速增长影响因素分析

4.1 影响因素选取

由城市地理学与区域经济学相关理论，结合异速增长及城镇化水平的相关研究<sup>[23, 44]</sup>，依据客观性、科学性与可获得性等原则，选取经济发展水平、工业发展水平、科技发展水平、城镇发展水平、对外开放水平、城市生态基础、设施供给水平、财政投入水平、能源利用效率和地理区位条件10项指标，构建长三角工业经济规模—污染排放异速增长的影响因素体系（表3）。

为消除多重共线性影响，对10项指标进行共线性诊断，利用SPSS软件计算各因素的方差膨胀因子（Variance Inflation Factor, VIF），发现各因素VIF均低于10，即各因素间不存在显著的多重共线性，故将10项指标全部纳入BRT模型。

4.2 因子贡献率及稳健性检验

运用BRT模型分析各因素对2000—2009年和2010—2018年长三角地区工业经济规模—污染排放异速增长的影响，并利用2000—2018年长三角各城市异速增长系数检验BRT模型的稳健性（表4）。

2000—2009年城市生态基础对异速增长的影响最大，贡献率高达42.56%，其次是能源利用效率和工业发展水平，两者贡献率均超过15%，科技发展水平、对外开放水平和财政投入水平贡献率在5%~10%之间，影响处于中等水平，城镇发展水平、设施供给水

表3 异速增长的影响因素  
Tab. 3 Driving factors of allometric growth

影响因素	具体指标	计算方法	单位
经济发展水平	人均GDP	地区生产总值/常住人口	元/人
工业发展水平	工业增加值占GDP比重	工业增加值/地区生产总值	%
科技发展水平	R&D经费支出占GDP比重	R&D经费支出/地区生产总值	%
城镇发展水平	常住人口城镇化率	城镇人口/常住人口	%
对外开放水平	地均使用外资金额	实际使用外资金额/行政区面积	万美元/km <sup>2</sup>
城市生态基础	水面率	城市水域面积/行政区面积	%
设施供给水平	市政公用设施建设投资比重	市政公用设施建设投资/社会固定资产投资	%
财政投入水平	人均财政支出	地方财政支出/常住人口	元/人
能源利用效率	单位GDP用电量	全社会用电量/地区生产总值	kW·h/万元
地理区位条件	地理相对位置	核心区 <sup>①</sup> 、中心区 <sup>②</sup> 和非中心区 <sup>③</sup> 分别赋值1、2、3	-

注：① 2010年颁布的《长江三角洲地区区域规划》指出，长三角核心区为上海、南京、苏州、无锡、常州、镇江、扬州、泰州、南通、杭州、宁波、湖州、嘉兴、绍兴、舟山、台州16个城市；② 2019年印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》指出，长三角中心区为上海、南京、无锡、常州、苏州、南通、扬州、镇江、盐城、泰州、杭州、宁波、温州、湖州、嘉兴、绍兴、金华、舟山、台州、合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州、宣城27个城市，本文中心区（不含核心区）为27个城市除核心区外的11个城市；③ 非中心区为三省一市除核心区、中心区（不含核心区）外剩余的14个城市。

表4 各因素对异速增长的贡献率及其排名  
Tab. 4 Relative contribution and its ranking of each factor to allometric growth

影响因素	2000—2009年		2010—2018年		2000—2018年	
	贡献率(%)	贡献率排名	贡献率(%)	贡献率排名	贡献率(%)	贡献率排名
经济发展水平	1.69	9	1.57	7	1.49	9
工业发展水平	15.81	3	16.33	2	15.76	3
科技发展水平	6.37	4	6.82	4	5.86	5
城镇发展水平	2.99	7	2.62	6	3.72	6
对外开放水平	5.91	5	6.01	5	6.14	4
城市生态基础	42.56	1	47.72	1	44.36	1
设施供给水平	2.19	8	0.95	9	1.58	8
财政投入水平	5.22	6	1.39	8	3.66	7
能源利用效率	16.70	2	16.07	3	16.75	2
地理区位条件	0.56	10	0.52	10	0.68	10

平、经济发展水平和地理区位条件影响较小，贡献率不足5%。2010—2018年城市生态基础对异速增长的影响依然最大，贡献率升至47.72%，工业发展水平和能源利用效率的影响次之，贡献率均在16%附近，科技发展水平和对外开放水平贡献率超过5%，城镇发展水平、经济发展水平、财政投入水平、设施供给水平和地理区位条件影响较小，贡献率低于5%。

比较2000—2009年和2010—2018年两个时间段各因素贡献率的差异发现，工业发展水平、科技发展水平、对外开放水平和城市生态基础对异速增长的贡献率呈增加势头，其中城市生态基础贡献率增加最多，达到5.16%，对两个阶段异速增长的影响均保持在第一位。工业发展水平、科技发展水平和对外开放水平贡献率增加均低于1%，其中工业发展水平影响程度由第三位上升至第二位。经济发展水平、城镇发展水平、设施供给水平、财政投入水平、能源利用效率和地理区位条件对异速增长的贡献率呈减少趋势，其中财政投入水平和设施供给水平分别下降3.83%和1.24%，对异速增长的影响也分别由第



六位和第八位下降至第八位和第九位,经济发展水平、城镇化发展水平、能源利用效率和地理区位条件贡献率下降均不超过1%。

由表4知,3个时段城市生态基础、能源利用效率和工业发展水平对异速增长的影响均居前3位,其中城市生态基础贡献率超过40%,能源利用效率和工业发展水平贡献率均高于15%,且2000—2018年贡献率与另两个阶段相差不足1%。3个时段对外开放水平和科技发展水平的贡献率均在5%以上,且相差较小,贡献率排名相近,城镇化发展水平、财政投入水平、设施供给水平、经济发展水平和地理区位条件的影响均保持在较低水平。总体来看,2000—2018年各因素贡献率与2000—2009年和2010—2018年相差较小,各因素贡献率排名基本相同或相近,进而验证了BRT模型的稳健性与可靠性。

### 4.3 主导因子影响规律

对2000—2009年和2010—2018年两个时段各因素贡献率取均值,选取平均贡献率排名前六位作为主导因子,分别为城市生态基础、能源利用效率、工业发展水平、科技发展水平、对外开放水平和财政投入水平。主导因子平均贡献率均高于3%,表明其对于长三角地区工业经济规模—污染排放异速增长具有较强的作用,故绘制主导因子影响力变化图(图3、图4)。图中曲线表示随主导因子取值变化,其对异速增长影响程度的变化,边际效应数值越大表示影响程度越大。

(1) 经济因素主导的影响。经济发展水平、城镇发展水平、对外开放水平和财政投入水平等因素主要表现为对工业经济规模的影响,其中对外开放水平和财政投入水平为主导驱动因子。地均使用外资金额对工业经济规模—污染排放异速增长的影响由正向转变为负向,且呈负相关关系,主要因为研究前期对外开放水平较低,引入的外企包含众多污染性行业,但随着对外水平的提高及工业污染防治的加强,工业污染在一定程度上得到了遏制。地方财政支出推动社会生产力发展和维持社会稳定,为经济发展营造良好的社会环境,财政投入水平对异速增长的影响也逐渐由正向转为负向,且呈正相关关系。

(2) 环境因素主导的影响。城市生态基础和能源利用效率主要表现为对环境污染的影响,且均为主导驱动因子,平均贡献率分别居第一位和第二位。水面率可以反映城市的水环境容量,水体既具有较大的纳污能力和净污功能,还能改善城市小气候,使城市生态环境得到改善,因此,城市生态基础对异速增长的影响最大,对异速增长的边际效应也逐渐由正向转为负向,且呈负相关关系。目前中国工业的发展需要消耗大量的电力等能源<sup>[45]</sup>,随之带来较为严重的环境污染(如水、大气、土壤等污染),故研究前期能源效率较低,对异速增长的边际效应为正。随着生态文明建设纳入到中国特设社会主义事业“五位一体”总体布局中,各级政府对生态环境的重视程度日益增加,能源利用效率得到较大提高,研究后期能源利用效率对异速增长的边际效应多为负向,且呈负相关关系。

(3) 经济和环境双重作用的影响。工业发展水平、科技发展水平、设施供给水平、地理区位条件对工业经济规模与环境污染均会产生一定的影响,其中工业发展水平和科技发展水平为主导驱动因子。2000—2018年长三角工业增加值占GDP比重呈先增加后减少的变化趋势,至2014年长三角第三产业增加值占GDP比重超过第二产业,即城市经济规模增加对第二产业(主要为工业)的依赖性逐渐降低,转而越来越依靠第三产业,故前期工业增加值占GDP比重较高时对异速增长影响为正,后期工业增加值占GDP比重逐渐降低时对异速增长的影响转变为负向。科技发展水平增强为经济发展注入新动力,促进经济发展方式转变、增长动力转换和产业结构优化,推动城市绿色发展,打赢污染防治攻坚战,保护和修复生态系统,建设天蓝、地绿、水清的美丽中国,从而加快推进生态文明建设,故研究后期科技发展水平越高对异速增长的负向影响也就越大。

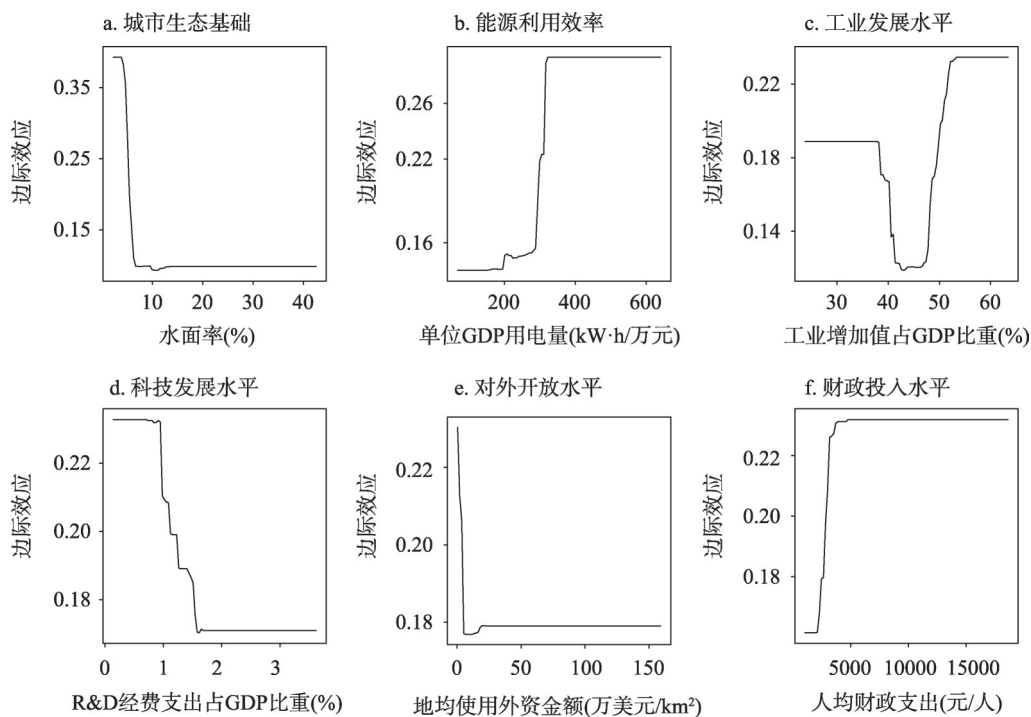


图3 2000—2009年主导因子对异速增长的边际效应

Fig. 3 Marginal effect of dominant factors on allometric growth during 2000-2009

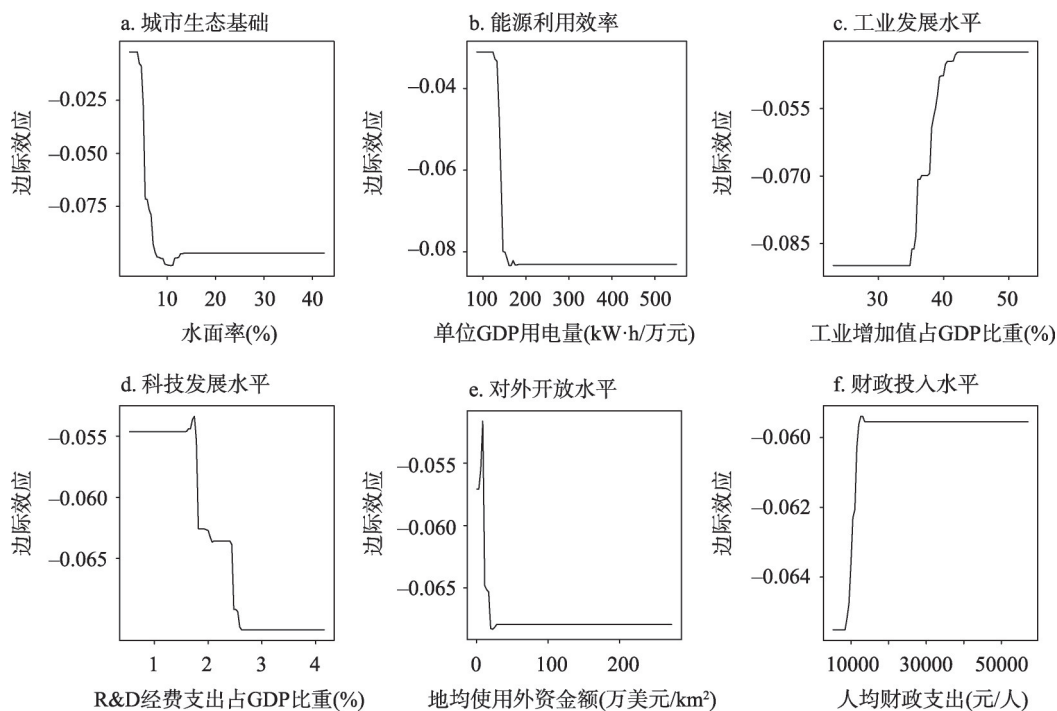


图4 2010—2018年主导因子对异速增长的边际效应

Fig. 4 Marginal effect of dominant factors on allometric growth during 2010-2018

综合分析，长三角地区工业经济规模—污染排放异速增长是多种因素综合作用的结果，其中经济发展水平、城镇发展水平、对外开放水平和财政投入水平主要表现为对工业经济规模的影响，城市生态基础和能源利用效率主要表现为对工业污染排放的影响，工业发展水平、科技发展水平、设施供给水平和地理区位条件则表现为对工业经济规模和污染排放的双重影响（图5）。

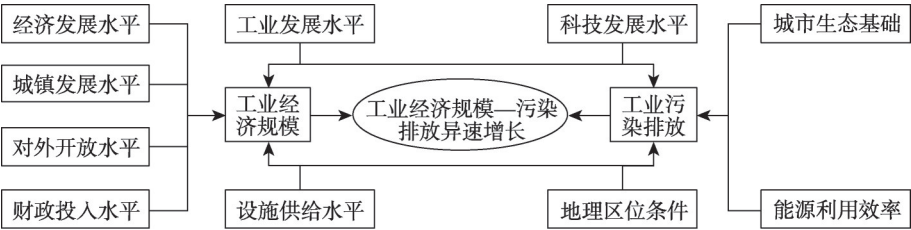


图5 工业经济规模—污染排放异速增长驱动机制

Fig. 5 Driving mechanism of allometric growth between the size of industrial economies and the emissions of industrial pollution

## 5 长三角一体化与经济环境异速增长的互动机制

### 5.1 区域一体化对经济环境异速增长的影响

一体化是区域发展的显著特征，也是区域增强竞争力的必由手段与务实选择<sup>[46]</sup>。长三角作为中国区域一体化程度最高的城市群之一，区域经济虽然仍保持较快的增长趋势，具有较强的经济活力，但也面临着环境污染和生态破坏等问题。区域一体化进程中，长三角地区经济环境异速增长既有挑战也有机遇。

1997年长三角城市经济协调会的成立大大推进了长三角区域经济一体化进程，至2019年10月蚌埠、黄山、六安、淮北、宿州、亳州和阜阳7个城市加入协调会，沪苏浙皖41个城市全部纳入长三角一体化范畴，即长三角一体化是一个不断推进的过程。2010年前，由于长三角一体化程度相对较低，城市间的人口、产业、资金、技术等要素流动较慢，不同城市在经济发展和环境治理中各自为政，城市的“空间一体化（Spatial Integration）”，即单个城市的独自发展影响了区域一体化进程，城市间缺乏有效的统筹协调，区域环境污染的防治进度较慢。在此背景下，长三角经济环境异速增长关系也发生相应的变化，2000—2009年长三角各城市工业经济规模—污染排放横向异速增长类型多样，且异速增长系数相对较高，2000—2003年纵向异速也出现了工业污染排放相对增速稍高于工业经济规模增速的情况。2010年后长三角地区一系列区域融合发展政策的推行与实施，城市的“空间非一体化（Spatial Non-Integration）”，即城市间联系的强化促进了区域一体化进程，尤其长三角区域一体化发展上升为国家战略，区域经济和生态环境一体化程度不断提高。在区域一体化进一步加强的背景下，2010—2018年长三角各城市工业经济规模—污染排放横向异速增长类型趋于同质化，且均为负异速增长，经济环境异速增长关系逐渐改善。

### 5.2 经济环境异速增长对区域一体化的影响

经济增长与环境污染的关系是区域发展需要迫切解决的现实问题，亦是各国政府、社会和学者普遍关注的热点问题。长三角工业经济规模与污染排放的纵向异速增长关系总体上由正异速转变为负异速，之后又转变为正异速，异速增长系数呈先下降后上升趋势。研究前期，长三角地区经济环境异速增长关系趋于改善，区域整体处于由经济环境

基本协调向经济扩张的转变阶段,为区域一体化的推进提供了一定的契机。在此背景下,上海等核心城市着重发挥辐射带动作用,加强与周边地区的经济联系,扩大合作领域和丰富合作形式,并通过协调机制建设保障城市合作,如长三角城市经济协调会的成立并不断扩容,反映出经济环境异速增长状况的优化为区域一体化的加深提供了有利条件,经济和生态环境一体化推动了区域一体化进程。

在产业转移初期,区域经济发展水平较高的城市往往将产业技术含量较低、环境污染较重企业转移至经济欠发达地区,从而使本地区经济环境异速关系有所改善,产业转入地区经济环境异速状况有所恶化。2000—2009年滁州、黄山、宣城和丽水为污染排放相对增速高于工业经济规模相对增速的正异速增长类型,这些城市自身经济发展水平相对较低,且靠近长三角经济发达的城市,受周边发达地区产业转移的影响,城市工业污染排放呈快速增长趋势,经济环境异速关系逐渐突出,但经济联系的加强在一定程度上也促进了区域一体化。

随着经济发展质量提高和生态文明理念的逐渐重视,及国内国际双循环互促新发展格局的逐步形成,城市 and 区域的发展更加注重质量与效益的提升。上海、南京和杭州等城市率先举起高质量发展大旗,进行产业结构优化与调整,一方面增强自身经济发展的实力,提高城市生态环境品质,使得2010—2018年长三角多数城市工业经济规模—污染排放异速增长关系有所改善,另一方面通过区域间相互联系,加深区域一体化进程。在区域经济由高速增长转向高质量发展的关键阶段,长三角地区工业增加值比重逐渐降低<sup>[47]</sup>,工业规模增速有所减缓,工业经济规模—污染排放纵向异速增长问题又逐渐显现。

### 5.3 区域一体化与经济环境异速增长的互动机制

在长三角更高质量一体化发展的进程中,政府和市场的力量均需要合理使用,使市场在资源配置中起决定性作用和更好发挥政府作用。市场一体化作为长三角区域高质量一体化发展的基础和关键<sup>[48]</sup>,只有市场机制才能自动协调一体化发展的经济共享效应,调节和解决一体化进程中的各方利益冲突。区域一体化也需要政府的强力推动,政府对生态环境强有力且长期的监管、治理与保护,为城市发展营造良好环境,弥补市场机制的缺陷与不足,优化资源配置。经济增长的市场主导性与环境保护的政府主导性,两者主导力的错位最终形成了长三角经济环境异速增长的空间格局。

长三角纵向异速与横向异速的差异表明,即使各城市污染排放相对增速低于工业经济规模增速,但由于区域生态环境一体化进程较慢,环境污染的跨区域协同治理有待于进一步完善,故仍存在少数城市工业污染排放有所增加的现象,导致区域整体污染排放相对增速稍高于工业经济规模增速。在影响因素上,各主导因子对异速增长的影响由前期的正向转变为后期的负向,反映出在一体化初期,区域对资金、人口、技术等诸多要素的资源配置能力较差,环境治理水平较弱,从而在经济发展中产生一系列的环境问题,在一体化程度加深后,区域协同利用要素的能力不断增强,环境协同治理水平也逐渐提高,经济发展与环境污染的异速关系也随之改善。随着长三角地区的不断扩容,区域各城市在加强经济联系的同时,还应在生态环境方面进一步加强协同治理,使城市既实现自身的绿色发展,更能共同打造“绿色长三角”,推动长三角经济与环境的协调发展。

随着中国经济发展逐渐步入新常态,经济下行压力增大,经济增长逐渐由高速向中高速乃至中低速转变,稳增长与调结构、稳增长与保环境等均存在两难选择。单个城市已经很难独立解决资源高效利用、环境污染有效治理等经济环境异速增长产生的问题,故借助地缘邻近、资源互补和比较优势等条件,加强与周边地区联系,最终形成一体化区域<sup>[49-50]</sup>,以求在经济发展共享、资源优化配置、环境协同治理等方面发挥更大的作用。



经济环境异速增长问题催生了区域一体化,区域一体化的推进也有利于经济环境异速增长问题的改善,经济环境异速增长关系的缓和又促进了区域一体化进程,区域一体化与经济环境异速增长相互促进、相互影响(图6)。在长三角一体化不断深化的过程中,区域经济环境异速增长关系不断变化,反映出行政力量与市场力量、经济动力与环境动力的博弈。因此,协调行政与市场的关系,平衡经济发展与环境保护的关系成为区域高质量发展迫切需要解决的重要问题。

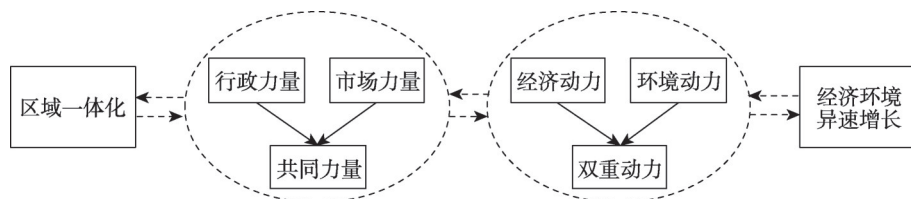


图6 一体化与异速增长的双向关系

Fig. 6 Bilateral relationships between regional integration and allometric growth

## 6 结论与讨论

本文以长三角地区三省一市的41个城市为研究对象,探究2000—2018年城市工业经济规模与工业污染指数间的异速增长规律,借助机器学习中的BRT模型分析异速增长的影响机制,得到以下结论:

(1) 长三角地区工业经济规模与工业污染排放空间格局具有较强的稳定性和较高的相似性,呈现出由东向西递减的空间态势。工业经济规模—污染排放纵向异速增长系数呈先下降后上升趋势,其发展特征由经济环境基本协调转变为经济扩张弱型,又转变为经济环境基本协调。在横向异速上,长三角大多数城市工业污染排放相对增速低于工业经济规模增速,且70%以上的城市异速增长类型向下变动。

(2) 城市生态基础、能源利用效率、工业发展水平、科技发展水平、对外开放水平和财政投入水平是影响异速增长的主导因子。经济发展水平、城镇发展水平、对外开放水平和财政投入水平主要表现为对工业经济规模的影响,城市生态基础和能源利用效率反映出对工业污染排放的影响,工业发展水平、科技发展水平、设施供给水平和地理区位条件呈现出对工业经济规模和污染排放的双重影响,长三角地区工业经济规模—污染排放异速增长是这些因素综合作用结果。

(3) 经济增长的市场主导性与环境保护的政府主导性间的错位关系产生了经济环境异速增长问题,经济环境异速增长使区域一体化的出现成为可能,区域一体化的加深更有利于经济环境异速增长问题的缓和及解决,区域一体化与经济环境异速增长之间相互促进、相互影响。随着长三角区域一体化发展持续深入推进,区域工业经济规模—污染排放异速增长关系或将有所改善,从而促进一体化质量的加速提升。

随着“双循环”新发展格局逐渐形成,中国经济增长也由高增速向高质量转变,虽然经济增长与污染排放“脱钩”的绿色发展理念深入人心,但工业经济规模与污染排放的矛盾仍然存在并影响到区域经济社会的可持续发展。长三角地区作为拉动中国经济增长的重要引擎和参与国际竞争的重要平台,对长三角工业经济规模—污染排放异速增长规律的研究,可以促进区域转变经济发展方式,实现绿色创新发展,推动长三角更高质量一体化发展,带动长江经济带和中国经济社会持续发展繁荣,对其他城市群和地区的

经济环境协调发展提供实践经验。伴随着长三角区域一体化发展上升为国家战略,长三角地区已从城市异速增长的空间博弈转向协调发展的关键阶段,此时更应协调经济发展与生态环境保护间的关系,通过增加科技投入、提高能源利用效率、加大生态环保领域基础设施建设,推动地区经济稳步增长,提升生态环境治理水平。此外,还应深入推进长三角区域一体化进程,积极探索跨区域生态补偿机制,加强区域生态环境联防联控联治,更好满足人民日益增长的优美生态环境需要,促进地区经济社会持续健康发展。结合本文的研究发现,下一步可分区探测异速增长影响因素的空间异质性,或探析正负异速影响因素区别及其差异机理,以期揭示不同区域不同类型异速增长驱动力的区域差异,还可以借助系统动力学模型、人工神经网络模型等预测工业经济规模与污染排放异速增长的发展趋势,为地区经济环境协调发展提供更具针对性的意见和建议,实现“绿水青山”与“金山银山”的有机统一。

### 参考文献(References)

- [1] Fang Chuanglin. Progress and the future direction of research into urban agglomeration in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1130-1144. [方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向. *地理学报*, 2014, 69(8): 1130-1144.]
- [2] Jin Chunyu, Wu Anbing. An empirical study on the nonlinear effects of industrial economic structure and economic growth on environmental pollution. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(10): 64-73. [金春雨, 吴安兵. 工业经济结构、经济增长对环境污染的非线性影响. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(10): 64-73.]
- [3] Kube R, Löschel A, Mertens H, et al. Research trends in environmental and resource economics: Insights from four decades of JEEM. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2018, 92: 433-464.
- [4] Zhang Guojun, Wang Juehan, Wu Kunjin, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of coordination between economic and environmental development of three major urban agglomerations in China. *Geographical Research*, 2020, 39(2): 272-288. [张国俊, 王珏晗, 吴坤津, 等. 中国三大城市群经济与环境协调度时空特征及影响因素. *地理研究*, 2020, 39(2): 272-288.]
- [5] Grossman G M, Krueger A B. *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement*. Cambridge: National Bureau of Economic Research, 1991.
- [6] Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment. *Quarterly Journal of Economics*, 1995, 110(2): 353-377.
- [7] Panayotou T. *Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development*. Geneva: International Labor Office, 1993.
- [8] Gai Mei, Hu Hangai, Ke Lina. Decoupling analysis between economic development and resources and environment of the Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(2): 185-198. [盖美, 胡杭爱, 柯丽娜. 长江三角洲地区资源环境与经济增长脱钩分析. *自然资源学报*, 2013, 28(2): 185-198.]
- [9] Zou Hui, Duan Xuejun. Pattern evolution of economy-environment coordinated development in the Changjiang River Economic Belt. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(9): 1408-1417. [邹辉, 段学军. 长江经济带经济—环境协调发展格局及演变. *地理科学*, 2016, 36(9): 1408-1417.]
- [10] Zhang J, Zhang K, Zhao F. Spatial effects of economic growth, energy consumption and environmental pollution in the provinces of China: An empirical study of a spatial econometrics model. *Sustainable Development*, 2020, 28(4): 868-879.
- [11] Zhou Jing, Yang Guishan. Study on the evolvement of the relationship between industrial wastewater discharge and economic growth in Jiangsu Province. *Geographical Research*, 2007, 26(5): 931-939. [周静, 杨桂山. 江苏省工业废水排放与经济增长的动态关系. *地理研究*, 2007, 26(5): 931-939.]
- [12] Chen Guiyue, Li Haitao, Liang Tao. The relationship between industrial waste discharge and economic growth in Shanxi, China. *Resources Science*, 2013, 35(6): 1184-1193. [陈桂月, 李海涛, 梁涛. 山西省工业废弃物排放与经济增长之间的关系分析. *资源科学*, 2013, 35(6): 1184-1193.]
- [13] Yuan Q, McIntyre N, Wu Y P, et al. Towards greater socio-economic equality in allocation of wastewater discharge permits in China based on the weighted Gini coefficient. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 127: 196-205.
- [14] Yan Lanling, Xu Hailan, Tang Wei, et al. On the relationship between the atmospheric pollutant emission and industrial development based on EKC in Hangzhou. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(Suppl.2): 147-150.

- [ ] 闫兰玲, 徐海岚, 唐伟, 等. 城市大气污染物排放与产业发展关系研究: 基于杭州市EKC曲线的实证分析. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(增刊2): 147-150.]
- [15] Fan Qingxin, Ding Da, Feng Zhe, et al. The relationship between GDP per capita and atmospheric pollution in Harbin. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(5): 71-77. [樊庆铎, 丁达, 冯喆, 等. 哈尔滨市人均GDP和大气污染的关系研究. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 71-77.]
- [16] Sinha A, Sen S. Atmospheric consequences of trade and human development: A case of BRIC countries. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, 7(6): 980-989.
- [17] Wei Long, Pan An. Do export and FDI aggravate environmental pollution in resources-based cities? An empirical analysis based on panel data of 285 prefecture cities in China. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(1): 17-27. [魏龙, 潘安. 出口贸易和FDI加剧了资源型城市的环境污染吗? 基于中国285个地级城市面板数据的经验研究. 自然资源学报, 2016, 31(1): 17-27.]
- [18] Sabir S, Qayyum U, Majeed T. FDI and environmental degradation: The role of political institutions in South Asian countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(26): 32544-32553.
- [19] Nonnemacher M, Jakobs H, Viehmann A, et al. Spatio-temporal modelling of residential exposure to particulate matter and gaseous pollutants for the Heinz Nixdorf Recall Cohort. *Atmospheric Environment*, 2014, 91: 15-23.
- [20] Zhou Kan, Fan Jie. Regional disparity of environmental pollution source and its socio-economic influencing factors: Based on the cross-section data of 339 cities at prefecture level or above in China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 1911-1925. [周侃, 樊杰. 中国环境污染源的区域差异及其社会经济影响因素: 基于339个地级行政单元截面数据的实证分析. 地理学报, 2016, 71(11): 1911-1925.]
- [21] Li Hua, Zhao Xueyan, Wang Weijun, et al. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of urban industrial pollution in China based on multi-scales: 2005-2015. *Geographical Research*, 2019, 38(8): 1993-2007. [李花, 赵雪雁, 王伟军, 等. 基于多尺度的中国城市工业污染时空分异及影响因素. 地理研究, 2019, 38(8): 1993-2007.]
- [22] Fujii H, Managi S, Kaneko S. Decomposition analysis of air pollution abatement in China: Empirical study for ten industrial sectors from 1998 to 2009. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 59: 22-31.
- [23] Jia Zhuo, Qiang Wenli, Wang Yueju, et al. The spatial characteristics and spatial effect of industrial pollution agglomeration in Lanzhou-Xining urban agglomeration. *Economic Geography*, 2020, 40(1): 68-75, 84. [贾卓, 强文丽, 王月菊, 等. 兰州—西宁城市群工业污染集聚格局及其空间效应. 经济地理, 2020, 40(1): 68-75, 84.]
- [24] Zhang Tongbin, Li Jinkai, Cheng Liyan. Intrinsic correlation among economic structure, growth mode and environmental pollution: Empirical analysis based on the TVP-VAR model. *China Environmental Science*, 2016, 36(7): 2230-2240. [张同斌, 李金凯, 程立燕. 经济结构、增长方式与环境污染的内在关联研究: 基于时变参数向量自回归模型的实证分析. 中国环境科学, 2016, 36(7): 2230-2240.]
- [25] Ward J D, Sutton P C, Werner A D, et al. Is decoupling GDP growth from environmental impact possible? *PLOS ONE*, 2016, 11(10): e0164733. DOI: 10.1371/journal.pone.0164733.
- [26] Zhang Yuan, Wu Fengping. Study on the effect of decomposition factors of industrial wastewater discharge in China based on LMDI method. *Industrial Economics Research*, 2015, 14(6): 99-110. [章渊, 吴凤平. 基于LMDI方法我国工业废水排放分解因素效应考察. 产业经济研究, 2015, 14(6): 99-110.]
- [27] Duan Xiaofeng, Xu Xuegong. The relationship between pollutant emission and economic development in Shandong province. *Progress in Geography*, 2010, 29(3): 342-346. [段晓峰, 许学工. 山东省污染物排放与经济发展水平的关系. 地理科学进展, 2010, 29(3): 342-346.]
- [28] Wang Bing, Liu Guangtian. Exploring the source of economic growth under energy conservation and emission reduction constrain: An empirical study based on BDDFM. *On Economic Problems*, 2015, 37(10): 7-13, 39. [王兵, 刘光天. 节能减排约束下经济增长动力探究: 基于BDDFM的实证研究. 经济问题, 2015, 37(10): 7-13, 39.]
- [29] Zhang Chen, Huang Zhenfang, Zhang Jie, et al. Urban tourism destination personality and its cultural landscape representation via machine learning: A case study of Nanjing. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(10): 1886-1903. [张郴, 黄震方, 张捷, 等. 基于机器学习的南京市旅游地个性及其文化景观表征. 地理学报, 2017, 72(10): 1886-1903.]
- [30] Zhang Yue, Wang Tuzhan, Liu Li. Impact of industrial pollution on labor agglomeration in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(10): 1654-1662. [张跃, 王图展, 刘莉. 中国市域工业污染对劳动力集聚的影响研究. 地理科学, 2019, 39(10): 1654-1662.]
- [31] Wu Jiawei, Chen Wen, Geng Pei, et al. Changing distribution of industrial pollution and its driving forces in the context of economic transition: A case study of the Yangtze River Delta, China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(3): 535-546. [吴加伟, 陈雯, 耿佩, 等. 经济转型背景下工业污染时空格局演变及其驱动因素研究: 以长江三角洲地区为例. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 535-546.]
- [32] Jiang Xiaoyan, Wu Xiangli. Quantitative investigation of the coordinated development of ecology-economy-society in

- forest resource-based city: A case study of Yichun, Heilongjiang province. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(21): 8396-8407. [姜晓艳, 吴相利. 林业资源型城市生态—经济—社会协调发展的定量测度: 以黑龙江省伊春市为例. *生态学报*, 2021, 41(21): 8396-8407.]
- [33] Beckmann M J. City hierarchies and the distribution of city size. *Economic Development and Cultural Change*, 1958, 6(3): 243-248.
- [34] Chen Yanguang. The rise, fall, and revival process of allometric scaling analysis in urban studies. *Geographical Research*, 2013, 32(6): 1033-1045. [陈彦光. 城市异速标度研究的起源、困境和复兴. *地理研究*, 2013, 32(6): 1033-1045.]
- [35] Marshall J D. Urban land area and population growth: A new scaling relationship for metropolitan expansion. *Urban Studies*, 2007, 44(10): 1889-1904.
- [36] Chen J H, Fei Y J, Wan Z, et al. Allometric relationship and development potential comparison of ports in a regional cluster: A case study of ports in the Pearl River Delta in China. *Transport Policy*, 2020, 85: 80-90.
- [37] Li Xun, Chen Gangqiang, Xu Xueqiang. Urban allometric growth in China: Theory and facts. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 399-407. [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.]
- [38] Sun Zaihong, Yuan Yuan, Wang Yahua, et al. Research on city-size distribution and allometric growth in Jiangsu province based on fractal theory. *Geographical Research*, 2011, 30(12): 2163-2172. [孙在宏, 袁源, 王亚华, 等. 基于分形理论的江苏省城市规模分布与异速生长特征. *地理研究*, 2011, 30(12): 2163-2172.]
- [39] Ma Yuxiang, Zhang Junmin, Wang Lihong. City-size distribution and allometric growth in Xinjiang based on fractal theory. *Arid Land Geography*, 2018, 41(3): 661-667. [马玉香, 张军民, 王莉红. 基于分形理论的新疆城市规模分布及异速生长特征研究. *干旱区地理*, 2018, 41(3): 661-667.]
- [40] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802-813.
- [41] Li Chunlin, Liu Miao, Hu Yuanman, et al. Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3): 727-737. [李春林, 刘淼, 胡远满, 等. 基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析. *生态学报*, 2014, 34(3): 727-737.]
- [42] Ge Yue, Wang Mingxin, Sun Xiangwu, et al. Variation analysis of daily PM<sub>2.5</sub> concentrations based on boosted regression tree: A case study in Changzhou. *Environmental Science*, 2017, 38(2): 485-494. [葛跃, 王明新, 孙向武, 等. 基于增强回归树的城市 PM<sub>2.5</sub> 日均值变化分析: 以常州为例. *环境科学*, 2017, 38(2): 485-494.]
- [43] Wei Houkai, Wang Songji. Phenomenon analysis and theoretical reflection of China's "over de-industrialization". *China Industrial Economics*, 2019, 37(1): 5-22. [魏后凯, 王颂吉. 中国“过度去工业化”现象剖析与理论反思. *中国工业经济*, 2019, 37(1): 5-22.]
- [44] Zhang Yongfang. Evolution characteristics and driving factors of China's urban human land allometric coefficient. *Urban Problems*, 2019, 38(5): 65-70. [张永芳. 中国城市人地异速关系演变特征及其驱动因素. *城市问题*, 2019, 38(5): 65-70.]
- [45] Shao Shuai, Zhang Xi, Zhao Xingrong. 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, 35(3): 44-63. [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, 35(3): 44-63.]
- [46] Yin Shanggang, Yang Shan, Chen Yanru, et al. Spatial-temporal evolution patterns and convergence analysis housing price-to-income ratio in Yangtze River Delta. *Geographical Research*, 2020, 39(11): 2521-2536. [尹上岗, 杨山, 陈艳如, 等. 长三角房价收入比时空演变格局及收敛性研究. *地理研究*, 2020, 39(11): 2521-2536.]
- [47] He Canfei, Hu Xuqian. Evolution of Chinese industrial geography since reform and opening-up. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(10): 1962-1979. [贺灿飞, 胡绪千. 1978 年改革开放以来中国工业地理格局演变. *地理学报*, 2019, 74(10): 1962-1979.]
- [48] Liu Zhibiao. Regional market integration and governance mechanism innovation in the Yangtze River Delta. *Academic Monthly*, 2019, 51(10): 31-38. [刘志彪. 长三角区域市场一体化与治理机制创新. *学术月刊*, 2019, 51(10): 31-38.]
- [49] Wang Jue, Chen Wen. Implication of regionalism and regional integration under the global shift. *Progress in Geography*, 2013, 32(7): 1082-1091. [王珏, 陈雯. 全球化视角的区域主义与区域一体化理论阐释. *地理科学进展*, 2013, 32(7): 1082-1091.]
- [50] Song Weixuan, Chen Yanru, Sun Jie, et al. Spatial differentiation of urban housing prices in integrated region of Yangtze River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10): 2109-2125. [宋伟轩, 陈艳如, 孙洁, 等. 长三角一体化区域城市房价空间分异的模式与效应. *地理学报*, 2020, 75(10): 2109-2125.]



## The allometric relationship and interactive mechanism between the size of industrial economies and the emissions of industrial pollution in the Yangtze River Delta

YIN Shanggang<sup>1,2</sup>, YANG Shan<sup>1,2</sup>, GONG Haibo<sup>1,2</sup>

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Clarifying the link between economic growth and environmental pollution is an essential issue to achieve regional high-quality development and establish "dual circulation" development patterns. Using the size of industrial economies and industrial pollution index in the Yangtze River Delta (YRD) region during 2000-2018 as the research object, this study constructs allometric growth models based on the size of industrial economies and industrial pollution index to reveal their spatio-temporal changes. We also investigate the influence mechanism of allometric growth using a boosted regression tree model. The results showed that: (1) The spatial pattern of the size of industrial economies and industrial pollution index in the study region has strong stability and high similarity, demonstrating a decreasing trend from east to west. Moreover, the industrial pollution index shows a decreasing trend with the increase in the size of industrial economies. (2) In terms of the vertical direction, the allometric growth in the YRD changes along with the pattern of the economic environment coordinated basically-the weak economic expansion-the economic environment coordinated basically. For the horizontal direction, the rate of industrial pollution index is lower than the size growth rate of the industrial economy and shows a downward trend in most of the cities. (3) Urban ecological foundation, energy efficiency, industrial development level, technological development level, opening-up level and financial investment level are the main factors affecting allometric growth, and these factors have positive impacts on allometric growth in the early stage, while turn into negative impacts during the later stage. (4) The misaligned relationship between market-driven economic growth and government-driven environmental protection induces the allometric growth of the economy and environment, and promotes regional integration. Regional integration and the allometric growth of the economic environment promote each other. Promoting economic and ecological integration in the YRD, as well as realizing the coordination of lucid waters-lush mountains and mountains of gold and silver, is the only way to accomplish regional high-quality development.

**Keywords:** size of industrial economies; industrial pollution index; allometric growth; boosted regression tree; Yangtze River Delta region