

长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析

陶洁怡¹ 董平¹ 陆玉麒^{1, 2, 31}

(1. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京师范大学 乡村振兴研究院, 江苏 南京 210023;

3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

【摘要】: 城市生态韧性建设是长三角地区高质量一体化发展的关键问题。从抵抗力、适应力、恢复力三维度出发构建生态韧性评价模型, 对 2011~2019 年长三角地区城市生态韧性的时空演变特征进行研究; 并运用 STIRPAT 扩展模型和时空地理加权回归模型(GTWR)分析生态韧性影响因素的时空异质性, 从而为实现长三角城市生态韧性的提高提供指导。结果表明: (1) 2011~2019 年长三角城市生态韧性指数总体呈波动上升趋势, 波动下降或停滞型城市数量占比小, 波动低速上升型城市占据主导地位; 城市生态韧性抵抗力高于适应力和恢复力, 研究期间生态韧性抵抗力呈波动下降趋势, 适应力和恢复力波动上升。(2) 长三角城市群生态韧性高指数区经历了“整体分散局部集聚——小集聚大分散——小集聚大分散程度加强——多地集聚”, 中低韧性区覆盖范围始终较大, 长三角城市生态韧性仍有较大提升空间。(3) GTWR 模型检验结果表明, 影响因素之间存在明显的时空差异, 不同区域内影响因素的作用强度和波动方向各不相同。

【关键词】: 生态韧性 时空演变 影响因素 GTWR 长三角

【中图分类号】: F592.7; X171.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)09-1975-13

伴随着工业化和城镇化的不断推进, 城市通过人口集聚、经济发展、能源消耗对生态环境产生胁迫作用^[1], 环境污染、资源短缺、生态破坏等一系列问题逐渐暴露, 简单的自然恢复力与免疫力已经难以承受生态环境压力。韧性(Resilience)概念最早被生态学家霍林引入生态学, 是指系统所拥有化解外来冲击, 并在危机出现时仍能维持其主要功能运转的能力^[2]。随着城镇经济与生态环境的发展, “区域韧性^[3]”、“韧性城市^[4,5]”、“韧性规划^[6]”等持续引起了广泛的关注。当前, 长三角一体化发展已进入全方位推进的新阶段。2019 年中共中央、国务院颁发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》明确提到“坚持生态保护优先, 把保护和修复生态环境摆在重要位置, 夯实绿色发展生态本底”。因此, 若要实现长三角经济高质量发展与生态文明建设的目标, 长三角城市生态系统亟需提高生态韧性, 增强自身抵御力、适应力及恢复力^[7], 促进城市经济可持续发展。城市生态系统具有时空交织的复杂性及易受多因素影响的相对脆弱性, 科学地认识长三角地区生态韧性的时空格局及影响因素, 对于长三角城市营造宜居安全的生活环境与生态系统健康可持续发展具有重要意义。

中国面临着严重的生态环境挑战, 尤其是经济发达的长三角地区经济发展与资源环境的矛盾更为突出。在影响因素方面, 生

作者简介: 陶洁怡(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态可持续发展与区域经济。E-mail:17857179386@163.com; 陆玉麒, E-mail:luyuqi@263.net

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430635)

态韧性涉及因素多样、作用过程复杂,相关学者重点分析了经济、社会、地理等因素与生态环境之间的关系。总体而言,驱动因素包括经济发展水平、人口集聚、对外开放、产业结构、环境规制、科教进步、地形因素、水土条件等。阎晓等^[8]指出产业转型、科技创新等对生态效率改善具有正向驱动作用,常新锋等^[9]经研究发现人口密度的增加对生态承载力产生负向效应,王健康等^[10]提到社会经济发展水平的提高以及环境规制政策可以对环境质量起改善作用,李妍等^[11]以蓟州区为例,探讨了地形因子对生态环境质量空间分异的影响,孟海星等^[12]则通过对城市生态空间防灾韧性的研究,探讨了城市所处区域的水土条件,如水体、植被等要素对城市生态空间韧性的影响。近年来,越来越多学者开始运用空间计量模型来分析生态质量时空分布特征及影响因素,如邱立新等^[13]采用地理加权回归(Geographical Weighted Regression, GWR)对浙江县域生态效率及影响程度的时空分布进行研究,结果显示,各影响因素在县域空间上呈现时空异质性。生态韧性涉及到多部门多行业多因素的相互作用,各驱动因素对不同地区生态韧性影响程度也存在差异,而既有研究侧重于从全局角度进行影响因素评价,对同一影响因素时空差异的研究尚未深入。

鉴于此,本研究首先从生态韧性的基本特征(抵抗力、适应力和恢复力)三个方面构建了长三角城市生态韧性评估模型,分析长三角生态韧性的时空动态演变特征;在此基础上,应用时空地理加权回归(Geographically and Temporally Weighted Regression, GTWR)对经典地理加权回归模型进行了优化,扩展了时间维度,从时空角度对生态韧性各驱动因素的影响程度进行解析,有利于解释区域城市生态韧性差异的内在原因,明确城市生态韧性的制约因素,以为长三角城市生态韧性建设提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 生态韧性评价模型

目前,关于城市生态韧性尚没有统一的评价模型。孙阳等^[14]认为“韧性”包含弹性和恢复力两方面含义,更多的是指在风险影响下的反弹能力,以及对极端灾害的预防、响应和恢复能力。城市韧性的优势在于其包含对突发状况的应对以及长期适应风险能力的特性。岳俞余等^[15]进一步对“社会生态韧性”进行解读,提出其为系统在遭遇外界干扰时主动抵御(系统维持)、适应(系统逐渐变化)或者转化(系统重构)的能力。由此可以总结城市生态韧性包括抵抗力、适应力、恢复力三大特征。其中,抵抗力表示城市生态系统抵抗外力干扰的能力,适应力反映了生态系统维持稳定的能力,恢复力体现生态系统遭受危害后返回干扰前状态的潜力。韧性可用于事前评估或事后回溯分析,对于韧性城市风险防控管理至关重要^[16]。因此,本文在考虑城市生态韧性结构特征、长三角地区资源环境特点后,建立了由抵抗力、适应力以及恢复力3个准则层和17个具体指标组成的城市生态韧性评估模型。如表1所示。

为了消除指标数据间可能存在的量纲和量级差别,本文采用极差标准化法对原始数据进行标准化处理,计算公式为:

$$\text{正向指标: } x_{ij}^z = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

$$\text{逆向指标: } x_{ij}^z = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为原始指标值; x_{ij}^z 为标准化处理后的指标值; $\min(x_{ij})$ 为第 j 个年份第 i 个指标的最小值; $\max(x_{ij})$ 为第 j 个年份第 i 个指标的最大值。

考虑到本文指标数据是基于行政单元统计的社会经济与资源环境指标,评价指标权重采用熵权法确定^[17]。熵权法是一种客观赋权的方法,可有效避免减少主观因素的干扰^[18]。

表 1 城市生态韧性评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标性质
生态韧性	抵抗力	单位面积 GDP	逆向
		人口密度	逆向
		单位 GDP 工业废水排放量	逆向
		每平方公里 SO ₂ 排放量	逆向
		单位 GDP 工业烟粉尘排放量	逆向
		建成区用地面积比例	逆向
	适应力	生活垃圾无害化处理率	正向
		城镇生活污水处理率	正向
		生活垃圾清运量	正向
		一般工业固体废物综合利用率	正向
		空气质量(达到及好于二级的天数)	正向
	恢复力	建成区绿化覆盖率	正向
		人均公园绿地面积	正向
		人均水资源占有量	正向
		人均土地面积	正向
		园林绿地面积	正向
		环保占财政支出的比重	正向

1. 1. 2 时空地理加权回归模型

时空地理加权回归(GTWR)模型是在地理加权回归(GWR)模型的基础上引进时间维度^[19],利用区域面板数据进行空间回归,既突破了样本量的限制,又有效地考虑到时间与空间非平稳性^[20],使估计结果更为准确。模型如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中: u_i, v_i 分别为各城市重心点的经纬度坐标; (u_i, v_i, t_i) 为第 i 个城市的时空坐标; X, Y 分别为解释变量与被解释变量; p 为解释变量个数; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为截距项; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为第 k 个解释变量的估计系数; ε_i 为模型残差。

1.1.3 实证模型构建

本文通过改进Dietz等构建的STIRPAT(the Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology)模型^[21]对长三角生态韧性展开实证研究。STIRPAT模型的允许将各系数作为参数进行估计,同时可以对影响因子进行适当的分解和改进^[22]。STIRPAT模型具体如下:

$$I = a \times P^b \times A^c \times T^d \times e \quad (4)$$

式中: a 为常数项; b、c、d 分别为 P、A、T 的指数项; I、P、A、T 分别反映环境压力、人口数量、富裕程度以及技术水平; e 为误差项。考虑到诸如地形因素、植被覆盖、水源条件、产业结构、对外开放程度、环境规制、科教投入等因素^[23,24,25,26]也会对城市生态的抵抗力、适应力和恢复力产生影响,因此将这类因素纳入模型中。由于 STIRPAT 模型的非线性,因此在等式两边取对数以减少异方差^[27],具体表现形式如下:

$$\ln ER_i = a + \sum_{k=1}^p \beta_k (\ln X_{ik}) + e \quad (5)$$

式中: ER 为生态韧性; X 为影响生态韧性的一组解释变量。为排除数据间的多重共线性,对各项指标进行方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)检验,并结合数据相关性检验最终选取 7 个指标进行分析,结果如表 2 所示。

表 2 长三角生态韧性指数影响指标描述

	变量名称	指标含义	单位	变量表示	VIF
地理	地形因素	地形起伏度	m	TER	1.66***
	植被覆盖	归一化植被指数	无量纲	NDVI	1.89*
	水源条件	单位面积河流长度	m	RIVER	1.48**
经济	经济发展水平	人均 GDP	万元	PGDP	2.01***
	对外开放	外商直接投资占 GDP 比重	%	CAP	1.42**
	产业结构	第二产业增加值占 GDP 比重	%	IND	1.52***
社会	人口集聚	单位面积常住人口数量	人/km ²	POP	4.12***
	环境规制	环境污染治理投资额占 GDP 比重	%	ENV	1.37***
	科教投入	财政支出中科学和教育事业支出之和	万元	SCED	5.15***

注: **、*、* 分别代表在 99%、95%、90% 置信区间显著; 0 < VIF < 10 代表不存在多重共线性。

1.2 数据来源及处理

本文所研究的长三角地区包括苏、浙、皖、沪三省一市，共 41 个城市。长三角位于长江经济带横向发展战略与沿海经济轴纵向发展战略的“T”型交汇节点^[28]，在中国经济社会发展的具有重要的战略地位。然而长三角也是资源能源消耗最大、环境污染最为严峻的地区之一，巨大的生态环境压力逐渐成为长三角高质量发展的短板。

本文涉及到的社会经济、生态建设和环境保护数据主要来源于《中国城市统计年鉴》(2012-2020 年)《浙江自然资源与环境统计年鉴》(2012-2020 年)、各城市的统计年鉴(2012-2020 年)以及 2011~2019 年的国民经济和社会发展统计公报，DEM 高程数据通过中国科学院资源环境科学数据中心获取，空间分辨率为 30m。此外，个别缺失指标通过插值法和外推法估计获得。

2 长三角城市生态韧性时空格局

2.1 城市生态韧性时间序列演变特征

2011~2019 年长三角城市生态韧性指数总体呈波动上升趋势，不同城市生态韧性指数也存在显著的空间差异。根据期末相对于期初的增长率，可以将长三角城市划分为 4 种类型：(1)波动高速上升型(增幅>20%)，城市数量占 19.51%，涵盖宁波、绍兴、丽水、苏州、合肥等 8 座城市；(2)波动中速上升型(10%<增幅≤20%)，城市数量占 12.19%，包括宣城、淮安、金华、台州和嘉兴；(3)波动低速上升型(0<增幅≤10%)，城市数量占比最大，为 48.78%，主要包括上海、杭州、湖州、南京、马鞍山、黄山等 20 座城市；(4)波动下降或停滞型(增幅≤0)，城市数量占比较小，为 19.51%，包括无锡、常州、宿迁、芜湖、蚌埠等 8 座城市。可见，波动下降或停滞型城市数量占比小，波动低速上升型城市占据主导地位。尽管长三角环境负荷和资源能源消耗不断提高，但城市园林与绿化面积的增加，以及各城市环境治理强度与生态保护力度的加强仍然给城市生态韧性带来了正向积极反馈，促进了城市生态韧性的提升。

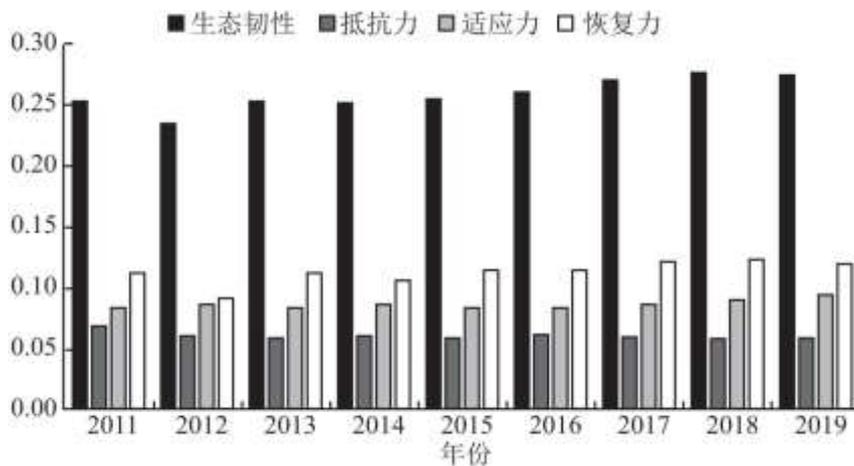


图 1 2011~2019 年长三角生态韧性三维度时间演变

从 2011~2019 年长三角城市生态韧性各维度的状况及演变特征来看(图 1)，抵抗力指数明显低于适应力和恢复力，研究时段内生态抵抗力呈波动下降趋势，生态适应力和恢复力指数整体波动上升。研究期间长三角地区处于工业化和城镇化快速发展阶段，人口集聚、建设用地不断扩张以及大量废物排放等原因导致城市生态系统承载压力不断增大，生态韧性抵抗力下降。另一方面，区域环境保护政策的完善和污染治理力度的加大又促进了城市生态韧性适应力和恢复力的有效提升。因此得益于生态适应力和恢复力的不断提高，尽管 2011~2019 年生态抵抗力指数出现波动下降趋势，长三角城市生态韧性指数仍表现为波动上升。

2.2 城市生态韧性空间格局演化

为进一步比较长三角内部不同空间单元城市生态韧性的空间格局演变差异，根据自然断点法将生态韧性值从小到大划分为低韧性区、较低韧性区、中等韧性区、较高韧性区和高韧性区 5 种类型，如图 2 所示。

由图 2 可知，2011 年上海以及杭州和南京得益于较高的生态适应力和恢复力较高，分别形成高韧性区、较高韧性区；黄山、池州和丽水由于较低的污染排放、高绿化覆盖率以及较小的人口密度等，生态抵抗力和恢复力指数高，从而形成较高韧性区。中值区则分布于生态韧性高指数区域(包括高韧性区和较高韧性区，下同)周围，如安徽的合肥、芜湖、宣城，江苏的无锡、苏州以及浙江的金华、宁波等，多为工业发达城市，其韧性指数的降低与城市人口集中、经济体量大、产业布局密度高有密切相关。生态韧性低指数区域(包括低韧性区和较低韧性区，下同)主要为资源型城市，以苏中、苏北城市和皖北城市为主，落后的生产技术和薄弱的环保意识导致这些地市出现资源浪费、环境污染等严重现象，生态环境压力增大。生态韧性高指数区域呈现整体分散局部集聚的分布格局。

2014 年生态韧性高指数区由整体分散局部集聚向小集聚大分散转变。其中上海市受益于较强的生态适应力和恢复力，其城市生态韧性仍然高于周围其他城市，出现空间极化现象。随着生态环境重视程度的不断提升，南京、合肥、池州、杭州、丽水等众多城市生态韧性指数“升级”，生态韧性低指数区域范围缩小，长三角城市生态韧性整体发展状况良好。

2017 年在“十三五”期间长江经济带绿色生态廊道建设、生态文明建设不断推进的时代背景之下，生态韧性低指数区域覆盖范围进一步缩小。然而由于城镇化和工业化等方面的巨大需求，长三角城市生态系统也面临着资源能源消耗过度、污染大量排放等一系列生态环境破坏活动，生态赤字和环境污染问题突出，部分城市生态韧性指数下降，其中包括杭州、南京、黄山、丽水等生态韧性高指数城市均出现了“降级”。总体而言，长三角城市韧性中值区覆盖范围扩大，生态韧性高指数区“小集聚大分散”分布态势进一步增强。

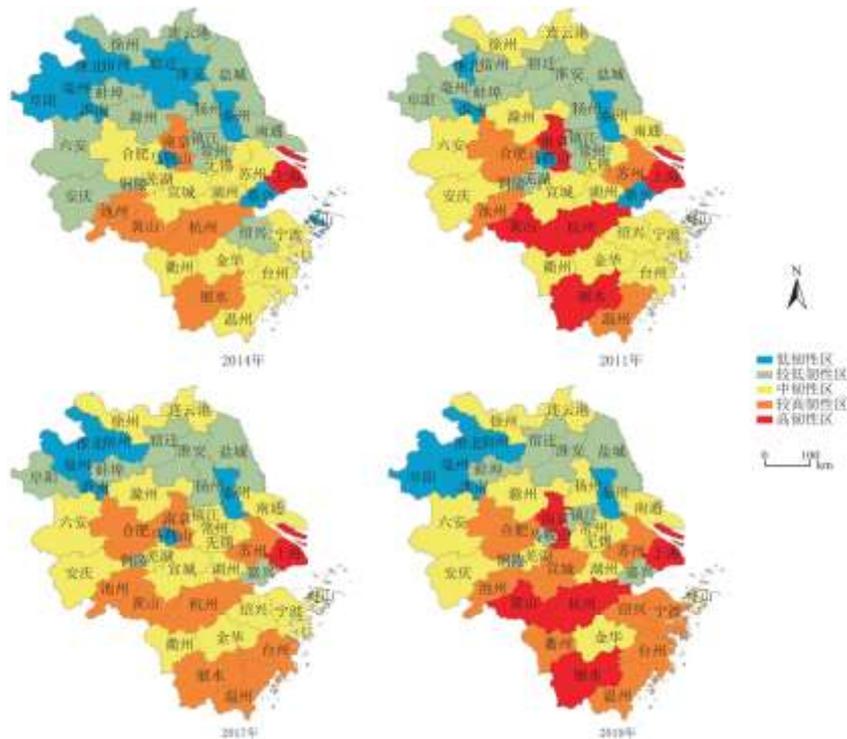


图 2 2011~2019 年长三角城市生态韧性空间格局

2019 年长三角地区生态韧性水平得到稳步提升。随着南京、杭州、上海这些城市的发展进入工业化后期阶段，产业结构不

断完善，对于自然资源需求有所减小，实现了以较小的资源消耗、较低的污染排放来换取较大的经济增长，形成高韧性区；黄山和丽水得益于对环保重视程度的提高、污染治理力度的加大，被挤占的生态空间重新得到恢复^[29]等原因，具有较高的生态抵抗力和恢复力，表现为高生态韧性区。此外较高值区范围扩大到宁波、绍兴、宣城等城市，这是由于此类城市在工业化和城镇化过程中，逐渐开始依托经济发展优势采取积极措施加强污染治理，并对遭到破坏的生态环境进行修复，从而使生态韧性指数得到有效提升。生态韧性高指数区域表现出多地集聚的空间分布格局。

3 长三角生态韧性的影响因素分析

由于长三角生态韧性指数具有时空非平稳性，各影响因素在城市不同发展阶段对生态韧性的贡献不同，并且各城市之间存在较大差异。本文基于 2011~2019 年长三角城市群各地市的面板数据，对不同时间各城市生态韧性影响因素参数运用 GTWR 进行估计，并从局部探讨长三角生态韧性的时空异质性。

3.1 GTWR 实证结果

运用 Huang 等^[30]基于 ArcGIS10.6 开发的 GTWR 插件进行影响因素的计算与分析，将时空距离参数比值设定为 1, 自动优化设置带宽。模型调整后的 R^2 为 0.966, 较 OLS 模型的 R^2 提高 0.320, AICc 降低了 708.294, 说明 GTWR 模型的拟合优度高，对于解释变量的分析效果显著提高。

表 3 GTWR 参数统计结果

模型	OLS	GTWR
AICc	-1.390	-709.684
R^2	0.646	0.966
AICc 变化量	0	-708.294
R^2 变化量	0	0.320

3.2 影响因子的时间演化

对不同时间内长三角各地市生态韧性影响因素运用 GTWR 模型进行回归分析，进而绘制各系数随时间变化的箱线图以观测其时间演变趋势，如图 3 所示。具体到各因素而言：

2011~2019 年地形因素 (TER) 对大部分长三角城市生态韧性的贡献率为正向，仅有少数几个城市的回归系数为负。地形起伏度高的地区人类活动干扰较小，生态抵抗力高，因而区域生态韧性指数更高。这与农蓝萍等^[31]提出的“高程值越大区域生态环境质量越高”的结论相一致。

研究期间内植被覆盖 (NDVI) 与生态韧性以负相关关系为主，近年来正值不断增加，表明部分城市的植被覆盖对生态韧性水平由负向抑制作用转为正向促进作用。城镇化快速推进过程中，尽管建设用地的增加占用了生态空间，城市植被覆盖有所减少，然而城市化水平高的地区可以依托经济优势采取多种措施加强环境治理。当植被覆盖增加所带来的生态韧性提升小于城市化环保治理带来的生态韧性提升时，植被覆盖与生态韧性表现出负相关。随着城镇化发展，生态环境治理水平逐渐稳定，植被覆盖增加对生态韧性的正向促进作用得以体现。

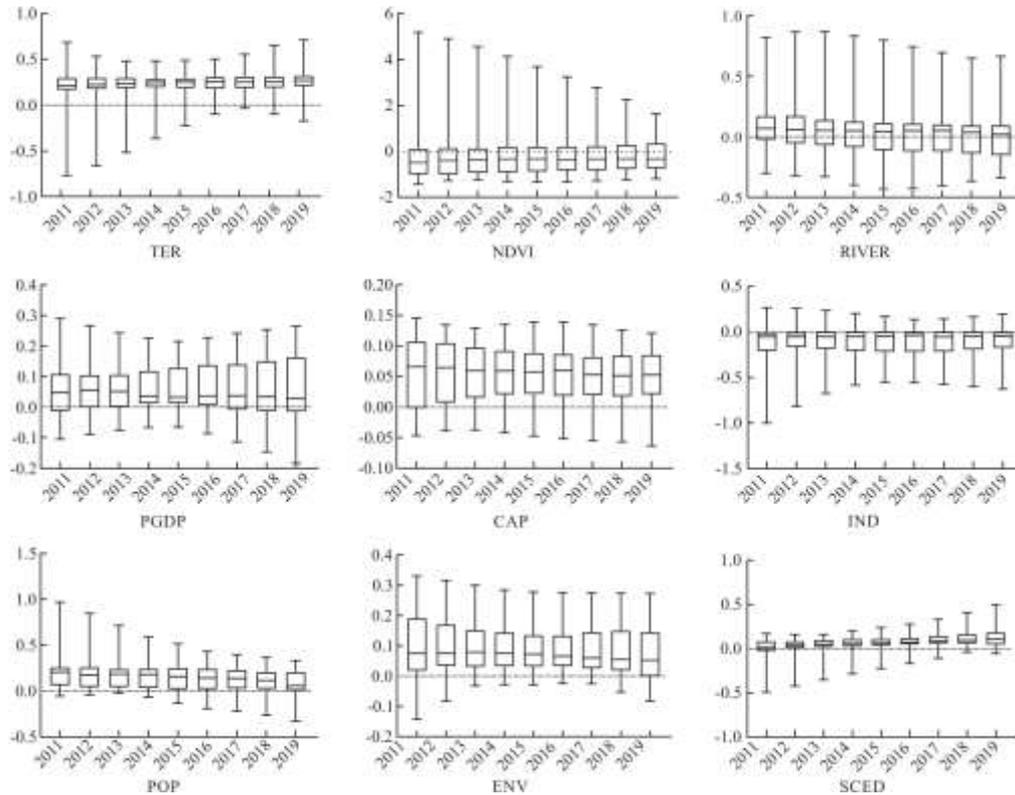


图3 2011~2019年回归系数变化趋势

与植被覆盖相反，水源条件(RIVER)在研究初期对生态韧性指数的贡献以正向为主，而后负值不断增加。因为这一阶段城市化快速发展，城镇数量、人口不断增加，大量工业、生活污染物的排放导致城市水环境压力倍增，生态韧性水平下降。

经济发展水平(PGDP)对生态韧性带来的正向影响表现在长三角大多数城市，仅有少数几个城市的回归系数为负。随着经济发展水平的提升，长三角城市经济高污染、高排放的经济发展方式发生变化，出现由粗放向集约式发展的趋势，对生态韧性的破坏作用有所减弱，长三角城市开始实现经济增长与生态韧性的协调发展。同时，研究期内各地市经济发展方式、相关环境经济战略制定与环境治理目标的差异也使得回归系数离散程度不断增大。

类似于经济发展水平，对外开放程度(CAP)对长三角城市生态韧性的影响在研究期间内大多呈正相关性。不同的是，其回归系数表现为波动下降的趋势，研究后期产生负向影响的城市数量增加，且离散程度逐渐缩小。说明外商投资额增加会进一步扩大生产规模，带来更大的能源、资源消耗，导致生态韧性压力加剧。长三角是外商投资的重要区域之一，在长三角经济发展早期一定程度上具有“污染光环”效应^[32]，通过技术溢出效应和结构效应抑制环境污染物的排放；而随着污染企业将产业链中高污染、高能耗部分转移到环境准入门槛较低的地区，导致生态韧性低值区“集聚区”特征明显，印证了“污染天堂假说”效应，这与李金凯等^[33]的研究一致。

产业结构(IND)对生态韧性呈现抑制效应，在研究期间内均保持较高强度，这与已有诸多研究证实“工业活动是造成地区生态压力的显著影响因素”这一观点是一致的^[34]。在经济快速发展过程中，工业生产活动加剧了对能源、水资源和土地资源的消耗，致使长三角“三废”排放总量增加，城市生态韧性抵抗力下降。研究期间，产业结构回归系数波动上升且城市间差异缩小，说明工业产业结构对生态韧性的影响程度在减弱，并且存在一定的空间依赖效应，工业化仍然是加剧生态韧性压力的重要因素。

人口密度(POP)与生态韧性的回归系数在研究期间基本为正，规划合理的人口集聚对生态韧性对生态韧性水平的提升具有促

进作用。这个结论与王兴杰等^[35]学者的“人口集聚造成城市环境空气质量下降”的研究存在一定不同，可能原因是人口密度增加带来集聚经济效应，同时由于城市人口规模扩大，为满足人们对生态环境日益提高的要求，政府加大了城市环保投入以及绿色技术的进步，使得生态韧性得到显著改善。

环境规制(ENV)对生态韧性的贡献率研究期间大多呈正相关，说明由政府驱动的区域环境污染治理措施与联合防控机制逐渐生效。自十二五提出建设资源节约型、环境友好型社会以来，各地相继实施一系列环境保护政策、法律法规，促进了落后产能淘汰以及资源的优化配置，减少环境污染带来的负外部性^[25]，使得环境规制对生态韧性始终发挥积极作用。这也证实了沈威等提出的“环境污染治理水平的提高能对城市生态系统产生直接的环境效益”这一观点^[36]。

研究期间科教投入(SCED)对长三角生态韧性的正向促进作用不断增强。财政支出中科技投入能降低企业研发成本、促进企业研发活动，推动发展重点由工业向现代服务业和高新技术产业转变，进而缓解城市生态韧性压力。教育投入则可以提升人们的环保意识与保护城市生态环境的积极性，同时还通过增强舆论对生态环境破坏的监督作用实现以非正式环境规制方式倒逼城市生态韧性的提升。

3.3 生态韧性影响因子的空间异质性

将 GTWR 计算得到的回归系数在 ArcGIS10.6 上进行可视化表达，从而对长三角局域的生态韧性各影响因素进行空间分析，如图 4 所示。

从地形因子(TER)回归系数来看，地形起伏度对生态韧性的正向作用高值区主要位于长三角南部、西部山地丘陵如丽水、衢州、黄山、池州等地市，这些地区多被森林植被覆盖，自然条件良好，生态抵抗力高。加之受城市建设用地扩张等人类活动干扰较小，生态系统恢复能力良好，因此具有较高的生态韧性。

植被覆盖(NDVI)回归系数正向高值区主要位于丽水、温州、金华、池州等地市，表明这些城市林地等生态空间得到较好的保护，生态韧性水平发展态势良好。回归系数为负的城市中，绝对值最大的为苏北、皖北城市，其次为上海、苏州等长三角核心城市，主要是由于该区域城市在城镇化进程中环境治理对生态韧性的提升作用高于植被覆盖增加的效果，因而表现为植被覆盖对生态韧性的负效应。

与植被覆盖类似，水源条件(RIVER)回归系数正值区主要位于丽水、衢州、黄山、池州等地，表明这些城市的水源条件越好，生态韧性指数越高；在上海、宁波、南京等经济发达城市以及淮安、宿迁、徐州等苏北城市，水源条件对生态韧性的回归系数为负，这些地区城市受工业废水、生活污水等排放影响较大，其水源条件不利于生态韧性水平的改善。

从 2011~2019 年经济发展水平(PGDP)回归系数的整体空间分布来看，GDP 对生态韧性呈显著的正向促进作用，其中上海、苏州、嘉兴、杭州回归系数高，可能原因使城市将发展的重点逐渐落在提高经济发展的质量和环境效益上^[37]，政府和企业对生态环保的投入力度大，生态韧性发展环境较好。苏北、皖北如徐州、苏州、淮北、亳州等城市具有高回归系数则是因为随着经济发展水平的提高，原有粗放型经济发展方式发生改变，向着集约、高效、绿色型经济发展，增强了城市生态抵抗力和适应力，生态韧性得到明显提升。

对外开放(CAP)作用系数分布自西向东呈现递减趋势。对于安徽大部分地区、浙西、苏北等发展相对滞后的城市，其生产成本优势有利于吸引外资，通过产业结构的优化和技术进步来提高此类地区的生态韧性。然而外商投资的动机主要是追求经济效益，对资源消耗和环境污染的忽略使其产生污染避难所效应^[34]。随着上海、苏锡常、杭嘉湖等长三角核心城市经济发展，技术水平也得到了显著提升，与外商企业的技术差距进一步缩小，对外商企业技术扩散的吸收难度不断加大，此时外商投资对这些城市的生态质量提升得到一定程度的减弱，反而更倾向于产生抑制作用，不利于城市生态韧性的提高。

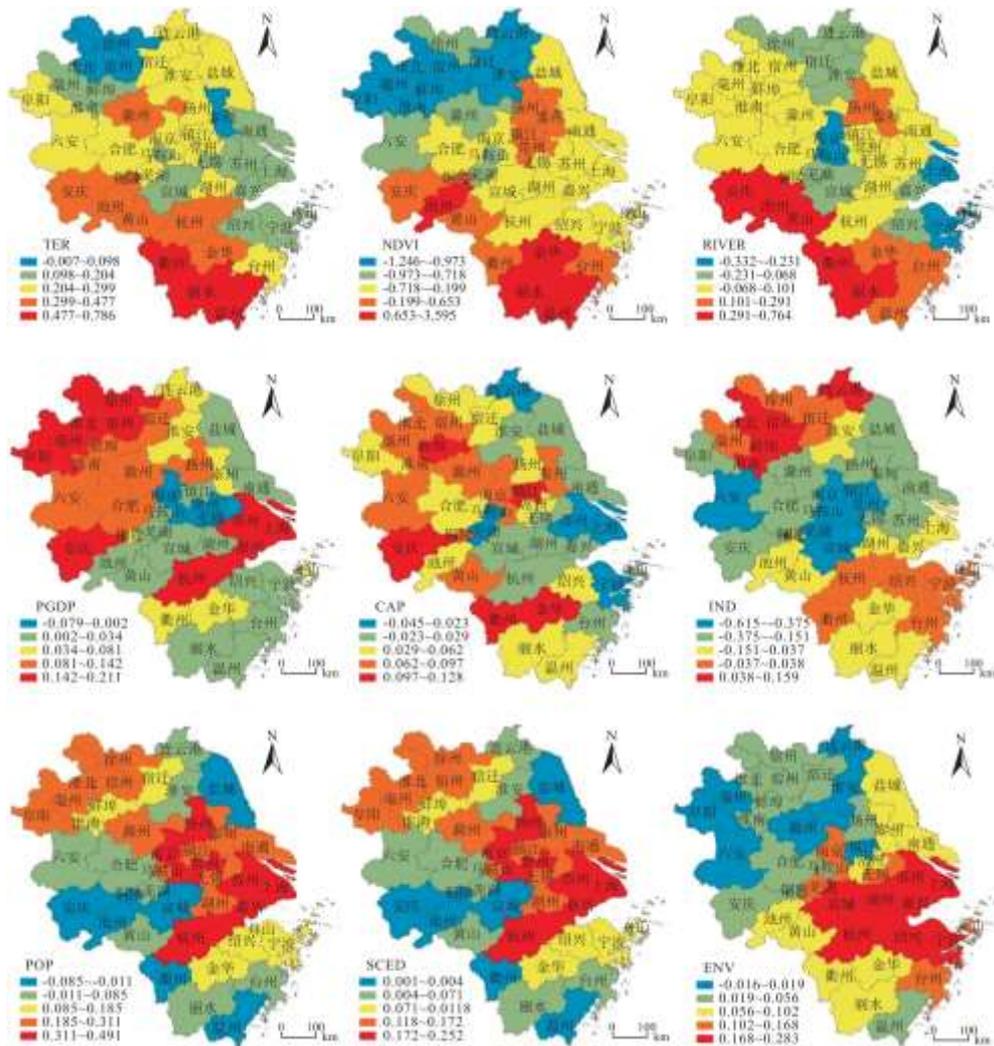


图 4 长三角生态韧性影响因素回归系数空间分布

从产业结构(IND)作用系数的空间分布来看,2011~2019年产业结构与生态韧性大多表现为负相关。工业发展的抑制作用对苏南、浙江等影响较小,表明这些地区积极进行产业结构调整和优化,污染型工业企业关停、外迁,高新技术产业和服务业比重不断上升,工业产生的污染对生态抵抗力造成的危害轻,生态韧性受负面影响较小。而苏中、安徽大部分地区随着承接产业转移,并处于工业发展的初级阶段,环境污染较为严重,加剧了生态环境压力,因而表现为产业结构对生态韧性的负作用显著。而苏北和皖北城市多为资源型城市,生态敏感性强^[38],工业发展带来的经济增长为环境治理和保护提供了更为充足的资金,提升了生态系统的适应力,因此表现为产业结构对生态韧性的正向效应。

人口集聚(POP)作用系数表现出自西向东整体由负向正转变。正值区主要位于上海、苏南、浙北地区,表明此类区域人口密度增加,规划合理的人口集聚促进了生态韧性的提高。负值区主要位于皖西、浙西城市,人口快速增长带来的资源消耗和自然生态负荷对这些地区的生态韧性产生负向作用。

从环境规制(ENV)作用系数空间分布来看,呈现出自西北向东南由负向正,影响程度不断增大的趋势。高值区主要为上海、江苏南部、浙江等地市,这些区域通过环境规制可以有效实现节能减排和生态环境的恢复^[39],减轻了城市生态韧性压力。苏北、皖北、皖西等城市表现为环境规制对生态韧性的负作用。可能原因在于环境规制会一定程度上增加企业生产成本,阻碍了企业在

当地的创新和生产技术的改进，此外这些地区的当地政府可能处于政绩考量，通过降低环保标准来吸引发达地区的污染密集型企业向本区域内转移^[40]，这也是造成环境规制对于此类区域生态韧性产生抑制作用的重要原因。

科教投入 (SCED) 与生态韧性的回归系数表现为正相关。由于苏北、皖北、皖西如徐州、淮北、亳州等城市在承接经济发达地区的重工业产业转移的过程中产生资源短缺、环境污染等一系列问题，对落后生产工艺的改进和创新以及随着人们受教育程度的提升、环境保护意识的增强，生态韧性提升效果显著。而对于长三角经济发达城市如上海、苏州、杭州等，产业转移和技术进步减轻了环境污染压力，加之原本教育水平高，群众的环保积极性和生态环境保护意识强，因而科教投入对于生态韧性的促进作用相对较小。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文从抵抗力、适应力、恢复力三维度出发构建了生态韧性评价模型，基于 2011~2019 年面板数据，对长三角地区城市生态韧性的时空演变特征进行了定量分析；并综合运用 GTWR 和 STIRPAT 扩展模型深入研究了长三角城市生态韧性影响因素的时空异质性。主要结论如下：

(1) 从时间序列演变特征来看，2011~2019 年长三角城市生态韧性指数总体呈波动上升趋势，不同城市中波动下降或停滞型城市数量占比小，波动低速上升型城市占据主导地位。从三维度来看，城市生态韧性抵抗力高于适应力和恢复力，研究期间内生态韧性抵抗力呈波动下降的趋势，而适应力和恢复力呈现波动上升趋势。

(2) 从空间格局演化来看，长三角城市群生态韧性高指数区经历了“整体分散局部集聚——小集聚大分散——小集聚大分散程度增强——多地集聚”的波动上升演变过程，中低韧性区覆盖范围始终较大，可见长三角城市群生态韧性仍有较大提升空间。

(3) GTWR 模型检验结果表明，影响因素之间存在明显的时空差异，不同区域内影响因素的作用强度和波动方向各不相同。地理要素中，地形因素对长三角城市生态韧性的贡献率基本为正；植被覆盖与生态韧性以负相关关系为主，近年来正值不断增加；水源条件对生态韧性的贡献以正向为主，而后负值不断增加。空间上看，地理要素的正向高值区均位于长三角南部、西部地区。经济要素中，经济发展水平的正向影响表现在大多数城市，区域间离散程度随时间不断扩大，对生态韧性影响较大的城市包括上海、苏州、杭州等长三角核心城市以及苏北、皖北等城市；对外开放程度回归系数以正向作用为主，后期产生负向影响的城市增加，空间上对安徽大部分地区、浙西、苏北等城市生态韧性影响较大并呈正相关，而上海、苏锡常、杭嘉湖等长三角核心城市呈现负相关；产业结构对生态韧性保持较高强度的抑制效应，回归系数波动上升且城市间差异减小，苏北和皖北城市呈现正相关，其余城市皆为负相关，其中对苏南、浙江等影响较小，对苏中、安徽大部分地区影响显著。社会要素中，人口集聚作用系数在研究期间内基本为正，在上海、苏南、浙北地区呈现正相关，在皖西、浙西城市表现为负；环境规制对生态韧性的贡献率大多呈正相关，空间上具有正向加剧作用的为上海、江苏南部、浙江等地市，苏北、皖北、皖西等城市则呈负相关；科教投入与生态韧性的正向回归系数随时间促进作用不断增强，离散程度呈缩小趋势，对于苏北、皖北、皖西等城市生态韧性提升效果显著，而对长三角经济发达城市影响较小。

4.2 讨论

为推进长三角城市生态韧性的发展，本文提出以下建议：(1) 推进生态韧性空间共保，加强环境协同治理。长三角地区各市的发展水平、资源环境要素配置、生态韧性水平差异较大，要加强城市间的经验交流和分工协作，完善生态环境共保联治机制。在工业化和城镇化过程中，安徽的铜陵、马鞍山、淮南等众多资源型城市发展矿石开采和加工等对生态环境破坏程度大的产业，也逐渐背上了沉重的生态包袱，亟需进行产业结构升级和推进经济高质量发展。这些地区为长三角经济发达地市的发展做出了

贡献,发达地市应共同为生态韧性落后城市的环境治理提供帮助,跳出“资源诅咒”陷阱,努力建设绿色美丽长三角。(2)实施生态韧性区分类管理,构筑生态安全格局。上海、杭州、南京等生态韧性高值区应运用产业升级和转型的策略来缓解人口、土地压力,并投入更多资金用于常态下的环境治理与生态保护,加大区域技术和人才流通,提升城市整体生态韧性水平。生态韧性中低值区应对环境生态风险能力较低,未来要加强此类区域的生态空间保护与建设来消除差异化城市生态韧性空间格局,降低生态韧性局部风险,避免引起全域生态韧性风险的连锁效应。其中对于苏锡常、嘉湖等经济发达区域,应通过对当地高污染企业进行管理,减少工业三废的排放,提高生态韧性抵抗力;加速当地产业结构升级,鼓励环保领域技术引进和创新,增强生态韧性适应力。对于苏北、皖北地区应当加快绿色转型以提高生态韧性;而浙西南、皖南、皖西地区,则应促进绿色产业发展,构建起以皖西大别山、皖南—浙西—浙南山区为重点的绿色生态屏障区,促进生态韧性恢复力的提升。(3)优化城市生态韧性发展模式,提升生态韧性水平。通过前文对影响因素的分析已知,由于各地发展不均衡,地形因素、人口集聚、对外开放、产业结构、环境规制、科教投入、经济发展水平等影响因子对不同城市生态韧性的影响不尽相同,因而需要充分考虑各地实际发展情况来指定生态韧性保护措施。如产业结构抑制作用显著的苏中、安徽大部分地区,应促进工业增长绿色化,要打造绿色化、循环化产业体系,淘汰落后工艺和技术,加快转变传统生产方式,推进产业结构优化升级。

通过构建城市生态韧性评价体系,分析生态韧性的时空演变特征,并探讨其影响因素的时空异质性,有利于明确不同地区生态韧性的基本状况并提出针对性建议。然而由于数据获取等限制,本文所选取的表征生态韧性三维度的指标尚有不足,评估结果与内容分析会有一定偏差存在,后续还需对生态相关的指标进一步丰富。此外,本研究从地形因素、人口集聚、对外开放、产业结构、环境规制、科教投入、经济发展水平等多方面对城市生态韧性影响因素进行研究,但暂未从居民生态感知等主观视角剖析对城市生态韧性的影响,未来将通过调查问卷等方式进行深入分析。

参考文献:

- [1]张荣天,焦华富.泛长江三角洲地区经济发展与生态环境耦合协调关系分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(5):719-727.
- [2]蔡建明,郭华,汪德根.国外弹性城市研究述评[J].地理科学进展,2012,31(10):1245-1255.
- [3]陈韶清,夏安桃.快速城镇化区域城市韧性时空演变及障碍因子诊断——以长江中游城市群为例[J].现代城市研究,2020(1):37-44.
- [4]陈晓红,娄金男,王颖.哈长城市群城市韧性的时空格局演变及动态模拟研究[J].地理科学,2020,40(12):2000-2009.
- [5]修春亮,魏冶,王绮.基于“规模-密度-形态”的大连市城市韧性评估[J].地理学报,2018,73(12):2315-2328.
- [6]王祥荣.崇明世界级生态岛规划建设的国际经验对标、路径与对策[J].城乡规划,2019(4):24-29.
- [7]王少剑,崔子恬,林靖杰,等.珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J].地理学报,2021,76(4):973-991.
- [8]阎晓,涂建军.黄河流域资源型城市生态效率时空演变及驱动因素[J].自然资源学报,2021,36(1):223-239.
- [9]常新锋,管鑫.新型城镇化进程中长三角城市群生态效率的时空演变及影响因素[J].经济地理,2020,40(3):185-195.
- [10]王建康,韩倩.中国城市经济-社会-环境耦合协调的时空格局[J].经济地理,2021,41(5):193-203.

-
- [11]李妍, 张国钦, 吝涛, 等. 乡镇遥感生态指数时空变化及影响因子研究——以天津市蓟州区为例[J]. 生态学报, 2022, 42(2):1-13.
- [12]孟海星, 沈清基. 城市生态空间防灾韧性: 概念辨析、影响因素与提升策略[J]. 城乡规划, 2021(3):28-34.
- [13]邱立新, 周家萌. 浙江省县域尺度生态效率的时空分异及影响因素[J]. 华东经济管理, 2020, 34(10):11-20.
- [14]孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(8):151-158.
- [15]岳俞余, 高璟. 基于社会生态系统视角的乡村聚落韧性评价——以河南省汤阴县为例[J]. 小城镇建设, 2019, 37(1):5-14.
- [16]夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例[J]. 生态学报, 2022(1):1-11.
- [17]纪学朋, 白永平, 杜海波, 等. 甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性[J]. 生态学报, 2017, 37(17):5861-5870.
- [18]王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J]. 地理科学, 2013, 33(11):1323-1329.
- [19]田鹏, 李加林, 王丽佳, 等. 基于 GTWR 模型的浙江省海岸带三维生态足迹动态变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9):3173-3186.
- [20]王海军, 张彬, 刘耀林, 等. 基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析[J]. 地理学报, 2018, 73(6):1076-1092.
- [21]DIETZ T, ROSA E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology[J]. Human Ecology Review, 1994, 1(2):277-300.
- [22]SHAO S, YANG L, YU M, et al. Estimation, characteristics, and determinants of energy-related industrial CO₂ emissions in Shanghai (China), 1994-2009[J]. Energy Policy, 2011, 39(10):6476-6494.
- [23]胡美娟, 孙萍, 李在军, 等. 长三角城市经济增长与资源环境压力的脱钩效应[J]. 世界地理研究, 2021:1-11.
- [24]ZHU W, WANG M, ZHANG B. The effects of urbanization on PM_{2.5} concentrations in China's Yangtze River Economic Belt: New evidence from spatial econometric analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239:118065.
- [25]SHAHBAZ M, NASREEN S, ABBAS F, et al. Does foreign direct investment impede environmental quality in high-, middle-, and low-income countries?[J]. Energy Economics, 2015, 51(SEP.):275-287.
- [26]TANG L, LI K, JIA P. Impact of environmental regulations on environmental quality and public health in China: Empirical Analysis with Panel Data Approach[J]. Sustainability, 2020, 12(2):623.

-
- [27]张勇, 张乐勤, 包婷婷. 安徽省城市化进程中的碳排放影响因素研究——基于 STIRPAT 模型[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4):512-517.
- [28]郭向阳, 穆学青, 丁正山, 等. 长三角多维城市化对 PM_{2.5}浓度的非线性影响及驱动机制[J]. 地理学报, 2021, 76(5):1274-1293.
- [29]陈炳, 曾刚, 曹贤忠, 等. 长三角城市群生态文明建设与城市化耦合协调发展研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3):530-541.
- [30]HUANG B, WU B, BARRY M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(3):383-401.
- [31]农兰萍, 王金亮, 玉院和. 基于改进型遥感生态指数(MRSEI)模型的滇中地区生态环境质量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(8):972-982.
- [32]POLLONI-SILVA E, FERRAZ D, CAMIOTO F D C, et al. Environmental kuznets curve and the pollution-halo/haven hypotheses: An investigation in Brazilian Municipalities[J]. Sustainability, 2021, 13(8):4114.
- [33]李金凯, 程立燕, 张同斌. 外商直接投资是否具有“污染光环”效应?[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(10):74-83.
- [34]杨勇, 邓祥征. 中国城市生态效率时空演变及影响因素的区域差异[J]. 地理科学, 2019, 39(7):1111-1118.
- [35]周婷, 陈万旭, 李江风, 等. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J]. 生态学报, 2021, 41(15):6134-6145.
- [36]沈威, 鲁丰先, 秦耀辰, 等. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(11):3937-3951.
- [37]曾刚, 陆琳忆, 何金廖. 生态创新对资源型城市产业结构与工业绿色效率的影响[J]. 资源科学, 2021, 43(1):94-103.
- [38]刘庆芳, 王兆峰. 长江中游城市群旅游经济发展和生态环境压力耦合与解耦态势[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(2):128-134.
- [39]黄磊, 吴传清. 环境规制对长江经济带城市工业绿色发展效率的影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(5):1075-1085.
- [40]贺斌, 袁晓玲, 张跃胜. 中国城市 PM_{2.5}驱动因素的时空异质性研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(22):53-56.