

长江经济带城市群环境规制效率 时空演变及影响因素

董会忠 韩沅刚¹

(山东理工大学 管理学院, 山东 淄博 255000)

【摘要】: 环境规制是约束企业污染行为的政策组合, 在区域发展过程中发挥着保护生态环境的作用。运用 Undesirable-SBM 模型、变异系数、基尼系数、趋势检验分析法和面板 Tobit 模型分析长江经济带三大城市群 2009~2018 年环境规制效率时空演变特征及影响因素作用机理。研究表明: (1) 长三角城市群的城市发展阶段不同导致环境规制效率呈现差异性, 成渝城市群末端治理不协同造成环境规制效率差异显著, 长江中游城市群环境规制效率差异小, 但水平低于其他城市群; (2) 长三角城市群“经济-生态”协同发展, 环境规制效率上升明显, 成渝城市群注重产业结构调整与政策投入, 环境规制效率稳定在中等水平, 长江中游城市群是低效率水平城市集聚地带, 恶化型城市占比高达 45.16%; (3) 三大城市群在投入产出方面存在一定的提升空间, 需要在资金分配、政策投入以及污染物末端治理等方面加以完善; (4) 市场化水平对城市群环境规制效率影响为正, 经济发展水平、产业结构、城镇化水平和对外开放水平影响对不同城市群环境规制效率产生不同作用。本研究为三大城市群制定实施差异化的环境政策与措施, 推动长江流域城市群可持续发展提供决策依据, 也可为其它区域环境治理提供经验借鉴。

【关键词】: 长江经济带城市群 环境规制效率 时空演变 趋势检验分析法

【中图分类号】: X321;F121.3 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)09-2049-12

作为我国新一轮改革开放型重点区域, 长江经济带已成为具有全球影响力的内河经济带、东中西部合作协调发展带、沿海沿江全面推进的对内对外开放带, 是我国综合实力最强、战略支撑作用最大的区域之一^[1,2]。但是伴随着城市规模快速扩张以及人口高度集聚, 长江经济带也出现了资源过度消耗、生态环境恶化、服务功能受损等问题^[3]。习近平总书记在考察长江流域时明确指出, “推动长江经济带发展必须从中华民族长远利益考虑, 把修复长江生态环境摆在压倒性位置, 共抓大保护、不搞大开发”。加强环境规制力度成为长江经济带可持续发展的必然手段, 长江经济带各行政辖区不断出台生态环境保护的政策措施, 持续加大环境治理投入力度, 2008~2017 年长江经济带环境污染治理投资额由 1664 亿元上升到 3690.4 亿元, 年均增长率为 9.25%, 生态环境保护攻坚战取得阶段性成效。但是, 由于长江流域城市群间经济实力、区域位置、资源禀赋及环境规制力度不同, 仅有未到三分之一的城市完成了《长江经济带生态环境保护规划》制定的具体任务, 主要存在环境治理长效机制尚未建立、产业结构调整迟缓、环境政策执行缺乏力度等问题, 导致大部分城市的环境治理投入未能取得预期效果。环境治理效果呈现明显差异, 影响了整体效果的改善。环境规制效率是评价区域环境治理效果的重要指标, 提升环境规制效率成为长江流域经济带可持续发展的必然选择。作为支撑长江流域经济发展的重要增长极, 长三角、长江中游和成渝三大城市群的经济活跃度明显高于非三大城市群区域^[4], 而环境治理政策和环保投入的差异性, 使得环境政策落实程度不同, 直接影响了长江经济带环境治理效果。在此背景下, 科学测度长江经济带城市群环境规制效率, 探讨三大城市群环境规制效率的时空演变特征及影响因素的作用机理, 对提升城市群环境规制效果、加强城市群绿色协同发展具有重要意义。

作者简介: 董会忠(1968~), 男, 教授, 主要研究方向为技术经济、低碳经济. E-mail:756830581@qq.com
基金项目: 国家社会科学基金项目(19BJY085)

环境规制是约束经济社会活动中污染行为的主要工具，其效率高低反映了某一区域环境治理水平。庇古提出的经济外部性成为环境规制研究理论基础，科斯认为政府规制是解决负外部性的必要手段。随后环境规制效率成为学术界研究的热点领域，主要分为 3 个阶段：第一阶段，国内外学者对环境规制的研究主要集中在“波特效应”、“污染天堂”以及“绿色悖论”等假说验证上，如 Erdogan^[5]、Riccardi^[6]依据实证研究对环境政策进行成本—收益理论分析，由此引出以环境规制效率来反映环境政策的实施效果，除此之外，一些文献基于环境库兹涅茨曲线、污染天堂等理论对环境规制效率进行分析，为环境规制效率实证研究提供了理论指导与支持；但由于所选方法与研究区域存在差异，未得到一致结论。第二阶段的研究主要集中在区域环境规制效率测度方面。环境规制效率是政府在行使环境监管行为过程中，所获得的环境治理效益同环境规制投入之间的比例关系，被看作是评估环境政策与治理投资效果的重要指标^[7]，环境规制效率的测度结果直接关系到实证研究结论的科学性，因而对测度方法的选择尤为重要，主要运用污染治理成本产出法、指标体系法以及数据包络分析 (DEA) 法等方法研究环境规制效率^[8~10]，DEA 对同级决策单元基于相对效率的测度准则，能够保证测度结果客观而有效，成为当前环境规制效率测度最常用的研究方法^[7]。第三阶段的研究则拓展到环境规制效率的空间异质性及驱动因素研究上。现有研究借助空间分析方法与计量经济模型，从静态与动态视角探索区域、行业等尺度下环境规制效率空间分布与演进特征^[11]，并分析发展水平、产业结构、科研投入、外商投资、人力资本、信息化、能源消费等因素对环境规制效率的驱动机理^[12]。

综上所述，学术界关于环境规制效率的研究取得初步成果，但是仍存在较大探索空间^[13]。首先，以往学者采用 DEA 法所构建的投入产出指标体系存在不一致、不合理等问题，导致研究结论与预期目的不符，与现实情况相违背；其次，现有研究多以中国、省域层级为研究对象，对职能、规模存在差异的市域层级环境规制效率研究略显不足，忽略了以城市群为单位的各城市的异质性，导致研究结果示范性不足；第三，现有文献多集中在外部因素，而环境规制效率内部影响关注较少，导致环境规制效率改善方案缺乏系统性。因此，本文结合长江经济带三大城市群发展过程中存在的生态环境问题，分析该区域环境规制效率的动态演进特点与空间格局变化，识别阻碍环境规制实施效果提升的关键因素，为长江经济带城市群环境治理提供决策依据。

1 研究设计

1.1 研究区域概况

长江经济带横跨东中西部三大板块，按照 2016 年国务院发布的《长江经济带发展规划纲要》，可划分为长江三角洲、长江中游地区和成渝地区“三极”城市群，地域范围涉及沪、渝两直辖市以及苏、浙、鄂、皖、赣、湘、川、黔、滇九省份(图 1)。全流域面积约为 205 万 km²，总人口将近 6 亿，经济总量占据全国 40%左右，已在我国区域经济发展战略中占据重要地位。

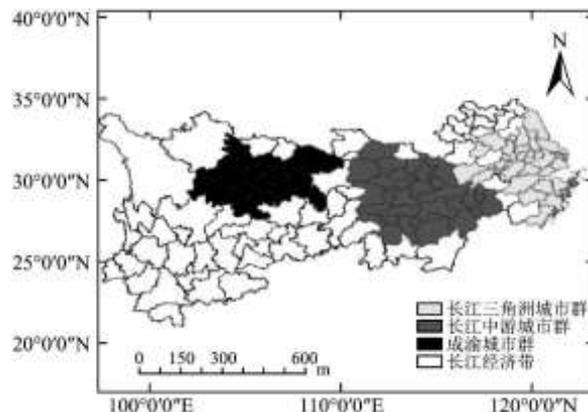


图 1 长江经济带三大城市群布局

自 1984 年我国开始实施城市经济体制改革以来，经济发展重点逐渐转向城市，激发了以上海、南京等城市为主的长江三角

洲地区经济发展活力，长江三角洲也逐渐迈进世界级城市群行列，发展成为长江经济带“领头羊”，也带动了长江中游城市群与成渝城市群发展。近 30 年来，三大城市群已取得举世瞩目的发展成果，经济规模不断扩大(表 1)，基本形成稳定的产业格局和发展动力结构，与此同时，三大城市群发展过程中也出现突出的经济环境失衡问题^[14]。三大城市群肩负着区域发展、双向开发等多重使命，提高环境治理水平对长江流域城市群可持续发展具有重要作用。

表 1 长江经济带三大城市群概况统计(截止到 2019 年底)

区域	城市数量	面积(km ²)	面积占比(%)	人口总数(亿人)	人口占比(%)	经济总量(亿元)	经济占比(%)
长三角城市群	27	27.6	27.6	1.7	41.6	20.4	56.2
长江中游城市群	31	35.0	43.0	1.3	33.0	9.4	25.9
成渝城市群	16	23.9	29.4	1.0	25.7	6.5	17.9

1.2 研究方法与数据来源

1.2.1 研究方法

(1)Undesirable-SBM 模型

数据包络分析法目前在绩效评价、决策分析以及管理工程中应用广泛。为克服投入产出指标可能存在的松弛性与非期望产出被忽略的问题，本研究在环境规制效率测度方法上采用 Undesirable-SBM 模型。该模型由 Tone^[15]提出，通常期望环境管制下由工业的排污活动、建设用地、生产设备和城市生活垃圾所带来的生态污染越小越好，即环境规制效果最优化，模型表达如下：

$$\begin{aligned}
 Z = \min & \frac{1 - \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{u_1 + u_2} \left(\sum_{r=1}^{u_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{l=1}^{u_2} \frac{s_l^b}{y_{l0}^b} \right)} \\
 \begin{cases}
 s. \ tx_0 = X\lambda + s^- \\
 y_0^g = Y^g\lambda - s^g \\
 y_0^b = Y^b\lambda + s^b \\
 \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \ s^- \geq 0, \ s^g \geq 0, \ s^b \geq 0
 \end{cases} & \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中： x 、 y^g 、 y^b 分别为环境规制投入矩阵、期望产出矩阵以及非期望产出矩阵中的变量； s^- 、 s^g 、 s^b 分别为以上 3 种变量的松弛变量； λ 表示权重向量；目标函数值 Z 为环境规制效率。

(2) 变异系数与基尼系数

变异系数、基尼系数在衡量区域性数据差异性中应用广泛^[16]。变异系数能够反映指标离散程度，基尼系数则能够衡量区域内部各城市环境政策实施效果差距。基尼系数越大，说明长江经济带三大城市群环境规制效率差距越明显，不平衡性越高。具体计算如下：

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

$$Gini = \frac{n+1}{n} + \frac{2}{n^2\mu} \sum_{i=1}^n iZ_i$$

式中： μ 表示环境规制效率的均值； σ 表示为环境规制效率标准差； n 表示为样本城市数量； Z 表示为环境规制效率由低到高排序后第 i 个城市环境规制效率的取值。

(3) Mann-Kendall 检验与重标极差法(R/S)分析

Mann-Kendall 检验属于非参数统计检验方法，该方法优点在于无需对数据分布特征进行设定，且不存在数据缺失与数据异常等问题^[17]。假设对某一城市进行逐年监测，得出在研究期内该城市环境规制效率时间演变趋势。检验统计量 S 计算如下：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(X_j - X_i), \quad (i = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (3)$$

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & (X_j - X_i) < 0 \end{cases}$$

S 服从正态分布，且均值为 0，方差 $V(S_i) = n(n-1)(2n+5)/18$ ，标准方差 Z 如下：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S_i)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S_i)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

在给定 α 置信水平上，计算 Kendall 检验统计量 $\tau = S/m$ ， m 表示可比较差值数据组个数之和。若 $\tau > 0$ 或 < 0 分别表示该城市环境规制效率具有上升或下降趋势， $\tau = 0$ 则为稳定。趋势显著性检验中，当 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ 时，说明趋势显著，显著性水平 α 通常为 10% 和 1%，分别为显著水平和极显著水平。

重标极差法(R/S)是在利用过去时间内的指标变化，预测指标未来趋势的分析方法^[18]。在 Kendall 检验的基础上，本研究采用基于 R/S 分析法上的 Hurst 指数法预测各地环境规制效率未来变化趋势。假定第 i 个城市的环境规制效率为时间序列数据 x_i ，并将 x_i 分成 M 个长度为 $N(N \geq 3)$ 的子序列数据。对于每一个子序列设为 E_m ，子序列中对应元素即为 $X_{k,m}$ 。计算步骤如下：

$$X_{k,m} = \sum_{k=1}^N (x_{k,m} - \bar{x}) \quad (5)$$

式中： \bar{x} 表示第 m 个子序列数据的均值； $X_{k,m}$ 表示第 m 个子序列数据的累计离差，得极差为：

$$R = \max(X_{k,m}) - \min(X_{k,m}) \quad (6)$$

S 表示各子序列数据的标准差。根据 Hurst 的多次实践经验，建立 R 与 S 数量关系表达式如下：

$$R/S = K (m)^H \quad (7)$$

对式(7)两边取对数，并采用最小二乘法计算 H 值，即 Hurst 指数估算值。 $H=0.5$ 表示时间序列数据为随机序列， $0 < H < 0.5$ 表示时间序列数据表现为趋势反持续性， $0.5 < H < 1$ 表现为趋势持续性，且 H 越接近 0，反持续性越强，反之则持续性越强。

(4) 面板 Tobit 模型

Tobit 模型是由经济学家 Tobin 提出的，是用于分析因变量受限下的计量方法^[19]。本研究将长江经济带城市群各城市环境规制效率界定在 0~1 之间，能够规避一般模型所带来的误差。Tobit 模型表达式如下：

$$Y = \begin{cases} Y^* = \beta X + \mu & Y^* > 0 \\ 0 & Y^* \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中：Y 表示实际效率值； Y^* 表示受限因变量；X 表示自变量； β 表示回归参数值； μ 表示误差项， $\mu \sim (0, \sigma^2)$ 。

1.2.2 指标选取与数据来源

本文参考现有环境规制效率的概念研究^[13,20]，结合长江经济带城市群的工业市场环境与污染治理政策，从成本—效益方向出发，建立符合长江流域特点的环境规制效率指标体系(见表 2)。指标体系遵循数据综合性、合理性、可获得性原则，分析三大城市群环境治理投入与效果。具体数据来源于《中国城市统计年鉴(2009-2018)》《中国环境统计年鉴(2009-2018)》《中国城市建设统计年鉴(2009-2018)》和上海、江苏、浙江、江西、湖北、湖南、成都、重庆等省(市)统计年鉴及各城市国民经济社会发展统计公报等，其中政策投入的指标数据来自于各城市生态环境局年度报告。

表 2 三大城市群环境规制效率指标评价体系

一级指标	二级指标	三级指标	四级指标	方向
环境规制效率	投入指标	物力投入	污水处理厂座数(X1)	+
			建成区排水管道密度(X2)	+

	资本投入	每万人生活垃圾无害处理场次座数 (X3)	+		
		单位产值排水投资总额 (X4)	+		
		单位产值园林绿化投资总额 (X5)	+		
		单位产值市容环境投资总额 (X6)	+		
		劳动力投入	单位产值环境保护部门专职人员数 (X7)	+	
			政策投入	环境保护工作依申请公开件数 (X8)	+
		环境信访投诉件数 (X9)		-	
		产出指标	污染控制	工业烟(粉)尘去除率 (X10)	+
				工业二氧化硫去除率 (X11)	+
	工业固体废物综合利用率 (X12)			+	
	工业废水处理率 (X13)			+	
	环境质量		建成区绿化覆盖率 (X14)	+	
			单位产值工业废水排放量 (X15)	-	
			单位产值工业烟(粉)尘排放量吨 (X16)	-	
			单位产值二氧化硫排放量吨 (X17)	-	

2 环境规制效率时空演变特征

2.1 环境规制效率时空差异特征

本研究根据环境规制效率评价体系与 Undesirable-SBM 模型，基于长江经济带三大城市群 2009~2018 年指标数据，运用 DEASOLVER PR05.0 软件测算三大城市群的环境规制效率值(图 2)。

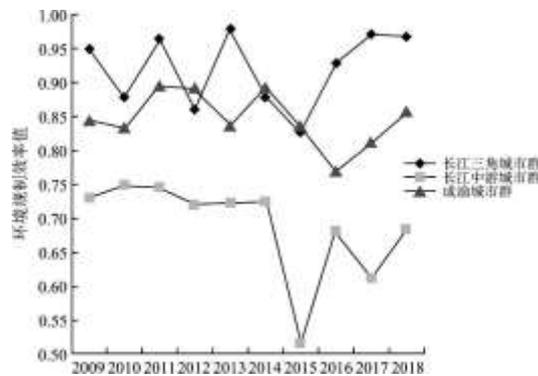


图 2 2009~2018 年长江经济带三大城市群环境规制效率变动趋势

从时序变化看，长三角群环境规制效率领先于其他城市群。主要原因是，长三角城市群长期具备经济发展与地理位置优势，产业结构合理，环境保护意识强烈，生态文明建设先进，保证了环境规制效率维持在较高水平。成渝城市群处在中等环境规制效率水平上，但是提升幅度不大，主要原因是尽管近几年成渝城市群产业结构调整较大，工业结构逐渐优化，传统产业得到强化修复，但化石能源依然占能源消耗主要比重，新动能没有得到充分孕育，导致环境治理没有达到理想效果。长江中游城市群环境规制效率缺乏改善，总体低于 0.75。其原因在于长江中游城市群处于长江经济带腹地，其沿江地带重型化工产业分布密集，工业转型动力不足，中游城市群环境污染问题没有得到根本性扭转。

由图 3a 结果显示，三大城市群环境规制效率差异特征为：长三角城市群>成渝城市群>长江中游城市群，变异系数与基尼系数反映的排列结果一致。长三角城市群内部差异显著，呈波动上升趋势，变异系数由 2009 年的 0.26 波动至 2018 年的 0.34，基尼系数由 2009 年的 0.13 波动至 2018 年的 0.19。成渝城市群环境规制效率内部差异缓慢上升，2009~2018 年变异系数与基尼系数分别由 0.25 和 0.09 上升至 0.33 和 0.13。长江中游城市群内部差异相对稳定，变异系数与基尼系数分别保持在 0.14~0.25 和 0.06~0.11 低水平上。

根据图 3b 和 3c 结果显示，从末端治理角度看，污染控制差异程度显著>环境治理差异程度。说明三大城市群环境规制效率差异主要源于城市群内部污染控制手段的差异，其中成渝城市群表现最为明显，主要是由于环境政策下长江上游地带生态屏障具有稳固性，但同时上游地带复杂的地貌、频发的灾害又导致其具有一定的脆弱性，为环境治理措施的开展带来难度。其次，城市发展阶段不同是长三角城市群环境规制效率提升的瓶颈，如上海、杭州等城市已率先在全国走出一条城市化发展与生态文明建设相协调的道路，而铜陵一类传统重工业城市还处在工业化发展中后期，经济发展理念的差异落后于长三角其他城市。长江中游城市群环境规制效率差异较低，但多数城市在研究期内效率水平低下且上升趋势不明显，说明“逐底竞争”现象较为明显。

2.2 环境规制效率时空演变特征

截取 2009、2014 和 2018 年时间断面，采用 ARCGIS 软件运用自然断点法，将三大城市群各城市划分为 4 个类型(图 4)，分别探讨长江经济带三大城市群环境规制效率的时空演变特征。

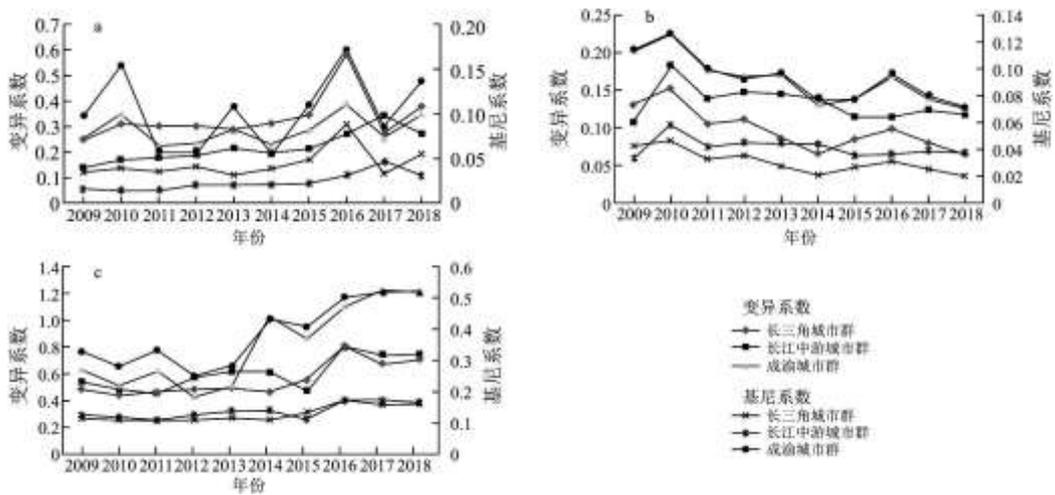


图 3 2009~2018 年长江经济带三大城市群环境规制效率(a)、污染控制(b)、环境质量(c)变异系数与基尼系数

从空间分布看，2009~2018 年高效率城市主要出现在成渝西北部地区以及长三角沿海地区，中游地带未出现高效率城市。长三角城市群环境规制效率整体维持在较高水平，集中在江苏、浙江等经济发达省份，说明这些省份内的城市依托长三角地区

地理优势, 协同合作, 区域发展模式得到优化, 沿江沿海地区工业走上环境与经济协调发展道路。成渝城市群高水平城市数量保持稳定, 且高效率城市表现为集聚特征, 集中分布在靠近“三江源”四川西北部地区, 说明“三江源”等生态环境保护政策对四川地区的部分城市起到辐射作用, 巩固了长江上游生态文明建设。而重庆市环境规制效率长期偏低, 主要因为重庆市作为一个传统重工业城市, 产业发展与能源消费形成的结构性污染问题依然突出。长江中游城市群环境规制效率水平较低, 究其原因是在长江经济带承东启西的地理优势, 承接了下游向中下游地区的产业转移, 同时中游地带江流相对密集, 大型重化工厂一般设立在沿江地带, 产业过度密集加重了环境承载负荷, 短期内厂房转移、设备更换难以进行, 降低了环境规制效率。

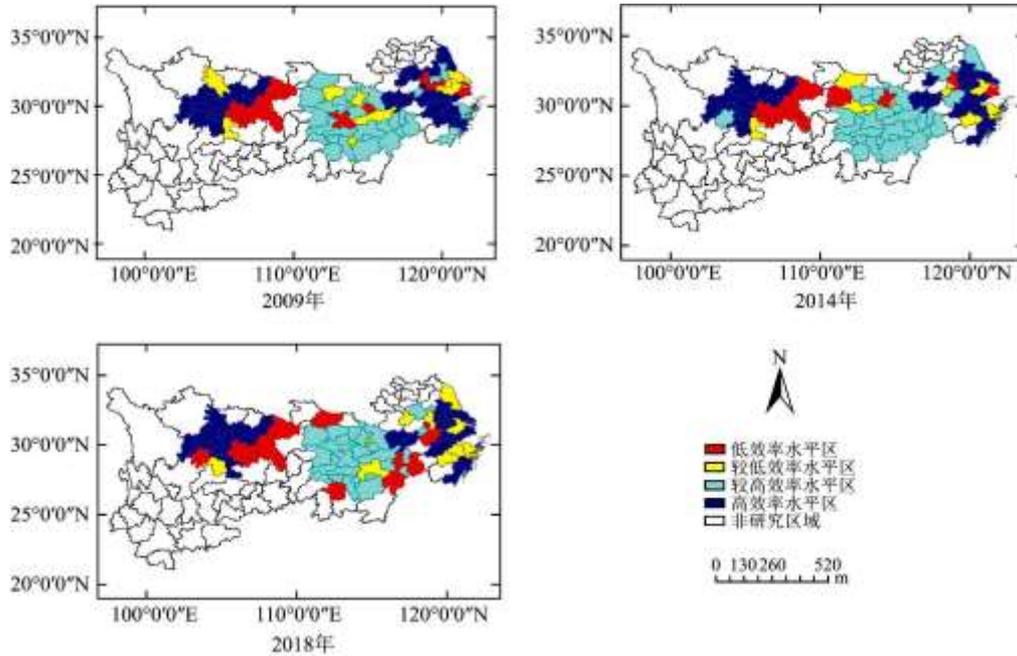


图 4 长江经济带三大城市群环境规制效率分布

为分析三大城市群环境规制效率的时空演变趋势, 对 2009~2018 年环境规制效率进行 Mann-Kendall 检验。检验结果表明(图 5a), 过去 10 年长江经济带城市群环境规制效率普遍恶化, 其显著恶化区域集中在金华、马鞍山、宣城 3 个长三角城市以及襄阳、宜昌、抚州等 7 个长中游城市。成渝城市群内部城市较为稳定, 无明显变化趋势。三大城市群仅有杭州表现为显著上升趋势, 长三角城市群环境规制效率上升城市较多但均不显著。进一步对长江经济带城市群环境规制效率的未来趋势进行 R/S 检验(图 5b), 并结合图 5a 将三大城市群各城市划分为恶化型、稳定型、改善型(表 3)。根据统计结果显示, 三大城市群未来可能恶化的城市分别占 33.33%、45.16%、25%, 环境规制效率恶化型城市中包括了武汉等城市群重点城市, 说明经济发展水平不能决定环境规制效率的高低。从长江经济带城市群表现出来的高效率城市数量少但整体质量提升的现象, 可以推断环境质量的恶化不能归结到环境政策上, 相反环境政策存在着渐进性与滞后性, 这决定了环境规制效率的提高是一个长期的过程, 须从环境政策内部寻找解决方案。

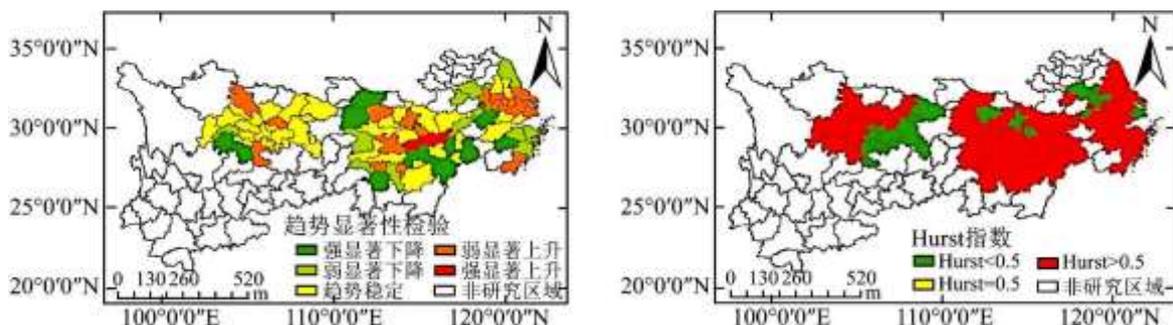


图 5 长江经济带环境规制效率 Mann-Kendall 趋势检验与 Hurst 指数空间分布结果

表 3 长江经济带三大城市群 R/S 分析结果下城市环境规制效率分类

城市群	类型	城市名称	个数	百分比
长三角城市群	恶化型	盐城、宁波、绍兴、金华、台州、合肥、马鞍山、池州、宣城	9	33.33%
	稳定型	上海、南京、镇江、扬州、泰州、杭州、嘉兴、湖州、舟山、铜陵、安庆	11	40.74%
	改善型	苏州、温州、常州、无锡、南通、芜湖、滁州	7	25.93%
长中游城市群	恶化型	武汉、潜江、黄石、荆门、宜昌、鄂州、襄阳、株洲、衡阳、常德、娄底、宜春、抚州、上饶	14	45.16%
	稳定型	孝感、荆州、黄冈、咸宁、仙桃、天门、长沙、益阳、南昌、景德镇、新余、鹰潭、吉安	13	41.94%
	改善型	岳阳、九江、湘潭、萍乡	4	12.90%
成渝城市群	恶化型	泸州、乐山、眉山、宜宾	4	25.00%
	稳定型	成都、自贡、德阳、遂宁、内江、南充、达州、雅安、资阳、重庆	10	62.50%
	改善型	绵阳、广安	2	12.50%

2.3 环境规制效率松弛变量分析

松弛变量情况可以判别是否存在投入冗余或产出不足的问题，从而识别导致环境规制效率低下的内在原因。本研究根据非期望产出下的 SBM 模型，选取 2017 年数据对长江三大城市群的投入、产出松弛变量进行分析(表 4)，若存在松弛变量不为 0，即认为该城市环境规制效率属于弱 DEA 有效，并根据具体情况指出改进空间。

从城市群环境规制效率投入方面看，污水处理厂座数(X1)、建成区排水管道密度(X2)以及每万人生活垃圾无害处理场次座数(X3)等设备投入冗余量相对较少，介于 0~4 之间，说明三大城市群环境规制投入产生一定效果，污染防治设备得到充分利用。长三角城市群在排水治理投资(X4)、市容环境投资(X6)上冗余量较多，说明两类投资在污染治理存在资金利用与管理分配问题，造成资金投入无法在环境治理各环节得到落实。环境保护部门专职人员(X7)在三大城市群中均表现为强投入冗余状态，尤其是成渝城市群达到近 70 的冗余水平，说明环保部门人力资源还存在较大潜力，三大城市群应进一步开发环保劳动力潜在价值，发挥环保人员在污染治理方面的关键作用。环境保护依申请公开件数与环境信访投诉件数冗余情况明显，说明城市群环境管制政策投入空间应深入开发，环境保护信息公开与环境监管平台建设应因地制宜，因时制宜，日趋完善。此外，未发现各城市群存在投入松弛变量为 0 的情况，因此三大城市群都应加强对环境规制投入资源的管理利用。

表 4 长江经济带三大城市群环境规制效率及其松弛变量情况

城市群	长三角	长江中游	成渝
效率值	0.92	0.69	0.85

投入松弛变量	X1	0.30	2.85	3.90
	X2	0.51	1.56	0.60
	X3	0.21	0.93	1.70
	X4	3.26	15.60	1.28
	X5	16.20	35.70	44.50
	X6	2.23	7.80	3.43
	X7	10.10	22.3	66.90
	X8	2.30	0.21	3.10
	X9	0.21	0.11	0.56
产出松弛变量	X10	0.70	0	0
	X11	0.40	0	0
	X12	0	0	0
	X13	3.11	8.51	6.18
	X14	2.31	6.84	6.10
	X15	1.23	4.56	0.21
	X16	0.63	2.13	0.44
	X17	0.57	0.89	2.13

从城市群环境规制产出看，期望产出方面，工业烟尘(X10)、工业二氧化硫(X11)和工业固体废物(X12)工业废水(X13)等工业污染治理效率指标冗余量较少，其中工业二氧化硫去除率(X11)与工业固体废物综合利用率(X12)水平较高，说明三大城市群在工业污染防治方面保持严格管控的态度，治理技术水平已经趋近成熟，环保部门针对工业污染造成的雾霾、水体营养化等流域污染问题能够采取行之有效的措施进行解决；建成区绿化覆盖率(X14)存在明显产出不足，可能原因是随着城市建设规模扩大，沿江与沿河地带的林网与草坪等绿化建设易被毁坏与占用，导致绿化建设产出不足；工业废水(X15)、工业烟尘(X16)以及工业二氧化硫(X17)等非期望产出指标均存在排放过量的问题，究其原因是长江城市群部分工业生产效率过低，企业经营仍然依赖于规模生产获得盈利，导致环境治理无法实现源头治理。从以上分析可以发现，期望产出整体实现优化，而非期望产出严重不足，即长江经济带城市群未达到最优产出水平。

3 环境规制效率影响因素分析

3.1 影响因素指标选取

根据对环境规制效率时空演变特征、投入产出情况分析，可以发现长江经济带城市群环境规制效率存在显著的时序演化与空间差异、投入冗余与产出不足等现象。结合已有研究^[5,21]与三大城市群发展阶段，构建城市群环境规制效率影响因素指标体系

(表 5), 运用 Tobit 模型分析外部因素对环境规制效率时空演变的影响。

表 5 长江经济带城市群环境规制效率影响因素选取

影响因素	指标名称	指标单位
经济发展水平	人均 GDP(Y1)	元/人
产业结构	规模以上工业产值占比(Y2)	%
市场化水平	私营企业与个体企业就业人口占比(Y3)	%
城镇化水平	城镇人口占比(Y4)	%
对外开放水平	实际使用外资金额占比(Y5)	%

3.2 Tobit 回归结果

将长江城市群环境规制效率设定为因变量, 将以上影响因素指标设定为自变量, 利用 Stata14.0 对样本数据进行回归分析, 模型回归结果见表 6。

表 6 Tobit 模型回归结果

指标系数	长三角城市群	长江中游城市群	成渝城市群
Y1	0.51** (2.24)	-0.26* (-1.96)	-0.08* (1.77)
Y2	0.01** (1.98)	-0.03** (2.3)	-0.16** (-2.38)
Y3	0.07** (2.43)	0.04 (0.24)	0.01 (0.03)
Y4	-1.66** (-2.27)	-0.69*** (-2.84)	2.47** (2.19)
Y5	0.24** (2.51)	-0.17* (-2.32)	-0.09* (-1.73)
Con_	2.34** (1.98)	1.46** (2.31)	0.38 (0.95)
obs	270	310	160

(1) 从经济水平层面看, 人均 GDP 呈现地区差异, 只有长三角城市群(0.51)呈显著正相关, 长江中游(-0.26)、成渝(-0.08)

两大城市群均呈现不同程度的负向影响。这说明随着生态经济协同建设的不断推进，长三角城市群在科学引导经济重心由求“速”向求“质”过渡，合理调整工业规模，减少规模生产造成的环境污染工作已取得初步效果，但长江中游城市群与成渝城市群仍被唯“GDP”论驱使，扩大经济规模以促进城市群经济快速发展，使环境效益受损。

(2)从产业结构层面看，规模以上工业产值占比的影响存在空间异质性。除长三角城市群(0.01)外，长江中游(-0.16)、成渝(-0.03)城市群规模以上工业产值影响系数均显著为负。产业结构是导致长江中游与成渝城市群环境规制效率下降的因素之一。成渝城市群以高工业产业比重、资源引致型制造贸易为主的产业结构加剧工业污染物排放，导致生态环境质量改善不足，环境规制效率呈下滑态势^[22]。而长江中游城市群工业产业集聚度高，且沿江分布集中，导致工业经济与生态环境保护矛盾更加突出，抑制了环境规制效率的提升。

(3)从市场化水平层面看，私营企业与个体企业就业人口占比影响均为正，而除长三角城市群(0.07)外，长江中游(0.04)和成渝城市群(0.01)影响系数均为通过显著性。市场化水平在长江三大城市群环境规制效率提升中促进作用较低，建立高水平的市场经济体制能够为各地区营造良好的市场氛围，鼓励企业引入先进的生产技术与设备，从而防止资源过剩，解决供需矛盾，优化生产效率，同时能够帮助完善政府决策体系，提高政府规制要素质量与配置效率，进而提升环境规制效率。

(4)从城镇化水平层面看，长三角(-1.66)和长江中游(-0.69)呈现显著负向影响，而成渝城市群(2.47)呈较高的促进作用。新型城镇化中生态文明建设的缺失是导致城镇化起抑制影响的主要原因^[23]，长三角、长中游城市群在实现人口城镇化、经济城镇化的同时，也造成了交通拥挤、资源紧缺以及耕地面积减少等问题，加大了城市群生态环境承载能力，不利于环境规制效率的提升。而城镇化水平是成渝城市群环境规制效率提升的首要因素，在城镇化建设过程中，合理设置生态红线，倡导城市绿色消费、绿色生产和绿色生活等理念，提高了环境规制效率。

(5)从对外开放水平层面看，实际使用外资金额占比的影响存在空间异质性。长三角城市群(0.24)对环境规制效率显著促进，而长江中游(-0.17)和成渝城市群(-0.09)显著抑制。基于“污染天堂”假说分析，成渝城市群与长江中游城市群的对外开放水平影响系数为负，说明这两个城市群环境政策强度门槛较低，相对经济发达的东中部地区将高耗能、高污染型工业向该地区转移，环境规制效率进一步下滑。而长三角城市群在一定的经济基础上谋求高质量发展，规避低端落后产业投资，减少环境污染与化石能源消耗量，同时引导外资进入环保型、科创型产业，环境规制效率一直保持在较高水平。

4 结论与讨论

本研究在综合考虑长江经济带城市群发展阶段的环境污染问题和工业发展现状，立足于目前新型城镇化与生态文明建设结合的形势导向，建立相应的城市群环境规制效率投入产出指标评价体系，运用 Undesirable-SBM 模型测算长江经济带三大城市群 2009~2018 年 74 个地级市环境规制效率，对其时空演变及影响因素进行分析，主要结论如下：

(1)从时空差异来看，2009~2018 年长江中游城市群变异系数与基尼系数分别为 0.14~0.25 和 0.06~0.11，成渝城市群变异系数与基尼系数分别为 0.25~0.33 和 0.09~0.13，两者环境规制效率内部差异较低，城市间相近的发展水平没有带来“逐底竞争”现象出现。长三角城市群变异系数与基尼系数水平较高，各城市间环境治理强度差异较大，成渝城市群环境规制效率差异化原因在于污染控制手段不协同。

(2)从时空演变特征来看，2009~2018 年长江经济带城市群环境规制效率整体排名为长三角城市群>成渝城市群>长中游城市群。研究期末长江经济带城市群环境规制效率显著下降，恶化区域主要包括长三角城市群的金华、马鞍山、宣城、长中游城市群的襄阳、宜昌、抚州等 10 个城市，成渝城市群重庆市环境规制效率长期稳定在低水平，三大城市群仅有杭州呈明显上升趋势。

(3)从松弛变量分析看，长江经济带三大城市群存在明显投入冗余、产出不足。投入冗余表现为污水治理、市容环境以及环

保人员投入过剩，资源分配不当，其中长三角城市群在污水治理投资与城市环境建设投入高于其余两大城市群。产出不足集中体现在工业二氧化硫、工业废水等污染物排放过大上，而二氧化硫去除率、固体废物综合利用率等治理效率达到标准，即长江经济带城市群环境治理末端治理相对合格，但源头治理存在不足。

(4)从影响因素分析来看，长江经济带城市群环境规制效率受多重因素影响显著，经济发展水平、产业结构、城镇化水平、对外开放水平对各城市群的空间异质性较为显著。其中，长三角城市群环境规制效率提升来源于经济发展、产业结构、市场化水平和对外开放水平，而未考虑生态建设的城镇化水平对其环境规制效率带来负向影响。成渝城市群环境规制效率的提升主要来自于城镇化水平，而长江中游城市群除市场化水平外，工业产业模式落后、规制门槛过低等问题作用，导致其环境规制效率受多方面因素抑制。

根据对长江经济带城市群环境规制效率的分析，对长江经济带城市群环境规制效率提出一些政策启示。三大城市群应各自根据现阶段环境政策差异化制定发展方案，实现城市群经济发展与生态建设共赢以谋求可持续发展。具体包括，成渝城市群由于地处生态环境重点保护区域，应承担土壤污染防治、农村生态环境建设等自然环境保护任务，同时优化产业结构；长江中游城市群存在沿江产业转型不及时与环境承载力有限的问题，应规避污染型产业的引入，推动新旧动能转换，构建新型绿色循环经济体系；长三角城市群要根据新常态下绿色循环经济的发展要求，大力发展新型能源技术与环境保护知识。同时，城市群成“群”的关键在于城市间的交互影响与协同互动，加强城市群间的政策协同，共享环境信息，促进环境治理交流合作。加强城市群内城市与城市、城市群与城市群间投入要素的流动性，构建资源共享平台，弥补并清除生态环境修复中存在的短板与障碍。

基于数据可获得性与合理性，本文对长江经济带三大城市群环境规制效率进行了研究，揭示城市群环境规制效率时空差异与时空演变，探寻提升环境规制效率的内外部因素，为改善长江经济带环境政策实施效果提供科学依据。研究选取跨度 10 年 74 个地级市数据为研究对象，较大的时空尺度降低了小尺度数据不显著、不敏感问题，且多时间纬度、多空间格局的区域复合研究是未来区域环境治理研究发展方向。但在比较决策单元环境规制效率中，本研究对有效决策单元间环境效率比较不足，容易导致对环境规制效率提升的政策建议缺乏针对性，这是未来需要进一步研究的问题。

参考文献:

- [1]王振波,梁龙武,王旭静.中国城市群地区 PM(2.5)时空演变格局及其影响因素[J].地理学报,2019,74(12):2614-2630.
- [2]方创琳.改革开放 40 年来中国城镇化与城市群取得的重要进展与展望[J].经济地理,2018,38(9):1-9.
- [3]王依,杜雯翠,秋婕.对进一步推进《长江经济带生态环境保护规划》实施的再思考[J].中国环境管理,2019,11(4):86-92.
- [4]谈佳洁,刘士林.长江经济带三大城市群经济产业比较研究[J].山东大学学报(哲学社会科学版),2018(1):138-146.
- [5]ERDOGAN A M. Foreign direct investment and environmental regulations:A survey[J]. Journal of Economic Surveys, 2014, 28(5):943-955.
- [6]RICCARDI R, BONENTI F, ALLEVI E, et al. The steel industry: A mathematical model under environmental regulations [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 242(3):1017-1027.
- [7]程钰,任建兰,陈延斌,等.中国环境规制效率空间格局动态演变及其驱动机制[J].地理研究,2016,35(1):123-136.
- [8]刘研华,王宏志.我国环境规制效率的变化趋势及对策研究[J].生态经济,2009(11):172-175.

-
- [9] 崔学刚, 方创琳, 张蕾. 京津冀城市群环境规制强度与城镇化质量的协调性分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(4):563-575.
- [10] TANG D, TANG J, XIAO Z, et al. Environmental regulation efficiency and total factor productivity: Effect analysis based on Chinese data from 2003 to 2013[J]. Ecological Indicators, 2017, 73:312-318.
- [11] SMULDERS S, YACOV T, AMOS Z. Announcing climate policy: Can a green paradox arise without scarcity?[J]. Journal of Environmental Economic and Management, 2012, 64(9):364-376.
- [12] 李汝资, 宋玉祥, 李雨婷, 等. 近 10a 来东北地区生态环境演变及其特征研究[J]. 地理科学, 2013, 33(8):935-941.
- [13] 任梅, 王小敏, 刘雷, 等. 中国沿海城市群环境规制效率时空变化及影响因素分析[J]. 地理科学, 2019, 39(7):1119-1128.
- [14] 段学军, 虞孝感, 邹辉. 长江经济带开发构想与发展态势[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(10):1621-1629.
- [15] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operation Research, 2001, 130(3):498-509.
- [16] 孙才志, 朱云路. 基于 Dagum 基尼系数的中国区域海洋创新空间非均衡格局及成因探讨[J]. 经济地理, 2020, 40(1):103-113.
- [17] 刘雁慧, 李阳兵, 梁鑫源, 等. 中国水资源承载力评价及变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5):1080-1091.
- [18] ONDERKA M, MRAFKOA L, KREINA, et al. Long-Term Persistence of stream nitrate concentrations (memory effect) inferred from spectral analysis and detrended fluctuation analysis [J]. Water Air & Soil Pollution, 2012, 223(1):241-252.
- [19] 李珊, 张玲玲, 丁雪丽, 等. 中国各省区工业用水效率影响因素的空间分异[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11):2539-2552.
- [20] 王济干, 马韵鸿. 长江经济带工业环境规制效率时序及空间分异研究[J]. 工业技术经济, 2020, 39(1):113-121.
- [21] 王兆峰, 刘庆芳. 长江经济带旅游生态效率时空演变及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10):2289-2298.
- [22] 李琳, 刘琛. 互联网、禀赋结构与长江经济带工业绿色全要素生产率——基于三大城市群 108 个城市的实证分析[J]. 华东经济管理, 2018, 32(7):5-11.
- [23] 王兆峰, 刘庆芳. 长江经济带旅游生态效率时空演变及其与旅游经济互动响应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(9):1945-1961.