

# “双碳”目标下区域生态效率评价及提升路径研究

## ——以长江经济带为例

苏翔 蒋友泽 杨玉雪

江苏科技大学经济管理学院

**摘要：**长江经济带的城市生态效率表现出明显的区域性特征。通过非期望产出超效率 SBM 模型，对 2012—2020 年长江经济带 11 个省市的城市生态效率进行测算，采用 Malmquist 指数和 Tobit 模型，对测算结果进行分析，并探究影响城市生态效率的因素。结果表明，区域的生态效率整体上自东向西逐渐降低，空间集聚效应明显；科学技术是长江经济带生态效率的主要增长点；同时，人均国内生产总值对长江经济带城市生态效率的影响通过 1% 的显著性检验，影响明显。应处理好经济发展与生态保护的关系，控制来自生活、工业的污染；要发展信息和自动化产业，以绿色、集约、高科技为重点，加快传统产业转型升级；坚持绿色发展、生态优先的理念，依靠科技进步提高资本和人力的产出效率。

**关键词：**长江经济带；生态效率；超效率 SBM 模型；Tobit 模型

**作者简介：**苏翔，管理学博士，江苏科技大学经济管理学院教授、博士生导师，研究方向：管理信息系统、成本管理与控制；；蒋友泽，江苏科技大学经济管理学院硕士研究生，研究方向：区域创新管理；；杨玉雪，管理学博士，江苏科技大学经济管理学院讲师，研究方向：生态经济。；

**收稿日期：**2023-07-05

改革开放以来，中国经济建设取得了长足的进步[1]。面对日益严峻的环境问题，国家提出“碳达峰”“碳中和”的“双碳”目标，表明我国生态文明建设进入转变发展模式的关键时期，保护生态环境已经成为共识[2]。生态效率是衡量经济可持续发展的核心指标，企业通过提高环境绩效，实现效益最大化和环境污染最小化，从而提高企业的核心竞争力[3]。关于生态效率的研究涉及企业、省市区域、国家等各层面[4, 5]，面对新的发展挑战，要实现“双碳”目标，实现可持续发展，必须提高生态效率水平。

长江经济带由上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖南、湖北、重庆、四川、云南和贵州十一个省市组成，面积约占全国总面积的 21.4%，人口数量占全国总人口近 43%，经济总量占全国 GDP 总量的 45% 以上。长江经济带西连丝绸之路经济带，东接 21 世纪海上丝绸之路，是“一带一路”倡议的重要支撑和助推器，也是生态文明建设的先行示范带，在经济、文化、人口、生态环境等各方面都有十分重要的地位[6]。本文基于“双碳”视角，在传统指标的基础上，结合长江经济带地区特点，提出“人口密度”“建成区绿化率”等新型指标，更加准确评估地区生态效率，对现阶段经济发展有重要意义。

## 1 研究方法

### 1.1 模型方法

传统的 DEA 模型默认产出均为“正向产出”，即获得期望产出，但是在地区发展的过程中不可避免地存在“负向产出”，也就是对城市发展无益甚至有害的非期望产出。为解决这一问题，学者提出了基于松弛变量的非径向、非定向的 SBM 模型，使用这一模型来衡量区域的生态效率，并逐渐考虑非期望产出因素(主要是废水、废气和固体废物)。本文结合长江经济带特点，采用包含非期望产出的超效率 SBM 模型对长江经济带区域生态效率进行测算。

Malmquist 指数最初由 Sten Malmquist 于 1953 年提出，后经 Rolf Färe 等发展而来。主要用来衡量 2 个时间点、2 个区域技术效率的变化情况，基于技术效率和技术进步对生产效率变化两个方面进行解释。Malmquist 生产率指数大于 1 表示生产效率提高，小于 1 表示生产效率下降，等于 1 表示生产效率没有发生变化。

Tobit 模型是 James Tobin 提出的因变量受到限制的一种回归模型，又称截断式回归模型。随机 Tobit 模型可以针对 SBM 方法因变量数值是切割(片段)的特点，避免因普通最小二乘法无法完整地呈现数据而导致估计偏差的问题。

## 1.2 构建指标体系

本文综合分析生态效率与资本、资源、能源和环境的关系，构建生态效率指标体系(见表 1)[7]。

表 1 生态效率指标体系

指标	指标构成	指标说明
投入指标	资本投入	固定资产投资/亿元
	资源投入	地区用水量/万吨
		城市建筑面积/平方千米
		劳动力投入
	能源投入	能源消耗量/万吨标准煤
产出指标	期望产出	地区生产总值/亿元
	非期望产出	城市绿地面积/万公顷
		废水排放量/万吨
		二氧化碳排放量/万吨
		工业固体废物排放量/吨

生态效率指标描述性统计结果见表 2。

## 2 结果及分析

通过对长江经济带各省市的统计年鉴、《中国城市统计年鉴》、国家统计局和中国碳核算数据库的数据进行整理，得到面板数据，结果见表 3。

### 2.1 结果分析

#### 2.1.1 城市生态效率的时间演变分析

通过 SBM 模型分析, 得到 2012—2020 年长江经济带城市生态效率的综合效率、纯技术效率和规模效率值(见图 1)。综合效率反映城市生态的综合资源配置情况, 纯技术效率反映城市的管理和制度水平, 规模效率反映城市生态的规模水平。

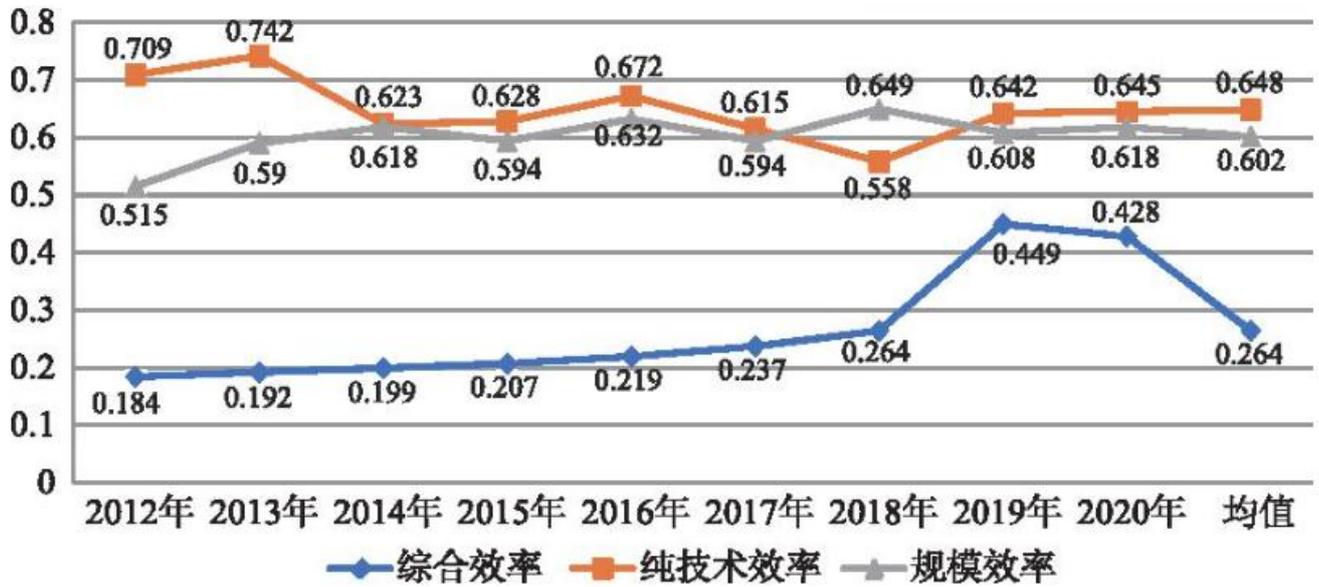


图 1 2012—2020 年长江经济带城市生态效率

长江经济带的综合效率在 2020 年出现轻微下滑, 这是由于经济的快速增长给城市的生态环境带来压力, 城市综合效率由 2018 年的 0.264 增至 2019 年的 0.449, 随后回落到 2020 年的 0.428。规模效率曲线和综合效率曲线的变化基本保持一致, 整体上规模效率要高于综合效率。2012—2020 年规模效率均值为 0.602, 纯技术效率均值为 0.648。2018 年规模效率超过纯技术效率, 达到 0.649, 规模效率较低是综合效率低的主要原因, 因此提高规模效率是提高长江经济带城市生态水平的关键。

表 2 描述性统计结果

一级指标	二级指标	最大值	最小值	平均值	标准差
投入指标	固定资产投资/亿元	55 899.53	5 254.38	23 803.68	12 216.89
	地区用水量/万吨	619.1	70.1	239.32	137.47
	城市建筑面积/平方千米	4 432.00	743	2 099.84	933.59
	城市就业人数/万人	969.84	30.3	347.35	210.61
	能源消耗量/万吨标准煤	33 011.82	5 834.84	14 814.28	6 742.87
期望产出	地区生产总值/亿元	102 807.70	6 742.20	32 560.72	19 576.71
	城市绿地面积/万公顷	30.58	3.29	9.79	6.91
非期望产出	废水排放量/万吨	621 302.80	91 400.00	284 895.90	132 472.25
	二氧化碳排放量/万吨	104.11	0.54	38.9	27.03
	工业固体废物排放量/吨	18 721.77	1 563.80	9 030.15	4 797.57

表 3 长江经济带 11 省市生态效率结果

	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	均值	排名
江苏	0.286	0.284	0.289	0.307	0.319	0.345	0.372	0.58	0.416	0.355	4
浙江	0.296	0.303	0.31	0.329	0.354	0.379	0.41	1.013	0.464	0.429	2
上海	1.014	1.003	0.824	0.711	0.667	0.75	1.001	1.015	1.125	0.901	1
安徽	0.197	0.202	0.209	0.209	0.225	0.246	0.272	0.296	0.301	0.24	8
江西	0.195	0.201	0.205	0.206	0.215	0.225	0.242	0.324	0.273	0.232	9
湖北	0.176	0.186	0.196	0.215	0.241	0.249	0.27	1.091	0.324	0.328	5
湖南	0.189	0.195	0.212	0.226	0.239	0.252	0.337	1.006	1.015	0.408	3
重庆	0.252	0.26	0.274	0.286	0.307	0.34	0.353	0.376	0.399	0.316	6
云南	0.182	0.204	0.205	0.209	0.215	0.223	0.235	0.448	0.282	0.245	7
四川	0.156	0.166	0.168	0.17	0.177	0.202	0.219	0.235	0.241	0.193	10
贵州	0.141	0.138	0.136	0.145	0.156	0.167	0.176	0.179	0.205	0.16	11
均值	0.184	0.192	0.199	0.207	0.219	0.237	0.264	0.449	0.428	0.264	

### 2.1.2 空间格局分布分析

长江经济带各省市生态效率的综合效率见图2。从生态效率角度分析，长江经济带各省市差异较大，呈现以下特点。

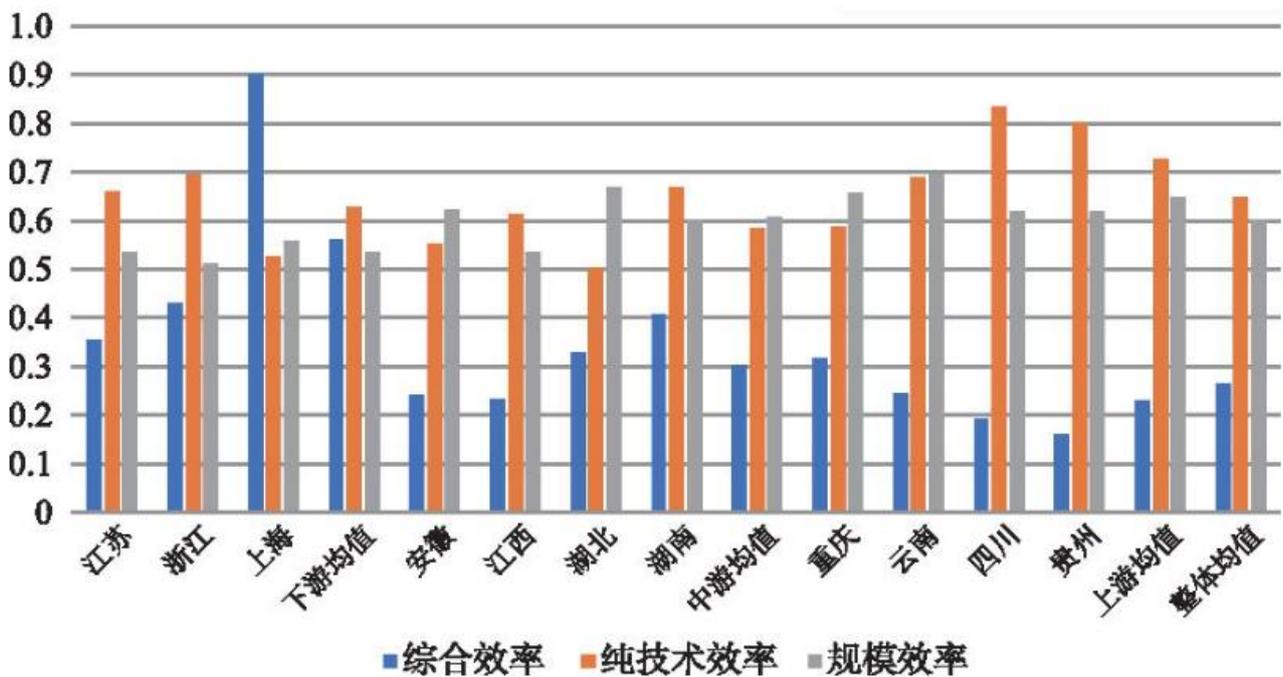


图2 综合效率分布图

下游城市的纯技术效率和规模效率较为均衡，且均处于较高水平，因而下游城市的综合效率也比较高；同时，中游和上游城市的纯技术效率和规模效率较低，导致其生态效率偏低。

长江经济带各省市生态效率的驱动因素不同。通过对纯技术效率和规模效率的比较，可以把城市划分为三类：纯技术效率值近似规模效率值的均衡发展型(上海、湖南和云南)、纯技术效率值高于规模效率值的技术导向型(浙江、江苏、江西、贵州和四川)、纯技术效率值低于规模效率值的规模导向型(湖北、安徽和重庆)。

### 2.1.3 城市生态效率 Malmquist 指数分析

模型的测算包括城市生态的全要素生产率变化指数(TFP)、技术效率变化指数(EC)、技术进步指数(TECH)和规模效率变化指数(SECH)。指数大于1,说明该指数呈现进步或增长状态;指数小于1,说明该指数呈现下降或倒退状态。

### 2.1.4 时空演变分析

基于时间角度分析,长江经济带城市生态效率 Malmquist 指数的时间演变见图 3。

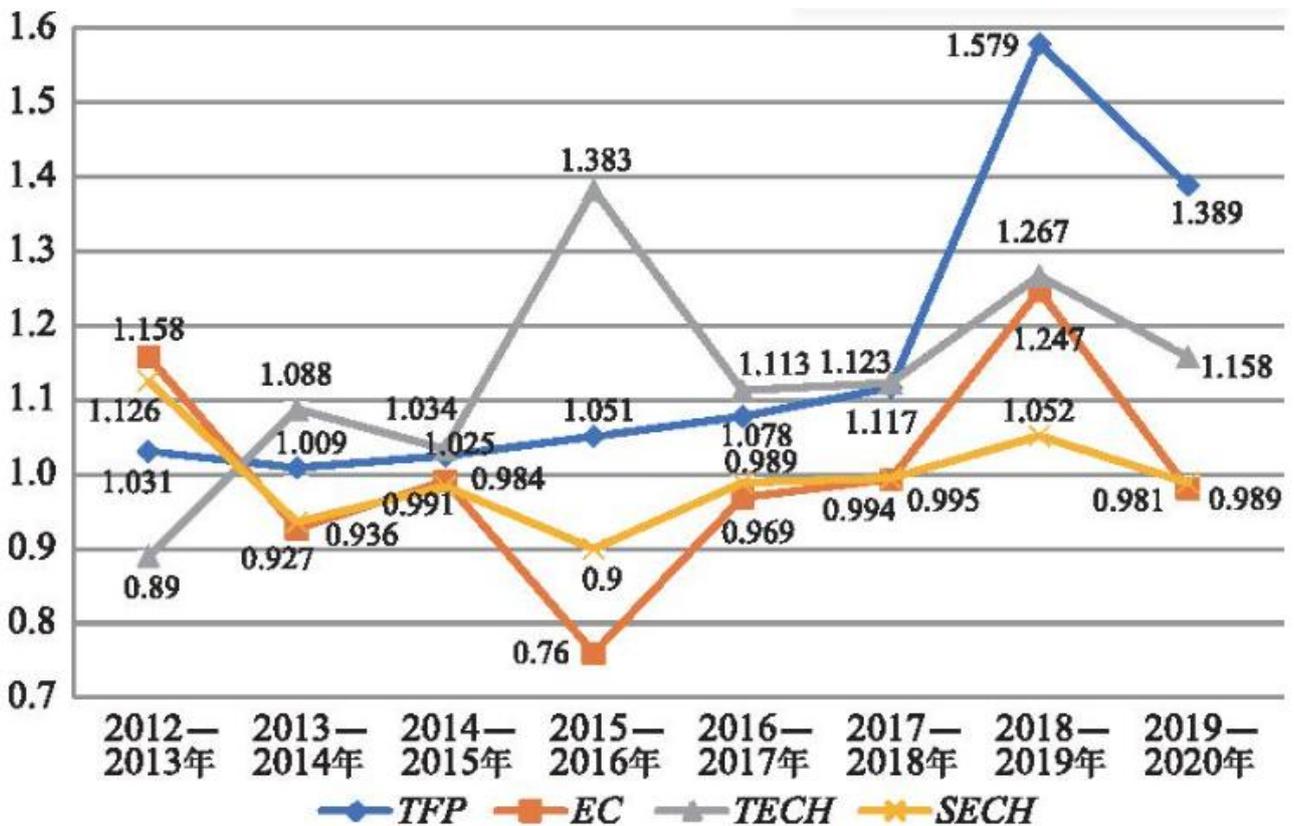


图 3 Malmquist 指数的时间演变图

生态效率的 Malmquist 指数整体上呈波动增长的趋势,表明资源利用效率在不断提高。技术进步变化指数曲线在波动中增长,且都保持在1以上,说明科学技术的进步对生态效率的提高起积极作用,是 Malmquist 指数的主要增长点。2016年,我国在《长江经济带发展规划纲要》中提出“三极”(成渝城市群、长江中游城市群和长江三角洲地区城市群)政策,助力经济可持续发展。2018—2019年,TFP值由1.117迅速增至1.579,涨幅明显。2012—2022年,技术进步指数年均增长率为2.68%,科学技术的发展成为城市生态效率水平的主要驱动因素,但是技术进步指数的波动大,达到49.3%。这在一定程度上说明当前城市的科技水平缺乏稳定性,波动较大。

基于空间角度分析，长江经济带城市生态效率 Malmquist 指数的区域分布见图 4。

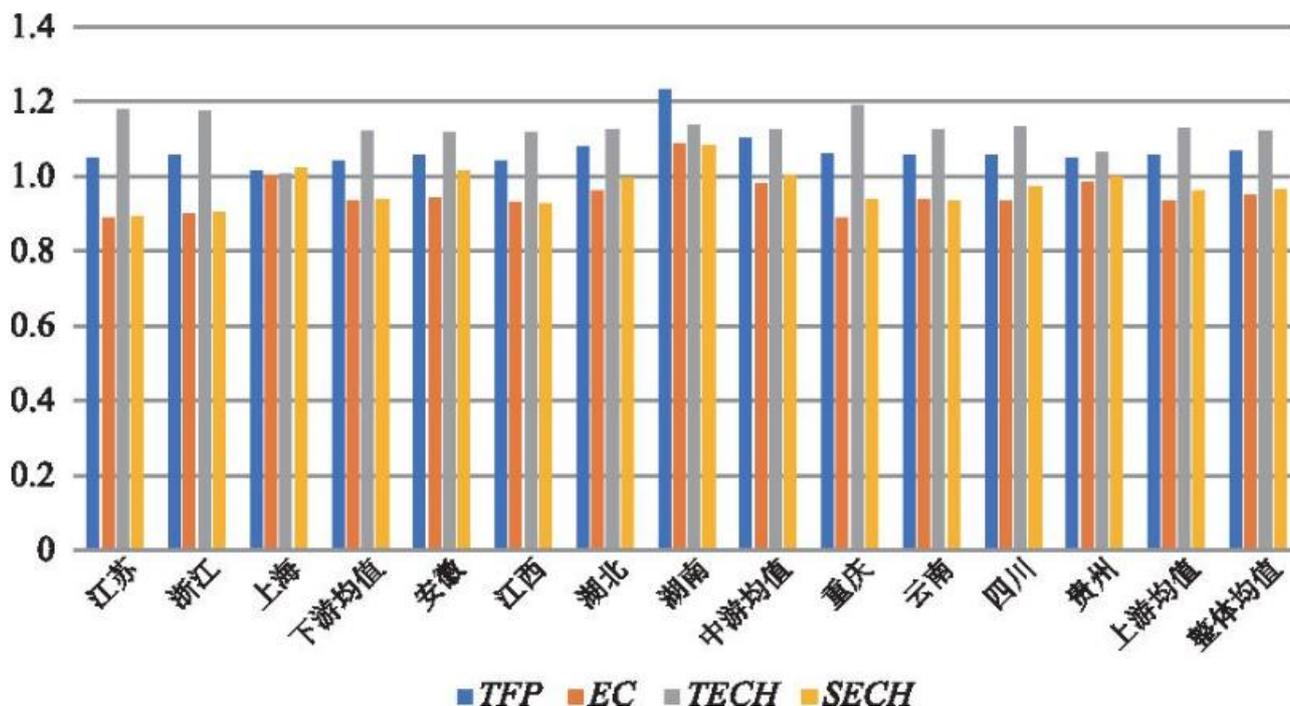


图 4 Malmquist 指数的区域分布图

分析生态效率的 Malmquist 指数可知以下结果：三个区域的区域全要素生产指数及整体的全要素生产指数均大于 1，表明长江经济带生态效率指数保持稳定增长的态势；中游城市增长势头强劲。中游四省安徽、江西、湖北和湖南的全要素生产率变化指数都在 1 以上，同时，技术进步指数保持较高增长速度，说明科技进步对四省的生态效率提升起主要推动作用；上游四省市与中游区域大体上类似，整体上弱于中游区域，与下游区域相比有明显差距，其中重庆的技术进步指数明显突出，这与地方重视科技发展不无相关。

## 2.2 影响因素 Tobit 回归分析

### 2.2.1 影响因素评价指标体系

非期望产出的超效率 SBM 模型的测算结果表明，长江经济带 11 个省市存在部分区域的生态效率较低的情况，结合长江经济带现状，对其影响因素进行探究[8]8)。通过具体指标对影响因素指标进行量化，影响因素指标见表 4。

表 4 影响因素指标

影响因素指标	指标定义
区域经济水平	人均国内生产总值/(万元/人)
科研水平	科研经费内部支出/万元
温室气体排放水平	二氧化碳排放量/万吨
	第一产业和第三产业产值占国内生产总值的比值/%

产业结构	
城市化水平	城市化率/%
城市人口水平	城市人口密度/(人/平方公里)

上述影响因素指标的描述性统计结果见表 5。

表 5 影响因素指标的描述性统计

	变量	代码	最小值	最大值	均值	标准偏差
被解释变量	综合效率	TE	0.14	1.13	0.35	0.25
解释变量	人均国内生产总值/(万元/人)	$X_1$	18 947.00	156 803.00	60 263.99	30 048.99
	科研经费内部支出/万元(规模以上工业企业R&D)	$X_2$	315 079.00	23 816 885.00	4 803 068.13	4 863 546.47
	二氧化碳排放量/万吨	$X_3$	29 824.32	5 300 489.11	507 955.25	1 411 365.88
	第一产业和第三产业产值占国内生产总值的比值/%	$X_4$	45.35	73.4	57.99	5.94
	城市人口密度/(人/平方公里)	$X_5$	1 786.00	4 822.00	2 854.53	829.89

被解释变量为综合效率(TE),解释变量包括 5 类,分别是人均国内生产总值( $X_1$ )、科研经费内部支出( $X_2$ )、二氧化碳排放量( $X_3$ )、第一产业和第三产业产值占国内生产总值的比值( $X_4$ )和城市人口密度( $X_5$ )。其最值、均值和标准偏差见表 5。

### 2.2.2 相关性分析和共性检验

为了避免伪回归,在进行 Tobit 回归分析前,使用相关性分析和共线性检验对城市生态影响因素的相关性进行分析(见表 6)。

相关系数显示所有指标的相关性均小于 0.8,说明指标之间不存在较强的相关性。方差膨胀因子 VIF 检验显示所有指标的 VIF 值都小于 10,不存在严重的多重共线性,适合进行回归分析。

### 2.2.3 Tobit 模型回归分析

为消除量纲的影响,对数据进行标准化后,采用 Tobit 模型进行回归分析(见表 7)。其中, $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_5$  的回归系数分别通过 1%、5%、10%的显著性检验,对城市生态效率存在显著影响。区域经济水平对城市生态效率影响显著,回归系数为 0.984。以科研经费内部支出表示的科研水平系数为-0.278,通过 5%的显著性检验,对生态效率有明显负面影响。城市人口密度系数为 0.111,通过 10%的显著性检验,这说明较高的人口密度会带来较大的消费需求,促进城市经济增长,进而提高城市生态效率。

表 6 相关性分析

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
$X_1$	1	0.662**	-0.283**	0.433**	-0.016

$X_2$	0.662**	1	-0.255*	-0.115	-0.324**
$X_3$	-0.283**	-0.255*	1	0.216*	-0.133
$X_4$	0.433**	-0.115	0.216*	1	0.185
$X_5$	-0.016	-0.324**	-0.133	0.185	1

注：\*\*相关性在 0.01 水平显著，\*相关性在 0.05 水平显著。

表 7 回归结果

	回归系数	标准误差	Z 值	P 值	95%置信区间	
					下限	上限
$X_1$	0.984	0.144	6.81	0	0.701	1.267
$X_2$	-0.278	0.135	-2.05	0.04	-0.543	-0.012
$X_3$	-0.048	0.069	-0.69	0.487	-0.183	0.087
$X_4$	0.084	0.113	0.75	0.454	-0.136	0.305
$X_5$	0.111	0.065	1.71	0.086	-0.016	0.238
_cons	0.031	0.049	0.65	0.519	-0.064	0.127

注：Log likelihood=48.719 846；Wald chi2(5)=158.25；Prob>chi2=0。

### 3 结论与展望

本文采用包含非期望产出的超效率 SBM 模型，对 2012—2020 年长江经济带 11 个省市的城市生态效率进行测算，并对结果进行分析，探究其影响因素。结果表明，长江经济带上游、中游和下游的城市生态效率存在显著差异。下游地区保持较高水平的稳定状态，在建立水资源的可持续治理机构、构建产业聚集、生态养老金制度等方面表现突出；中游地区受益于中部崛起战略，2009—2013 年，7 个全国性“承接产业转移示范区”中有 4 个位于中游地区（只有 1 个位于上游地区），直接推动中游地区的快速发展；上游地区生态水平较低，应牢牢抓住绿色经济、生态经济、休闲经济和数字经济发展机遇，最大限度地利用“军民融合”和“精准扶贫”，发展新型城镇化，重塑区域发展机制，实现经济高质量发展。各指标中，人均国内生产总值的回归系数通过了 1% 的显著性检验，对长江经济带生态效率有明显的正面影响；城市人口密度对长江经济带生态效率也存在较明显的积极影响；二氧化碳排放量对生态效率的影响轻微，意义较弱。

长江经济带的发展涉及城市、水利、工业、道路、绿地等多个方面，应统筹规划生态系统完整性和保护措施[9]。监督方式应与生态环境相协调，以实现系统优化。长江流域委员会应根据流域设立环境监督和行政执法机构，合理分配权力和责任，协调不同地区的利益，确定主要责任。政府应完善评估机制，引入生态补偿、生态预警和流域生态应急措施，以促进调控协调。处理好经济发展与生态保护的关系，确保环境监管的平衡；明确各部门的监管职责，严格执行《长江保护法》，加快长江经济带生态红线管控法制化；大力发展信息和自动化产业，以绿色、集约、高科技为重点，加快传统产业转型升级，强化产业集聚，提高企业创新能力。总之，在长江经济带各地区的未来发展中，只有坚持绿色发展、生态优先的理念，依靠科技进步提高资本和人力产出效率，才能有效提高生态效率，实现“双碳”目标。

### 参考文献

[ 1 ] 付丽娜, 陈晓红, 冷智花. 基于超效率 DEA 模型的城市群生态效率研究——以长株潭“3+5”城市群为例[J]. 中国人  
口·资源与环境, 2013, 23(4):169-175.

- 
- [ 2 ] 石婷,班远冲,刘志媛,等.基于“双碳”目标的生态文明建设升级路径研究[J].环境科学与管理,2022,47(5):139-143.
- [ 3 ] 王恩旭,武春友.基于超效率 DEA 模型的中国省际生态效率时空差异研究[J].管理学报,2011,8(3):443-450.
- [ 4 ] 李洪伟,蒋金雨,杨印生.基于超效率 SBM 模型的中国城市生态环境效率时空演变格局及预测[J].数理统计与管理,2023,42(1):96-108.
- [ 5 ] 刘君.制造业集聚、金融业集聚对绿色生态效率的影响研究[J].生态经济,2023,39(5):111-117.
- [ 6 ] 任胜钢,张如波,袁宝龙.长江经济带工业生态效率评价及区域差异研究[J].生态学报,2018,38(15):5485-5497.
- [ 7 ] KITADA S.Economic, ecological and genetic impacts of marine stock enhancement and sea ranching:A systematic review[J].Fish and Fisheries,2018,19(3):511-532.
- [ 8 ] XU J,HUANG D,HE Z,et al.Research on the structural features and influential factors of the spatial network of China' s regional ecological efficiency spillover[J].Sustainability,2020,12(8):3137.
- [ 9 ] 陈傲.中国区域生态效率评价及影响因素实证分析——以 2000—2006 年省际数据为例[J].中国管理科学,2008,16(S1):566-570.