

工业机器人应用对城市绿色发展的空间溢出效应

陈 芳

福建师范大学数学与统计学院, 福建 福州

收稿日期: 2025年5月29日; 录用日期: 2025年6月29日; 发布日期: 2025年7月14日

摘 要

基于2000~2021年中国254个城市面板数据, 采用包含非期望产出的超效率SBM模型测度了各城市绿色经济效率后, 运用空间杜宾模型探究了工业机器人应用对城市绿色经济效率的空间溢出效应。研究发现: (1) 城市绿色经济效率具有显著的正向空间溢出效应, 工业机器人应用显著提升城市绿色经济效率。这一结论得到了稳健性检验的支持。(2) 本市工业机器人应用对东中西部城市绿色经济效率具有显著正向影响, 邻近城市工业机器人应用对东西部城市绿色经济效率具有显著正向影响, 对中部城市绿色经济效率具有显著负向影响。以上结论为推进城市高质量绿色发展提供了政策启示。

关键词

工业机器人应用, 绿色经济效率, 空间溢出效应

The Spatial Spillover Effect of Industrial Robot Application on Urban Green Development

Fang Chen

School of Mathematics and Statistics, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian

Received: May 29th, 2025; accepted: Jun. 29th, 2025; published: Jul. 14th, 2025

Abstract

Based on the panel data of 254 Chinese cities from 2000 to 2021, this paper measures the green economic efficiency of each city using the super-efficiency SBM model with non-desired outputs, and then

explores the spatial spillover effect of industrial robot application on urban green economic efficiency by using the spatial Durbin model. The research findings are as follows: (1) Urban green economic efficiency has a significant positive spatial spillover effect, and the application of industrial robots significantly improves urban green economic efficiency. This conclusion is supported by robust tests. (2) The application of industrial robots in the city has a significant positive impact on the green economic efficiency of cities in the eastern, central and western regions. The application of industrial robots in neighboring cities has a significant positive impact on the green economic efficiency of cities in the eastern and western regions, but a significant negative impact on cities in the central region. The above conclusions provide policy implications for promoting high-quality green development in cities.

Keywords

Industrial Robot Application, Green Economic Efficiency, Spatial Spillover Effect

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

党的二十大报告强调“推动绿色发展，促进人与自然和谐共生”，探索城市绿色发展之路是扎实推进中国式现代化的内在要求。在全球新一轮科技革命和产业变革背景之下，我国工业机器人应用规模蓬勃发展。据 IFR 发布《2024 年全球机器人报告》显示，2023 年中国工业机器人安装数量为 276,288 台，占全球安装量的 51%，是迄今为止世界最大的机器人消费市场。作为智能制造的代表，工业机器人凭借其高效、绿色和可持续等特点，逐渐成为中国经济高质量发展和绿色发展的新引擎[1]。因此，探究工业机器人应用与城市绿色发展之间的关系，有助于建设可持续型城市，推动高质量城市绿色发展。

2. 文献综述

现有关于工业机器人应用对中国绿色发展的研究主要有三类：

一类是工业机器人应用对工业三废、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 CO₂ 的绿色环境方面影响。陈昊等采用最小二乘估计方法探究了 2006~2015 年中国行业机器人存量和增量对工业废气的排放量、一般工业固体废物的产生量和一般工业固体废物的产生量的影响，结果表明行业机器人存量和增量提高可以降低工业废气的排放量和一般工业固体废物的产生量[2]；Yu 等人采用固定效应回归模型探究了 2013~2018 年中国工业机器人渗透度对城市空气污染水平(PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂)的影响，结果表明工业机器人通过提高能源利用效率与促进绿色技术创新有效降低城市空气污染水平[3]；盛丹和卜文超采用固定效应回归模型探究了 2006~2013 年中国制造业机器人渗透度对企业二氧化硫排放强度的影响，结果表明工业机器人应用通过前端控制和末端处理显著降低了企业污染排放强度[4]；仲崇阳等人采用固定效应回归模型探究了 2006~2019 年中国工业机器人应用水平对城市碳排放规模的影响，结果表明工业机器人应用通过技术创新、产业升级显著降低了城市碳排放[5]。

一类是工业机器人应用对能源利用效率、能源强度和能源消耗的能源方面影响。郭孝阳等人采用固定效应回归模型探究了 2008~2021 年中国工业机器人渗透度对城市能源利用效率的影响，结果表明，工业机器人应用显著提升能源利用效率[6]；Huang 等人采用 PSM-DID 模型探究了 2001~2012 年中国工业机器人应用对企业能源效率的影响，结果表明工业机器人应用可以通过提高生产率显著提高企业能源效

率[7];祝红飞和张协奎采用固定效应回归模型探究了 2006~2019 年全球 35 个国家工业机器人对能源强度的影响,结果表明工业机器人应用在特定范围内可以显著降低能源强度[8];张万里和宣旻采用系统 GMM 模型和差分 GMM 模型探究了 2004~2016 年中国省域智能化对能源消耗的影响,结果表明智能化能够提高能源效率,降低能源消耗[9]。

一类是工业机器人应用对绿色全要素生产率、绿色发展效率的绿色发展综合指标方面影响。唐晓华和迟子茗采用固定效应回归模型探究了 2006~2019 年中国省域工业智能化对工业绿色发展效率的影响,结果表明工业智能化能够通过促进绿色技术创新和提高能源利用效率显著提升工业绿色发展效率[10];邓荣荣和肖湘涛采用固定效应回归模型探究了 2007~2020 年中国城市工业机器人渗透度对绿色生态效率的影响,结果表明工业机器人应用显著提升了区域绿色生态效率[11];Chen 等采用固定效应回归模型探究了 2007~2019 年中国城市关于加强对绿色全要素生产率的影响,结果表明工业机器人应用可以显著提高城市绿色全要素生产率[12];宋建和胡学萌采用高维固定效应模型探究了 200~2014 年中国制造业工业机器人应用对企业绿色发展质量的影响,结果表明工业机器人应用提高降低污染物排放与提高能源效率显著提升企业绿色发展质量[13]。

综上所述,现有关于工业机器人应用对绿色发展的研究已取得了一定成果,但是尚存在以下不足:(1) 现有文献虽然探究了工业机器人应用对绿色环境方面、能源方面与绿色发展综合指标方面的影响,但并未分析其对城市绿色经济效率的影响。绿色经济效率作为衡量地区绿色发展水平的重要指标[14],有必要探究工业机器人应用对城市绿色经济效率的影响。(2) 目前较少文献采用空间计量模型研究工业机器人应用对城市绿色发展的影响,工业机器人应用对城市绿色发展的空间溢出效应更是鲜少提及。因此,本文采用空间杜宾模型研究了工业机器人应用对城市绿色经济效率的影响,并分析其空间溢出效应,试图为城市绿色发展政策制定提供了实证依据。

3. 研究设计

3.1. 模型设置

考虑到城市绿色经济效率可能存在的空间相关性,构建空间杜宾模型考察工业机器人应用对城市绿色经济效率的影响,其模型形式如下:

$$\ln GEE_{it} = \beta_0 + W_{ij} \ln GEE_{it} + \gamma_1 W_{ij} \ln robot_{it} + \gamma_2 W_{ij} \ln x_{it} + \beta_1 \ln robot_{it} + \beta_2 \ln x_{it} + \delta_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, GEE_{it} 表示城市绿色经济效率, $robot_{it}$ 表示工业机器人渗透度, x_{it} 表示控制变量, W_{it} 为空间权重矩阵; ρ 为空间自回归系数, γ 为解释变量空间交互项系数, β 为工业机器人渗透度和控制变量系数; δ_i 为个体固定效应, λ_t 为时间固定效应, ε_{it} 为随机扰动项; i, j 分别表示第 i 个城市和第 j 个城市, t 为第 t 年, $1 \leq i, j \leq 254$, $1 \leq t \leq 22$ 。

3.2. 变量设定

1) 被解释变量:城市绿色经济效率。绿色经济效率是一种既考虑经济增长成效,又兼顾资源与环境代价的效率范畴。参考王弘毅和谢冬水的研究[15],构建三个投入指标、期望产出指标和非期望产出指标的城市绿色经济效率测度指标体系,使用包含非期望产出的超效率 SBM 模型进行测算。其中,投入指标包括永续盘存法估算的城市固定资产资本存量、各城市年末单位从业人员数、城市全年用电量;期望产出指标为城市地区生产总值;非期望产出指标包括城市工业废水排放总量、二氧化硫排放量、二氧化碳排放量与烟尘排放量。

2) 核心解释变量：工业机器人渗透度。它是衡量工业机器人技术应用广度和深度的重要指标，反映了工业机器人在全社会及生产过程中的普及程度与渗透能力。具体计算公式如下：

$$robot_{it} = \sum_{s=1}^s \frac{labor_{i,t_0,s}}{labor_{i,t_0}} \times \frac{Robot_{t,s}}{labor_{t_0,s}} \quad (2)$$

其中， $robot_{it}$ 和 $Robot_{t,s}$ 分别表示 i 城市 t 年的工业机器人渗透度和 s 行业 t 年的工业机器人安装数； $labor_{t_0,s}$ 、 $labor_{i,t_0}$ 和 $labor_{i,t_0,s}$ 分别表示 s 行业在基准年份的劳动力规模、 i 城市在基准年份的劳动力规模和 i 城市 s 行业在基准年份的劳动力规模。

3) 控制变量。(1) 经济发展水平。经济发展水平增强可以使得城市有更多的资源和资金投入绿色技术研发和环保产业发展，实现城市绿色经济效率的提升。其用人均国内生产总值表征。(2) 城市人口规模。随着人口规模增加，对应的生产生活压力和资源需求量相应增加影响资源有效配置与利用效率，阻碍城市绿色经济效率提升。其用年末总人口数表征。(3) 基础设施发展水平。完善的基础设施可以提高生产要素流动性和资源配置效率，减少运输过程的能源消耗与环境污染来提升城市绿色经济效率。其用客运量总和占各地区总人口的比重表征。(4) 政府干预程度。过高的财政支出容易导致资源配置扭曲抑制企业技术创新与投资积极性，不利于绿色技术研发与应用进而阻碍城市绿色经济效率提升。其用一般公共预算支出占城市 GDP 比重表征。(5) 对外开放水平。过度依赖高污染、高能耗的产品出口或是大量进口资源密集型与污染密集型产品，不合理的进出口贸易结构会增加本地资源与环境压力抑制城市绿色经济效率提升。其用进出口贸易总额占地区 GDP 比重表征。(6) 环境规制水平。环境规制薄弱会使得企业逃避环境规制，环境规制过度会增加企业生产成本影响其生产积极性与技术创新能力，从而阻碍城市绿色经济效率提升。其用一般工业废物利用率表征。(7) 产业结构化水平。第二产业通常包括工业和建筑业，而传统工业的发展模式往往是高投入、高消耗、高污染的，这会导致资源利用效率低下和环境质量下降，从而降低绿色经济效率。其用第二产业占 GDP 比重表征。

Table 1. Descriptive statistics for each variable

表 1. 各变量的描述性统计结果

变量	变量符号	单位	样本量	平均值	标准差	最小值	最大值
城市绿色经济效率	GEE	—	5588	0.359	0.175	0.082	1.178
工业机器人渗透度	robot	—	5588	6.326	8.842	0.003	39.300
经济发展水平	pgdp	元/人	5588	37168.350	31632.060	1483	218118
人口规模	ps	万人	5588	445.691	316.998	15.960	3415.500
基础设施发展水平	inf	—	5588	24.709	43.027	1.019	1508.41
政府干预程度	gov	—	5588	0.151	0.090	0.001	1.936
对外开放水平	open	—	5588	5.367	16.687	2.53e-06	399.319
环境规制	er	—	5588	0.772	0.235	0.002	1.000
产业结构	is	—	5588	0.466	0.112	0.107	0.910

4) 数据来源。样本为 2000~2021 年我国 254 个城市面板数据集(不含西藏和港澳台)。城市绿色经济效率原始数据来源主要为历年《中国城市统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》，工业机器人渗透度的原

始数据主要来自于国际机器人联合会(IFR)和历年《中国城市统计年鉴》，控制变量的原始数据主要来自于历年《中国城市统计年鉴》。为减少回归模型异方差可能带来的影响，我们对所有变量进行了对数化预处理。各变量的描述性统计结果见表 1。

4. 实证分析

4.1. 空间相关性检验

利用全局 Moran's I 对 2000~2021 年城市绿色经济效率的空间相关性进行验证，结果见表 2。所有年份的全局 Moran's I 均为正，并通过 1%水平下的显著性检验，说明城市绿色经济效率存在显著的正向空间自相关性。

Table 2. Global Moran test results for urban green economic efficiency

表 2. 城市绿色经济效率的全局 Moran 检验结果

年份	Moran's I	年份	Moran's I
2000	0.436***(11.435)	2011	0.463***(11.983)
2001	0.495***(12.835)	2012	0.393***(10.131)
2002	0.453***(11.855)	2013	0.379***(9.814)
2003	0.404***(10.547)	2014	0.395***(10.162)
2004	0.393***(10.229)	2015	0.369***(9.486)
2005	0.53***(13.671)	2016	0.418***(10.641)
2006	0.473***(12.249)	2017	0.420***(10.744)
2007	0.615***(15.868)	2018	0.391***(9.905)
2008	0.495***(12.822)	2019	0.477***(12.007)
2009	0.491***(12.721)	2020	0.436***(10.938)
2010	0.503***(13.066)	2021	0.428***(10.697)

注：***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平下显著，括号内的值是 z 值，下表同。

4.2. 空间计量模型设定

为选择合适的空间计量模型分析工业机器人应用对城市绿色经济效率的影响，首先进行的 LM 检验和稳健的 LM 检验均拒绝原假设，表明应选择 SDM 模型结果。其次，表 3 中 Hausman 检验、Wald 检验和 LR 检验均拒绝原假设，表明应选择具有固定效应的 SDM 模型且其不会退化为 SAR 和 SEM 模型。SDM 模型估计结果中 ρ 值在 1%的显著性水平下大于 0，表明城市绿色经济效率具有显著的正向空间溢出效应。工业机器人渗透度每增加 1%会导致城市绿色经济效率增加 0.173%，说明工业机器人应用能够显著提升城市绿色经济效率。

表 4 显示了 SDM 模型在三种稳健性检验方式下的估计结果：将邻接空间权重矩阵替换为地理距离空间权重矩阵；对因变量进行 1%分位上的双边缩尾处理；将工业机器人渗透度滞后一期。估计结果表明，三种方式下工业机器人应用均对城市绿色经济效率具有显著的正向促进作用。这验证了 SDM 模型估计结果的稳健性。

Table 3. Spatial panel regression results
表 3. 空间面板回归结果

变量	SDM-x	SDM-Wx	SAR	SEM
<i>lnrobot</i>	0.173*** (11.600)	-0.036 (-1.362)	0.159*** (13.581)	0.183*** (13.705)
<i>lnpgdp</i>	0.049*** (3.560)	0.131*** (5.075)	0.101*** (8.323)	0.102*** (6.734)
<i>lnps</i>	-0.011 (-0.760)	0.024 (0.881)	-0.007 (-0.572)	-0.010 (-0.771)
<i>lninf</i>	0.017*** (2.680)	-0.045*** (-4.357)	0.002 (0.320)	0.006 (1.160)
<i>lngov</i>	-0.064*** (-7.350)	0.070*** (4.523)	-0.045*** (-6.479)	-0.056*** (-7.144)
<i>lnopen</i>	-0.024*** (-6.030)	0.025*** (3.420)	-0.021*** (-6.862)	-0.025*** (-7.201)
<i>lner</i>	-0.013* (-1.800)	0.004 (0.298)	-0.010 (-1.557)	-0.011 (-1.584)
<i>lnis</i>	-0.141*** (-6.440)	0.099*** (2.829)	-0.092*** (-5.454)	-0.114*** (-5.703)
ρ/λ	0.404*** (26.018)		0.407*** (26.843)	0.424*** (27.531)
R^2	0.352		0.357	0.359
N	5588		5588	5588
Hausman		31.81***		
LR-lag		102.31***		
LR-error		90.920***		
Wald-lag		102.7***		
Wald-error		87.21***		

Table 4. Robustness test results
表 4. 稳健性检验结果

变量	替换空间权重矩阵	缩尾处理	解释变量滞后一期
<i>lnrobot</i>	0.592***(16.160)	0.523***(14.790)	0.146***(9.710)
<i>city/year</i>	Yes/Yes	Yes/Yes	Yes/Yes
控制变量	Yes	Yes	Yes
ρ	0.841***(26.310)	0.395***(25.290)	0.399***(25.060)
R^2	0.3397	0.3557	0.3375
N	5588	5588	5334

4.3. 空间溢出效应分析

为了正确描述工业机器人应用对城市绿色经济效率的影响，借鉴赵路等人的方法将其分解为直接、间接和总效应[16]。表 5 分别显示了工业机器人渗透度在总体(T)、东部(E)、中部(C)和西部(W)四组样本情形下的效应结果。

Table 5. Direct, indirect, and total effects of the industrial robots application on the urban green economy efficiency
表 5. 工业机器人应用对城市绿色经济效率影响的直接、间接和总效应

	总体(T)	东部(E)	中部(C)	西部(W)
直接效应	0.182*** (13.382)	0.179*** (6.157)	0.111*** (5.941)	0.236*** (11.243)
间接效应	0.046 (1.508)	0.095* (1.703)	-0.123*** (-2.857)	0.064* (1.837)
总效应	0.228*** (6.784)	0.274*** (4.829)	-0.012 (-0.267)	0.299*** (7.279)

总体上，工业机器人渗透度对城市绿色经济效率的直接效应、间接效应和总效应系数分别为 0.182、0.046 和 0.228，其中直接效应和总效应均通过了 1%的显著性检验，表明工业机器人应用有助于提升城市绿色经济效率，但邻近城市工业机器人应用水平的提高因为产业链协同不足、技术标准差异或知识产权保护技术的技术扩散壁垒使得其正向溢出效应尚未明显体现。各区域上，东西部城市工业机器人渗透度对城市绿色经济效率的直接效应、间接效应和总效应系数均显著为正，表明了东西部城市工业机器人应用对本区域和区域外的城市绿色经济效率均具有显著的正向溢出效应。中部地区工业机器人渗透度对城市绿色经济效率的直接效应显著为正，表明了中部城市工业机器人应用能够显著提升本区域城市绿色经济效率，但邻近城市的工业机器人应用水平提升吸引了周边人力资本与投资，产业同质化竞争中稀释了周边工业机器人应用技术优势导致污染环节转移，从而抑制周边城市的绿色经济效率提升。

5. 结论与建议

基于 2000~2021 年我国 254 个城市的面板数据，本文实证考察了工业机器人应用对城市绿色发展的推动作用及其空间溢出效应。实证结果表明：(1) SDM 模型估计结果显示城市绿色经济效率具有显著的正向空间溢出效应，工业机器人应用显著提升城市绿色经济效率中。 ρ 值在 1%的显著性水平下大于 0，工业机器人渗透度每增加 1%会导致城市绿色经济效率增加 0.173%，这一结论得到了稳健性检验的支持。(2) 本市工业机器人应用对东中西部城市绿色经济效率具有显著正向影响，邻近城市工业机器人应用对东西部城市绿色经济效率具有显著正向影响，对中部城市绿色经济效率具有显著负向影响。

基于上述结论，提出如下政策建议：(1) 强化城市绿色发展空间协同机制，推动各城市工业机器人广泛应用。政府需搭建跨区域的绿色经济交流平台，鼓励城市间联合开展绿色产业项目，充分发挥城市绿色经济效率正向空间溢出带来的协同增效作用。同时，出台工业机器人应用专项扶持政策，鼓励各城市高校与企业合作建立实习基地，从而提升各城市绿色经济发展中工业机器人应用水平。(2) 重视工业机器人应用提升城市绿色发展的地区差异问题。在东部城市聚焦机器人产业集群化发展，建设绿色经济示范园区，展示推广在绿色生产中工业机器人应用案例，发挥示范引领作用提升绿色经济效率。在西部城市加强基础设施建设并改善投资环境，促进本地工业机器人相关产业集聚发展从而提升绿色经济效率。在中部城市，一方面要加强自身工业机器人应用创新发展，另一方面与邻近城市建立负向溢出效应的协调

解决机制, 形成差异化、互补性的绿色产业发展格局进而提升城市绿色经济效率。

参考文献

- [1] 郭金花, 常帅文, 郭檬楠. 工业机器人应用对企业减污降碳的影响机制与关联溢出效应研究[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2024, 44(7): 3-22.
- [2] 陈昊, 闫雪凌, 朱博楷. 机器人使用影响污染排放的机制和实证研究[J]. 中国经济问题, 2021(5): 126-138.
- [3] Yu, L., Zeng, C. and Wei, X. (2022) The Impact of Industrial Robots Application on Air Pollution in China: Mechanisms of Energy Use Efficiency and Green Technological Innovation. *Science Progress*, **105**, 1-21. <https://doi.org/10.1177/00368504221144093>
- [4] 盛丹, 卜文超. 机器人使用与中国企业的污染排放[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(9): 157-176.
- [5] 仲崇阳, 张雨朦, 马新啸. 智能制造对中国城市低碳发展的赋能效应——基于工业机器人应用视角[J]. 资源科学, 2024, 46(4): 728-743.
- [6] 郭孝阳, 张秀武, 杨静怡. 智能制造、人机协作与能源利用效率——基于工业机器人应用的视角[J]. 环境经济研究, 2024, 9(3): 43-65.
- [7] Huang, G., He, L. and Lin, X. (2022) Robot Adoption and Energy Performance: Evidence from Chinese Industrial Firms. *Energy Economics*, **107**, Article ID: 105837. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105837>
- [8] 祝红飞, 张协奎. 人工智能对能源强度的影响评估——基于全球 35 个国家工业机器人使用的实证研究[J]. 重庆理工大学学报(社会科学), 2024, 38(4): 71-88.
- [9] 张万里, 宣畅. 智能化如何提高地区能源效率?——基于中国省级面板数据的实证检验[J]. 经济管理, 2022, 44(1): 27-46.
- [10] 唐晓华, 迟子茗. 工业智能化提升工业绿色发展效率的实证研究[J]. 经济学家, 2022(2): 43-52.
- [11] 邓荣荣, 肖湘涛. 工业智能化对城市绿色生态效率的影响——基于工业机器人数据的实证研究[J]. 当代经济研究, 2023(10): 98-113.
- [12] Chen, S., Mu, S., He, X., Han, J. and Tan, Z. (2024) Does Industrial Robot Adoption Affect Green Total Factor Productivity? Evidence from China. *Ecological Indicators*, **161**, Article ID: 111958. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111958>
- [13] 宋建, 胡学萌. 机器人应用如何提升中国制造企业绿色发展质量——基于“减排”与“增效”双重目标约束下指数构建分析[J]. 宏观质量研究, 2024, 12(2): 15-28.
- [14] 陈言, 吕丽娟. 绿色财政政策与绿色经济效率——基于节能减排综合示范城市政策的准自然实验[J]. 南开经济研究, 2024(7): 201-218.
- [15] 王弘毅, 谢冬水. 土地供给结构扭曲与绿色经济效率——基于中国城市面板数据的实证[J]. 统计与决策, 2023, 39(19): 126-131.
- [16] 赵路, 高红贵, 肖权. 中国工业绿色创新效率动态演变趋势及其空间溢出效应研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(7): 95-99.