

“双碳”目标下中国四大工业基地能源 - 生态效率时空分析与影响机制研究

张彩霞^{1*}, 郑亚男¹, 王广驰², 周雅婕², 王婧瑜³

¹华北理工大学经济管理学院, 河北 唐山

²华北理工大学理学院, 河北 唐山

³华北理工大学化学工程学院, 河北 唐山

收稿日期: 2025年7月22日; 录用日期: 2025年8月5日; 发布日期: 2025年10月16日

摘要

本研究聚焦于“双碳”目标下中国四大工业基地能源与生态效率的动态测度、时空分析规律及三重效应影响机制研究。首先, 运用NDDF模型和Luenberger指数进行效率测度, 并进行时空分析可视化。其次, 利用空间DID实证检验, 深度解析四大工业基地效率时空分析的影响机制(“污染避难所效应” - “邻里效应” - “外溢效应”联动机制)。最后, 依据研究结果提出基于时空分析分异特征的重重效应协同治理策略, 为工业基地绿色发展与转型提供多尺度量化决策支持。结果表明: 2012~2022年四大工业基地能源效率与生态效率均显著提升, 但区域分化明显。时空分析可视化反映了地理邻近性对技术溢出与污染扩散的双向传导作用。同时, 空间DID检验证实了三重效应的深度耦合关系。

关键词

NDDF-Luenberger, 能源 - 生态效率, 时空分析, 空间DID

Research on the Spatio-Temporal Evolution and Impact Mechanisms of Energy-Ecological Efficiency in China's Four Major Industrial Bases under the “Dual Carbon” Goals

Caixia Zhang^{1*}, Yanan Zheng¹, Guangchi Wang², Yajie Zhou², Jingyu Wang³

¹School of Economics and Management, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

*通讯作者。

文章引用: 张彩霞, 郑亚男, 王广驰, 周雅婕, 王婧瑜. “双碳”目标下中国四大工业基地能源-生态效率时空分析与影响机制研究[J]. 低碳经济, 2025, 14(4): 313-329. DOI: 10.12677/jlce.2025.144034

²School of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei³School of Chemical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: July 22, 2025; accepted: August 5, 2025; published: October 16, 2025

Abstract

This study focuses on the dynamic measurement, spatio-temporal analysis patterns, and triple-effect influence mechanisms of energy and ecological efficiency in China's four major industrial bases under the "dual carbon" goals. First, the NDDF model and Luenberger index are employed for efficiency measurement, followed by spatio-temporal analysis visualization. Second, spatial DID empirical tests are used to deeply analyze the influence mechanisms of efficiency spatiotemporal analysis in the four major industrial bases (the "pollution refuge effect"—"neighborhood effect"—"spillover effect" linkage mechanism). Finally, based on the research results, a triple effect synergistic governance strategy is proposed based on the spatiotemporal analysis differentiation characteristics, providing multi-scale quantitative decision-making support for the green development and transformation of industrial bases. The results indicate that from 2012 to 2022, the energy efficiency and ecological efficiency of the four major industrial bases have both significantly improved, but regional differentiation is evident. Spatio-temporal analysis visualization reflects the bidirectional transmission effect of geographical proximity on technology spillover and pollution diffusion. Meanwhile, spatial DID testing confirms the deep coupling relationship among the three effects.

Keywords

NDDF-Luenberger, Energy-Ecological Efficiency, Spatio-Temporal Evolution, Spatial DID

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

四大工业基地是新中国工业发展的摇篮，包括辽中南工业基地、京津唐工业基地、长三角工业基地和珠三角工业基地。四个区域均位于中国东部沿海，地理位置优越，拥有各自独特的资源，具有巨大的发展潜力和优势。然而，目前这些地区经济发展程度差异性明显，产业结构所处阶段各不相同，面临的发展环境和问题也有所差异。

当前全球气候治理与“双碳”战略背景下，工业部门作为能源消耗与碳排放的主要载体，其生态效率与能源效率的协同优化已成为实现绿色低碳转型的关键路径。随着工业化进入后期，能源危机和环境污染问题的日益突出，协调好能源—经济—环境的发展已成为一项新的时代要求。如何在经济发展的同时，保护环境资源，提高生态效益，实现双碳目标，成为中国四大工业基地面临的最重要的课题。因此，需要构建全链条框架，准确把握四大工业基地能源效率与生态效率的时空分析状况，并对其影响机制进行深入解析，使其效应作用机制透明化，为四大工业基地后续发展提供有效治理策略与决策支持。

现有研究多聚焦于单一效率测度或静态分析，对区域间“污染避难所效应”、“邻里效应”、“外溢效应”与创新中心辐射带动、双碳政策、进出口贸易三大因素的时空分析交互机制缺乏系统性结构，且传统效率测度模型(如 SBM、DEA)难以兼顾非期望产出动态分解与全要素生产率评估。例如，东北老工

业基地因传统产能过剩与技术创新滞后面临生态效率“低水平锁定”，而东部沿海地区虽能源效率领先却受限于环境规制成本攀升导致的产业转移压力，这种区域分化现象亟需通过多维度效率测度与空间计量模型揭示其深层影响机制。因此，本研究旨在通过多模型耦合与机制创新，揭示四大工业基地效率演变的时空分析规律及多重效应响应路径，为区域协调发展战略提供决策依据。

2. 文献综述

工业中的能源效率与生态效率是衡量工业可持续发展水平的两大核心指标，二者既有区别又存在紧密关联，共同服务于经济与环境的协同优化目标。能源效率指工业生产中单位能源投入所对应的经济产出或服务价值，核心在于通过技术进步和管理优化减少能源浪费，生态效率强调以最小化资源消耗和环境污染实现最大化经济价值，涵盖“资源-经济-环境”全生命周期协调。

中国四大工业基地能源效率与生态效率水平各异，且缺乏时空分析研究，以及效应响应机制流程“黑箱化”，对其工业绿色发展与转型路径策略影响极大，难以实现工业基地能源-经济-环境发展一体化。

自 21 世纪初以来，国内学术界围绕工业基地能效研究形成了以传统数据包络分析为主导的方法体系。以李外、张敏为代表的学者群体，通过运用超效率 SBM 模型、Malmquist 指数等经典工具，系统开展了区域工业基地效率测度的实证研究。其中，李外(2023) [1]针对东北老工业基地的生态效率研究，创新性地构建了包含能源消耗、污染排放、经济产出等多元维度的指标体系，其研究揭示 2004~2019 年间东北地区生态效率呈 U 型演进特征，为传统工业区绿色转型提供了重要理论支撑。张敏(2019) [2]聚焦长三角工业基地的研究，发现该区域生态效率提升主要源于技术进步而非规模效应，这一结论为不同区域发展模式差异提供了实证依据。

在方法论的突破性探索方面，张清华(2015) [3]的研究具有里程碑意义。其研究团队突破传统截面数据分析框架，创造性构建了超效率 SBM-DEA 模型与空间计量模型的融合分析体系。通过构建包含 30 个省级行政单元、跨越 15 年的面板数据库，不仅首次实现了工业全要素能源效率的时空分析双重维度测度，更通过脉冲响应函数揭示了效率演化的动态传导机制。该研究发现区域间能源效率存在显著空间溢出效应，以及技术进步对效率提升的边际效应呈阶段性递减特征，这些结论为构建区域协同发展机制提供了全新视角。

值得关注的是，部分学者已开始突破传统工业基地研究范畴，在更广泛领域开展创新探索。陈一鸣等(2025) [4]将 SBM-DEA 模型与空间杜宾模型结合，在城市群尺度上构建了能源效率“核心-边缘”分析框架，其研究证实城市群内部存在显著的空间异质性与梯度传导效应。陈宏阳等(2023) [5]在重污染产业研究中引入环境库兹涅茨曲线理论，通过构建产业集聚与生态效率的非线性关系模型，发现产业集聚的环境效应存在显著的门槛特征，这一发现对优化产业空间布局具有重要指导价值。

但当前研究仍存在显著不足，其主要体现在三个方面：其一，工业基地能源效率与生态效率的协同测度体系尚未建立，现有研究多采用单维度评价，难以揭示两大系统的耦合作用机制；其二，时空分析演化机理研究仍停留在现象描述层面，缺乏对动力机制的结构化解析，特别是政策干预、技术创新、市场机制等多重因素的交互影响路径尚未明晰；其三，效应响应机制研究存在方法论局限，传统计量模型难以捕捉复杂系统的非线性特征。

3. 研究方法

能源-生态效率主要经过了 NDDF-Luenberger 测度、时空分析、影响机制分析三个阶段，具体如下所示。

3.1. 构建 NDDF-Luenberger 效率测度模型

非径向方向距离函数(NDDF)是数据包络分析(DEA)框架下的一种效率测度方法，特别适用于处理多

投入多产出的复杂系统,其核心优势在于允许投入与产出的非比例调整,并能同时考虑期望产出与非期望产出[6]。采用非径向 NDDF 模型来进行静态效率测度,对投入与产出进行非比例调整,显式处理非期望产出,具体构建流程如下:

1) 定义生产可能集

$$T = \left\{ (x, y, b) : \sum_{j=1}^J \lambda_j x_j \leq x, \sum_{j=1}^J \lambda_j y_j \leq y, \sum_{j=1}^J \lambda_j b_j \leq b, \sum_{j=1}^J \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0 \right\} \quad (1)$$

其中, λ_j 为 DMU 的权重系数。

2) 设定方向向量

投入方向: $g_x = x_0$; 期望产出方向: $g_y = y_0$; 非期望产出方向: $g_b = b_0$ 。则方向距离函数为:

$$\bar{D}(x, y, b; g) = \max \left\{ \beta : (x - \beta g_x, y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in T \right\} \quad (2)$$

3) 求解线性规划

对每个 DMU 进行以下线性规划求解:

$$\begin{cases} \max \beta \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j x_{jn} \leq x_{n0} - \beta g_{xn}, \forall n \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j y_{jm} \leq y_{m0} - \beta g_{ym}, \forall m \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j b_{jk} \leq b_{k0} - \beta g_{bk}, \forall k \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

4) 计算效率值

$$Eff = 1 - \beta \quad (4)$$

其中, $\beta \in [0, 1]$, 效率改进潜力值越大效率越低。

Luenberger 指数是一种基于方向距离函数的全要素生产率动态分析工具,由 Chambers 等学者提出。其核心价值在于能够量化效率的动态变化,并分解为技术进步(Technological Change, TC)和效率改进(Efficiency Change, EC)两大驱动因素,尤其适用于多投入多产出系统,本项目将其创新性应用于能源-生态效率变化测度。基于两期(t 和 $t+1$)的 NDDF 值, Luenberger 指数(LPI)计算为:

$$LPI = \frac{1}{2} \left[\bar{D}_t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g) - \bar{D}_t(x^t, y^t, b^t; g) + \bar{D}_{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g) - \bar{D}_{t+1}(x^t, y^t, b^t; g) \right] \quad (5)$$

当 $LPI > 0$ 时,能源效率和生态效率得到改善;当 $LPI < 0$ 时,能源效率和生态效率退化。得到总 LPI 指数后,可进一步做技术进步与效率变化分解,如下所示:

$$\begin{cases} TC = \bar{D}_{t+1}(x^t, y^t, b^t; g) - \bar{D}_t(x^t, y^t, b^t; g) \\ EC = \bar{D}_t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g) - \bar{D}_{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g) \\ LPI = TC + EC \end{cases} \quad (6)$$

整合后的 NDDF-Luenberger 测度模型能够从静态效率测度到动态驱动力解析,为后续揭示工业基地绿色转型的内在机制和破解“污染避难所效应”、强化“技术溢出效应”提供基础依据。

3.2. 影响因素与机制分析

三重效应是指“污染避难所效应”、“邻里效应”、“外溢效应”。污染避难所效应指在贸易与投资

自由化背景下,环境规制标准较低的国家或地区通过吸引污染密集型产业转移,成为高污染产业的集中地,从而形成“污染避难所”的现象;邻里效应是指地理邻近或社会经济联系紧密的区域之间,因空间互动而产生的相互影响,可表现为资源、技术、政策或环境问题的跨区域传导,其作用方向可分为正向促进与负向抑制两类;外溢效应,又称外部性或溢出效应,是指某工业区域的活动对其他工业区域整体产生的非市场化影响。其核心在于该影响未通过价格机制直接反映,而是通过间接渠道传递,可能带来正向或负向结果。

由于环境规制差异、工业产能差异、进出口贸易调节等因素,导致“污染避难所效应”的发生,造成产业空间重构现象,区域产能结构失衡,即工业产能分极:低规制工业区域具有高污染、高产能、低技术特点;高规制工业区域具有低污染、低产能、高技术特点,总体能源效率短期下降,出现两类邻里效应,负向低规制区污染扩散、正向高规制区技术溢出。同时,创新中心辐射效应[7]会增强正向邻里效应(技术溢出)。邻里效应积累引发大规模“双刃”外溢效应,正向为绿色创新促进政策协同,负向为污染转移→创新挤出→环境恶化加剧,造成生态效率时空分析分异,最终驱动双碳政策效应的政策响应并对规制差异进行动态调整。三重效应量化模型如下:

污染避难所效应:

$$PHE_{it} = \alpha + \beta_1 \Delta ER_{it} + \beta_2 Trade_{it} + \beta_3 IS_{it} + \rho WPHE_{it} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

其中, ΔER_{it} 为环境规制差异指数, $Trade_{it}$ 为贸易调节指数, IS_{it} 为跨区域污染产能净流量。

邻里效应:

$$\begin{cases} EE_{it} = \alpha' + \beta_1' TS_{it} + \theta WTS_{it} + \rho WEE_{it} + \gamma X_{it} & (\text{正向}) \\ P_{it} = \alpha'' + \beta_1'' UE_{jt} + \lambda W\varepsilon_{it}'' + \gamma X_{it} & (\text{负向}) \end{cases} \quad (8)$$

其中, TS_{it} 为创新中心辐射强度, UE_{jt} 为上风向区域的工业排放量。

外溢效应:

$$\begin{cases} F(t) = \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + (q/p)e^{-(p+q)t}} \\ RD_{it} = \beta_0 + \beta_1''' PI_{it} \cdot I + \gamma X_{it} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $F(t)$ 为政策扩散覆盖率, p 为本地政策创新系数, q 为临近学习率, RD_{it} 为区域研发投入强度, PI_{it} 为污染产业迁入量。

空间 DID 模型作为传统双重差分法与空间计量方法融合的创新工具,旨在从时空分析双重维度解析政策或外生冲击的因果效应。该模型不仅保留了传统 DID 对处理组与对照组时间趋势差异的捕捉能力,还通过构建地理、经济或复合空间权重矩阵,精准量化政策对目标区域的直接效应及其对邻近地区的空间溢出效应,尤其适用于评估具有地理邻近性、产业关联性 or 政策扩散特征的经济环境问题。

本研究基于此模型,聚焦中国四大工业基地的能源-生态效率演变,系统检验“污染避难所效应”、“邻里效应”、“外溢效应”三重效应的联动机制,同时融合贸易调节、创新中心辐射与双碳政策三大核心驱动因素,揭示其交互影响路径。通过引入环境规制差异指数、技术溢出衰减系数、政策扩散速率等空间化指标,模型将突破传统线性因果框架,捕捉高规制区技术外溢与低规制区污染转移的时空分析博弈,以及创新网络与产业重构对效率分异的非线性冲击,最终为区域协同减排与绿色转型提供多维决策坐标。模型设定如下所示:

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 (Treat_i \times Post_t) + \beta_2 PHE_{it} + \beta_3 NE_{it} + \beta_4 SE_{it} + \rho WY_{it} + \gamma X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

对以上模型做出变量解释,如表 1 所示。

Table 1. Explanation of core variables
表 1. 核心变量解释

变量类型	变量	说明
被解释变量	Y_{it}	区域能源 - 生态效率
	$Treat_i \times Post_t$	双碳政策冲击虚拟变量
	PHE_{it}	污染避难所效应指数
解释变量	NE_{it}	邻里效应净值
	SE_{it}	外溢效应净值
空间权重矩阵	W	经济 - 地理复合矩阵(产业关联度 $\times$ 地理距离衰减)
控制变量	X_{it}	经济发展水平、人口密度等

本研究通过多层次空间计量框架，系统整合污染避难所效应(PHE)、邻里效应(NE)以及外溢效应(SE)，突破了传统政策评估模型对空间关联性与效应联动的忽视。模型以经济 - 地理复合权重矩阵量化区域间产业关联度、技术溢出半径与污染传输路径的空间异质性，通过时空分析双重差分识别双碳政策对高规制工业基地的直接效应及其通过供应链、大气环流、创新网络产生的涟漪效应。不仅解析了“严格环境规制 $\rightarrow$ 本地 PHE 增强 $\rightarrow$ 触发邻近区域 SE 负向锁定”的恶性循环，更揭示了创新中心辐射如何通过增强 NE 正向技术溢出打破低效率均衡。这种多维效应联动的透明化，能够精准识别关键调控节点，从而构建“政策干预 - 市场响应 - 空间重构”的闭环优化路径，为工业基地在生态约束下探索差异化转型模式提供可验证、可复制的科学范式。

4. 指标选取与数据来源

本研究参考相关学者对于能源效率和生态效率测度相关指标体系的构建，遵循科学性、客观性和数据可获得性等原则，构建了中国四大工业基地能源 - 生态效率指标体系，如表 2 所示。

Table 2. Energy-ecological efficiency indicator system
表 2. 能源 - 生态效率指标体系

类别	指标	指标名称	单位
投入	劳动力指标	年末就业人数	万人
	资本投入	固定资产投资额	亿元
	能源投入	能源消费量	万吨标准煤
	土地投入	城市建设用地面积	km ²
	技术投入	工业基地 R&D 经费支出占 GDP 比重	%
		企业对低碳、污染治理技术的专项研发资金	万元
	创新资源投入	高新技术企业密度	个/km ²
期望产出	经济效益	地区国内生产总值	亿元
		公共财政预算收入	亿元
	环境效益	工业基地绿化覆盖率	%
		工业基地绿地面积	hm ²
非期望产出	废气排放量	工业 SO ₂ 和 CO ₂ 排放量	万 t
	废水排放量	工业废水排放量	万 t

本项目研究对象为中国四大工业基地，四大工业基地包括辽中南工业基地、京津唐工业基地、长三角工业基地和珠三角工业基地，共涉及 25 个市。其中辽中南工业基地涉及 8 个地级市，即沈阳、大连、鞍山、抚顺、本溪、丹东、营口和盘锦；京津唐工业基地包括北京、天津、唐山 3 市；长三角工业基地涉及南京、无锡、常州、苏州、南通、杭州、宁波、嘉兴、上海等 9 市；珠三角工业基地包括广州、深圳、珠海、佛山、惠州等 5 市。数据均来源于《中国城市统计年鉴》、各市统计年鉴、所在省份统计年鉴，以及各市统计公报和各市水资源公报等。部分缺失数据通过插值法、线性预测法等予以补充。本文选用 2012~2022 年四大工业基地能源效率与生态效率指标数据，分别对其进行测度分析与时空分析，深度解析内在影响因素与机制。

5. 实证分析

5.1. 能源效率与生态效率测度结果分析

基于 NDDF-Luenberger 测度模型，运用四大工业基地 25 个城市的能源 - 生态效率指标数据，分别测算出 2012~2022 年四大工业基地各城市能源效率与生态效率，如下所示。

5.1.1. 能源效率测度结果分析

Table 3. Energy efficiency measurement results for eight cities in the Liaoning Central-Southern industrial base
表 3. 辽中南工业基地 8 市能源效率测度结果

地区	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	均值
鞍山	0.284	0.317	0.262	0.270	0.270	0.352	0.387	0.384	0.421	0.465	0.636	0.368
本溪	0.262	0.266	0.254	0.284	0.276	0.294	0.333	0.308	0.370	0.410	0.406	0.315
大连	0.308	0.373	0.355	0.415	0.518	0.546	0.686	0.738	0.782	0.926	1.024	0.606
丹东	0.195	0.198	0.220	0.225	0.273	0.332	0.373	0.326	0.330	0.349	0.365	0.290
抚顺	0.230	0.242	0.247	0.273	0.354	0.334	0.382	0.303	0.300	0.341	0.304	0.301
盘锦	0.160	0.151	0.146	0.155	0.135	0.159	0.160	0.169	0.203	0.243	0.282	0.178
沈阳	0.308	0.334	0.314	0.334	0.416	0.486	0.578	0.579	0.792	1.009	1.047	0.563
营口	0.182	0.204	0.199	0.203	0.285	0.295	0.302	0.303	0.313	0.339	0.395	0.275
均值	0.241	0.261	0.250	0.270	0.316	0.350	0.400	0.389	0.439	0.510	0.557	0.369

Table 4. Energy efficiency measurement results for the three cities of the Beijing-Tianjin-Tangshan industrial base
表 4. 京津唐工业基地 3 市能源效率测度结果

地区	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	均值
北京	0.358	0.317	0.403	0.428	0.461	0.512	0.635	0.736	0.819	1.006	1.038	0.610
天津	0.166	0.178	0.173	0.176	0.183	0.216	0.237	0.231	0.235	0.264	0.312	0.216
唐山	0.118	0.170	0.165	0.159	0.162	0.150	0.165	0.166	0.172	0.198	0.210	0.167
均值	0.214	0.222	0.247	0.254	0.269	0.293	0.346	0.377	0.409	0.490	0.520	0.331

Table 5. Energy efficiency measurement results for nine cities in the Yangtze River Delta industrial base
表 5. 长三角工业基地 9 市能源效率测度结果

地区	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	均值
南京	0.216	0.232	0.243	0.268	0.295	0.332	0.366	0.398	0.402	1.003	1.003	0.433
无锡	0.260	0.268	0.257	0.262	0.292	0.339	0.354	0.369	0.358	0.575	0.612	0.359
常州	0.188	0.204	0.217	0.231	0.253	0.286	0.295	0.317	0.317	0.354	0.411	0.279
苏州	0.242	0.250	0.258	0.274	0.306	0.353	0.352	0.361	0.355	0.397	0.545	0.336
南通	0.154	0.164	0.170	0.179	0.195	0.222	0.252	0.270	0.279	0.304	0.334	0.229
杭州	0.210	0.216	0.217	0.226	0.248	0.286	0.296	0.339	0.369	1.037	0.664	0.373
宁波	0.220	0.225	0.217	0.216	0.223	0.259	0.276	0.302	0.312	0.342	0.389	0.271
嘉兴	0.157	0.158	0.152	0.151	0.158	0.180	0.195	0.208	0.212	0.242	0.278	0.190
上海	0.372	0.370	0.383	0.397	0.444	0.549	0.665	1.001	0.736	0.828	1.136	0.626
均值	0.224	0.232	0.235	0.245	0.268	0.312	0.339	0.396	0.371	0.565	0.597	0.348

Table 6. Energy efficiency measurement results for five cities in the Pearl River Delta Industrial Base
表 6. 珠三角工业基地 5 市能源效率测度结果

地区	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	均值
佛山	0.157	0.284	0.282	0.283	0.286	0.287	0.292	0.309	0.305	0.336	0.372	0.290
广州	0.218	0.363	0.358	0.365	0.373	0.391	0.422	0.456	0.488	0.532	0.577	0.413
惠州	0.085	0.168	0.169	0.162	0.168	0.183	0.188	0.207	0.196	0.207	0.233	0.179
深圳	0.239	0.892	1.014	1.003	0.553	1.021	1.360	0.741	0.853	0.791	1.147	0.874
珠海	0.128	0.219	0.215	0.224	0.240	0.285	0.285	0.313	0.293	0.325	0.369	0.263
均值	0.165	0.385	0.408	0.407	0.324	0.433	0.510	0.405	0.427	0.438	0.540	0.404

由表 3、表 4、表 5、表 6 结果可得，辽中南、京津唐、长三角、珠三角工业基地 2012~2022 年间全要素能源效率均值分别为 0.369、0.331、0.348、0.404。这十年间，四大工业基地全要素能源效率平均值整体差异不大，珠三角工业基地全要素能源效率平均值略高于其他三区域。四大工业基地 25 个城市能源效率值随时间推移都有不同程度上的增长。

整体来看，四个区域全要素能源效率平均水平呈现波动上升趋势，且变化幅度较大，从 2012 年的 0.2 左右增长到 2012 年的 0.55 左右，但是区域差异在不断缩小，这表明随着经济社会的发展，各区域之间能源利用效率在不断增长且趋近。

分区域来看，在这十年间，辽中南、京津唐、长三角三个区域间的全要素能源效率水平差异不大，基本呈现同步增长状态，长三角工业基地的全要素能源效率值在 2019~2020 年间有一次小幅度的下降，随后继续增长，最终在 2022 年取得四个区域中的最高水平，0.597。但是珠三角工业基地的全要素能源效率水平则呈现较高水平的不稳定增长。其在 2012~2019 年间与其他三区域有较大差异，分别在 2012~2013 年与 2016~2018 年有两次较大水平的提升，增长幅度在 0.2 左右；在 2015~2016 年与 2018~2019 年有较大水平的下降，下降幅度在 0.1 左右，最后在 2019~2022 年与其他三区域保持基本同步的增长状态。这可能是因为珠三角地区经济发展受外界因素影响较为复杂，其全要素能源效率水平也相应受到影响。

5.1.2. 生态效率测度结果分析

Table 7. Ecological efficiency measurement results for eight cities in the Liaoning Central-Southern industrial base
表 7. 辽中南工业基地 8 市生态效率测度结果

地区	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	均值
沈阳	1.026	1.015	1.002	1.006	1.018	0.786	1.008	1.000	1.011	1.050	1.076	1.000
大连	1.014	1.030	1.006	1.023	1.035	0.838	1.026	1.014	1.006	1.105	1.151	1.022
鞍山	0.533	0.550	0.514	0.501	0.453	0.477	0.527	0.599	1.006	1.004	1.207	0.670
抚顺	0.625	1.000	0.601	0.628	1.046	1.012	1.030	1.003	1.020	1.036	1.052	0.914
本溪	1.009	1.042	1.019	1.023	1.036	1.013	1.012	1.004	1.200	1.055	1.080	1.045
丹东	1.103	1.021	1.028	0.738	1.057	1.021	1.031	0.918	1.024	1.211	1.358	1.046
营口	1.007	1.014	1.003	1.002	0.479	0.543	0.683	0.608	1.009	1.022	1.230	0.873
盘锦	1.030	1.011	1.032	1.022	1.007	1.274	1.061	1.002	1.013	1.132	1.197	1.071
均值	0.918	0.960	0.901	0.868	0.891	0.870	0.922	0.894	1.036	1.077	1.169	0.955

Table 8. Ecological efficiency measurement results for the three cities of the Beijing-Tianjin-Tangshan industrial base
表 8. 京津唐工业基地 3 市生态效率测度结果

地区	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	均值
北京	1.015	0.902	0.915	1.008	0.863	1.005	1.003	1.040	1.021	1.133	1.179	1.008
天津	1.009	1.013	0.808	1.006	1.019	1.048	1.033	1.019	1.014	1.084	1.117	1.015
唐山	1.064	1.058	1.007	1.015	1.014	1.023	1.032	1.023	1.012	1.058	1.075	1.035
均值	1.029	0.991	0.910	1.010	0.966	1.025	1.023	1.027	1.015	1.092	1.124	1.019

Table 9. Ecological efficiency measurement results for nine cities in the Yangtze River Delta industrial base
表 9. 长三角工业基地 9 市生态效率测度结果

地区	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	均值
南京	1.037	1.004	1.008	1.002	1.043	1.021	1.021	1.018	1.019	1.035	1.043	1.023
无锡	1.008	1.002	0.800	0.790	0.865	1.015	1.007	1.022	0.940	1.054	1.070	0.961
常州	1.015	1.020	1.014	1.003	1.013	1.013	1.008	1.007	1.020	1.025	1.034	1.016
苏州	0.570	0.591	0.605	0.623	0.779	1.010	1.007	0.937	1.003	1.028	1.074	0.839
南通	1.014	1.012	1.032	1.010	1.008	1.011	1.049	1.030	1.041	1.025	1.022	1.023
杭州	0.541	0.477	0.472	0.547	0.591	0.619	0.630	0.653	0.849	1.084	1.300	0.706
宁波	0.601	0.596	0.553	0.551	0.558	0.578	0.637	0.754	1.003	1.006	1.132	0.724
嘉兴	1.027	1.014	1.002	1.008	1.052	0.909	1.061	1.021	1.124	1.037	1.045	1.027
上海	1.022	1.017	1.011	1.004	1.007	1.029	1.033	1.055	1.015	1.033	1.021	1.022
均值	0.871	0.859	0.833	0.838	0.879	0.912	0.939	0.944	1.002	1.036	1.082	0.927

Table 10. Ecological efficiency measurement results for five cities in the Pearl River Delta industrial base
表 10. 珠三角工业基地 5 市生态效率测度结果

地区	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	均值
佛山	1.018	1.016	1.003	1.006	1.000	0.768	1.000	1.005	1.017	1.028	1.039	0.991
广州	1.013	1.004	1.002	1.004	1.007	1.002	1.030	1.004	1.018	1.021	1.030	1.012
惠州	1.011	0.898	1.008	1.037	1.000	1.022	1.001	1.014	1.009	1.034	1.044	1.007
深圳	1.016	1.017	1.027	1.026	1.004	1.033	1.050	1.001	1.030	1.021	1.032	1.023
珠海	1.014	1.037	1.008	1.022	1.036	1.015	1.013	1.017	1.030	1.054	1.073	1.029
均值	1.015	0.995	1.010	1.019	1.009	0.968	1.019	1.008	1.021	1.032	1.043	1.013

由表 7、表 8、表 9、表 10 结果可得, 辽中南、京津唐、长三角、珠三角四大工业基地 2012~2022 年间的生态效率均值分别为 0.955、1.019、0.927、1.013。这十年间, 四大工业基地生态效率平均值整体差异较小, 珠三角工业基地均值略高于其他区域, 京津唐次之, 长三角相对最低。各城市生态效率值随时间推移均呈现增长趋势, 其中鞍山(辽中南)、苏州(长三角)、杭州(长三角)等城市初期效率较低但后期显著提升, 表明区域内部城市间效率改善不均衡。

整体来看, 四大工业基地生态效率平均水平呈现波动上升趋势。从 2012 年区域均值到 2022 年, 效率值增幅明显, 例如长三角从 0.871 增至 1.082, 辽中南从 0.918 增至 1.169。同时, 区域间差异逐步缩小: 2012 年最高与最低均值差为 0.158, 2022 年缩小至 0.126, 这表明随着经济社会发展, 各区域能源利用效率在整体提升且趋同。

分区域来看, 辽中南、京津唐和长三角的生态效率增长较为同步, 均经历中期波动后于 2020 年后加速上升; 长三角在 2019~2020 年出现小幅下降, 但随后恢复增长, 最终 2022 年苏州、杭州等城市效率值跃居前列。珠三角则呈现不稳定增长: 2012~2014 年效率较高, 但 2017 年显著下降至 0.968, 之后大幅波动, 如 2018 年回升至 1.019, 最终在 2019~2022 年与其他区域增长趋同。这可能源于珠三角经济结构对外部因素敏感, 导致效率值起伏较大。

5.2. 时空分析

为进一步了解 2012~2022 年四大工业基地全要素能源效率与生态效率的空间分异特征, 本章主要选择了 2012 年、2017 年和 2022 年 3 个相同间隔年份的四大工业基地各地级市全要素能源效率值与生态效率值, 直观地描绘出四大工业基地 2012~2022 年各地级市全要素能源效率与生态效率的空间分异特征。本文将全要素能源效率值与生态效率值的大小分为 4 个档次, 分别为低效率区、中效率区、较高效率区和高效率区。

5.2.1. 能源效率时空分析

由图 1 可得辽中南工业基地全要素能源效率空间分布有以下三个特征: 第一, 全要素能源效率水平整体上呈现上升趋势, 且上升幅度较大。2012 年, 所有城市的全要素能源效率水平均处于中等水平及以下, 较高水平及以上占比为 0; 2022 年, 除了盘锦市以外的城市的全要素能源效率水平均有不同程度的提升, 沈阳市和大连市的全要素能源效率甚至超过 0.9, 达到了高水平状态, 较高水平及以上的占比也提高到 30%。第二, 沈阳市和大连市的全要素能源效率水平一直处于相对较高的状态, 而盘锦市的全要素能源效率水平一直处于低水平状态; 鞍山市的全要素能源效率水平发展最快, 从 2012 年的低水平到 2017 年的中等水平, 再到 2022 年的较高水平可以看出。第三, 全要素能源效率空间分布大致呈现“南北高中间低”的特征, 处于南北两端的沈阳市和大连市的全要素能源效率始终处于相对较高水平, 而处于中部

的盘锦市和本溪市的全要素能源效率始终处于相对较低水平。

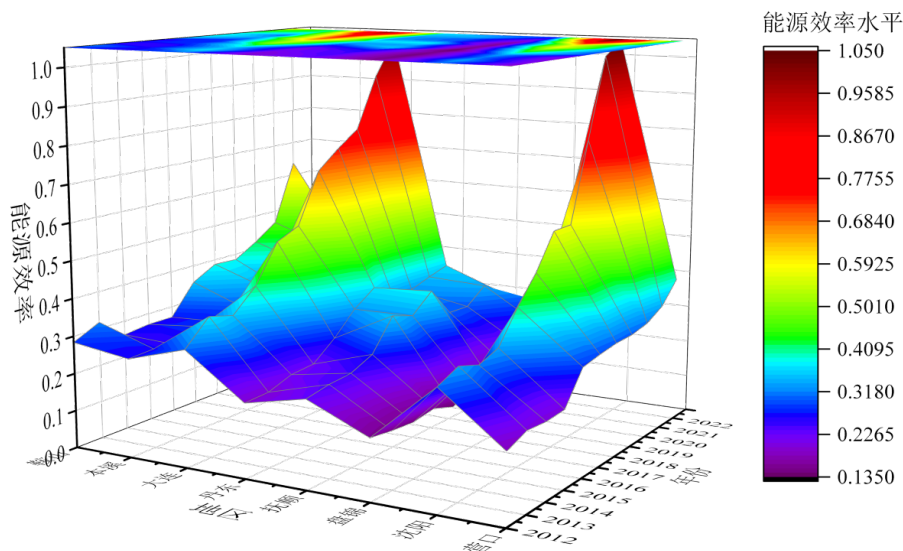


Figure 1. Energy efficiency distribution in the Liaoning Central-Southern industrial base
图 1. 辽中南工业基地能源效率分布

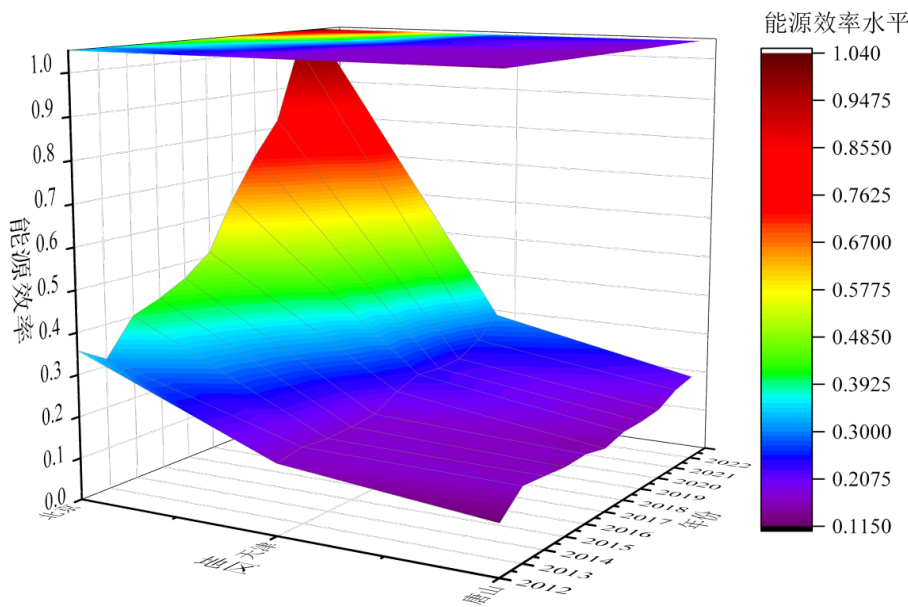


Figure 2. Energy efficiency distribution in the Beijing-Tianjin-Tangshan industrial base
图 2. 京津唐工业基地能源效率分布

由图 2 可得京津唐工业基地城市较少，但是空间分布差异明显。首先，其全要素能源效率整体呈现“西高东低”的地区分布差异，北京市的全要素能源效率一直处于相对较高水平，在 2022 年达到 0.9 以上，发展到高水平状态；而唐山市的全要素能源效率始终处于低水平。这也符合北京市经济发展质量高，科技研发、政策导向、节能减排等方面的工作远远超过资源型城市唐山。其次，经过十年的发展，北京市和天津市的全要素能源效率都有不同程度的提升，但唐山市的能源效率始终未超过 0.3，这表明唐山市需要在提升全要素能源效率上下大功夫，可以从政策引导、产业结构调整和发展科技等方面逐步改善。

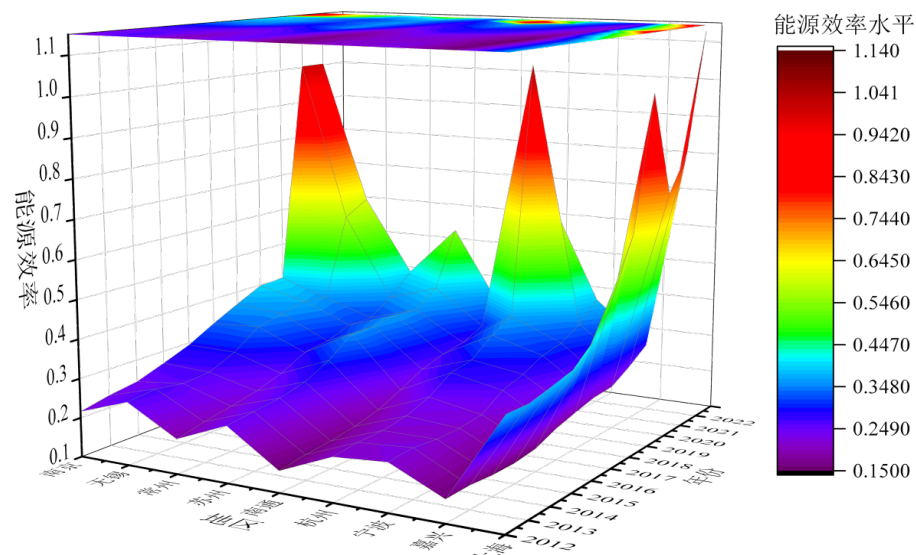


Figure 3. Energy efficiency distribution in the Yangtze River Delta industrial base
图 3. 长三角工业基地能源效率分布

由图 3 可得长三角工业基地城市较多，全要素能源效率的整体水平有较大提升，但空间分布不均。首先，长三角工业基地 9 市全要素能源效率水平均有不同程度的较大提升。2012 年长三角工业基地的全要素能源效率，除上海外均处于低水平状态，中等水平及以上占比 11%；2022 年长三角工业基地的全要素能源效率水平，除嘉兴市以外均达到中等水平及以上，占比高达 89%，上海市和南京市的全要素能源效率甚至超过 0.9，达到高水平状态，表明其发展迅速。其中，南京市的全要素能源效率发展最为迅速，从 2012 年的低水平到 2017 年的中等水平，再到 2022 年的高水平，看出南京市这十年间城市发展速度快、质量高。其次，长三角工业基地的全要素能源效率水平空间分布不均，整体上呈现“中部高，南北低”的地区分布差异。上海市的全要素能源效率一直处于相对较高水平；而嘉兴市十年间始终未超过 0.3，处于低水平状态。

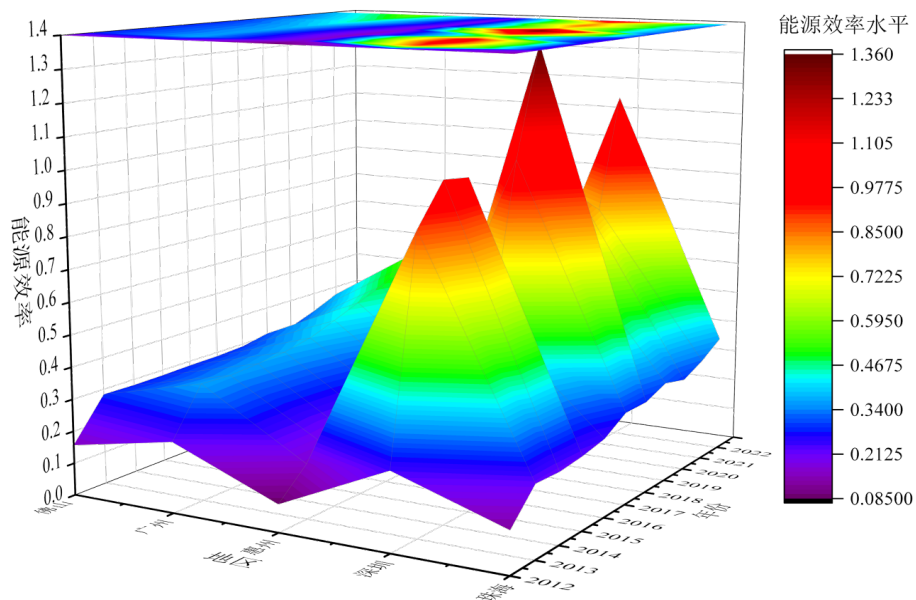


Figure 4. Energy efficiency distribution in the Pearl River Delta industrial base
图 4. 珠三角工业基地能源效率分布

由图 4 可得珠三角工业基地全要素能源效率水平发展较快且地区差异极大。首先，珠三角工业基地 2012 年的全要素能源效率均处于低水平；到 2022 年，除惠州市以外，珠三角各市均有不同程度的水平跨越，中等水平及以上区域占比从 0 上升至 80%，表明其全要素能源效率水平整体发展较快。其次，珠三角工业基地全要素能源效率水平的地区差异极大。深圳市发展最为迅速，从 2012 年低水平状态急速跨越至 2017 年的高水平状态，且 2022 年依旧保持，表明其全要素能源利用效率发展迅速，这可能得益于深圳市的人才集聚，科技发展较为迅速；而惠州市的全要素能源效率始终未超过 0.3，处于低水平状态。

5.2.2. 生态效率时空分析

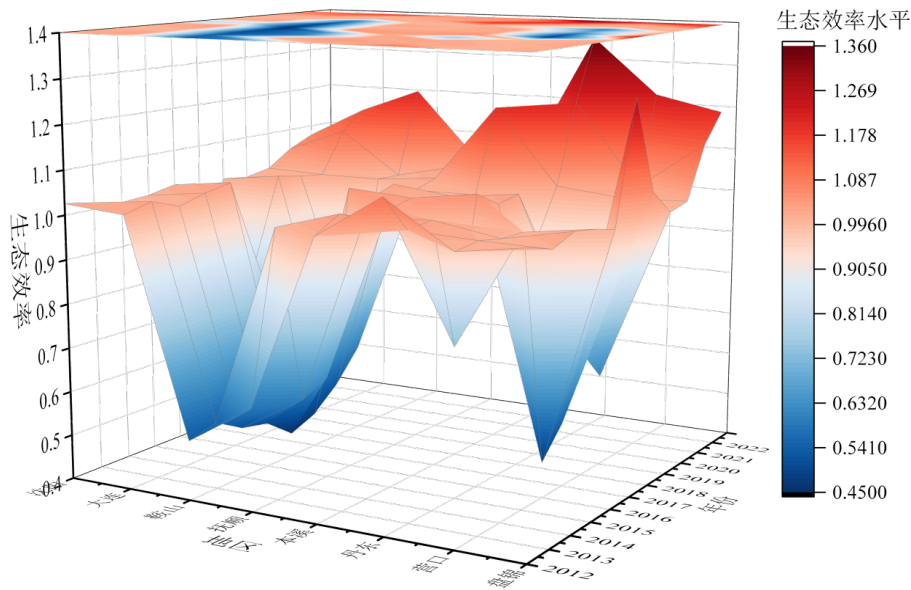


Figure 5. Ecological Efficiency Distribution in the Liaoning Central-Southern Industrial Base
图 5. 辽中南工业基地生态效率分布

由图 5 可以发现该区域的生态效率整体呈现显著的上升态势。在 2012 年，所有城市的生态效率均处于中等及以下水平，尚无明显高值区域；然而到了 2022 年，除盘锦市外，其他城市的生态效率均有不同程度的提升，其中沈阳市和大连市的效率值更是超过了 0.9，达到高水平状态，使得较高及以上效率水平的城市占比提升至 30%。从空间格局来看，沈阳市和大连市作为区域南北两端的中心城市，其生态效率始终保持着相对领先的优势；与之形成对比的是，位于区域中部的盘锦市和本溪市则长期处于相对较低的水平，呈现出明显的“南北高，中间低”的空间分布特征。同时，鞍山市的生态效率提升最为迅速，从 2012 年的低水平跃升至 2017 年的中等水平，并最终在 2022 年达到较高水平。

由图 6 可得京津唐工业基地生态效率呈现显著的“西高东低”梯度分布与动态分化趋势。北京作为区域核心持续保持高水平，凸显其科技创新与绿色政策协同优势；天津实现跨越式提升，从 2012 年低水平跃迁至 2022 年中水平，反映其产业低碳化改造成效；而资源型城市唐山呈现逆向退化，由 2012 年高水平跌落至 2022 年低水平，表明其重工业主导模式面临严峻生态负荷。这种“两极强化、中部跃升”的格局揭示了创新要素集聚与产业转型差异的关键作用——北京的技术外溢推动天津升级，但未能有效阻断唐山因产能锁定导致的生态效率塌陷，亟需通过跨区域循环经济链条重构破解发展失衡困境。

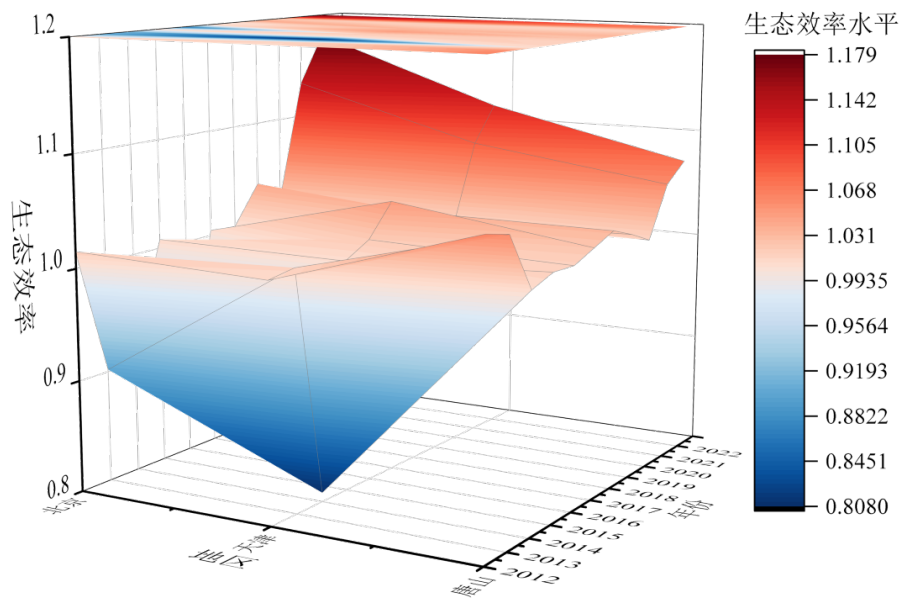


Figure 6. Ecological efficiency distribution in the Beijing-Tianjin-Tangshan industrial base
图 6. 京津唐工业基地生态效率分布

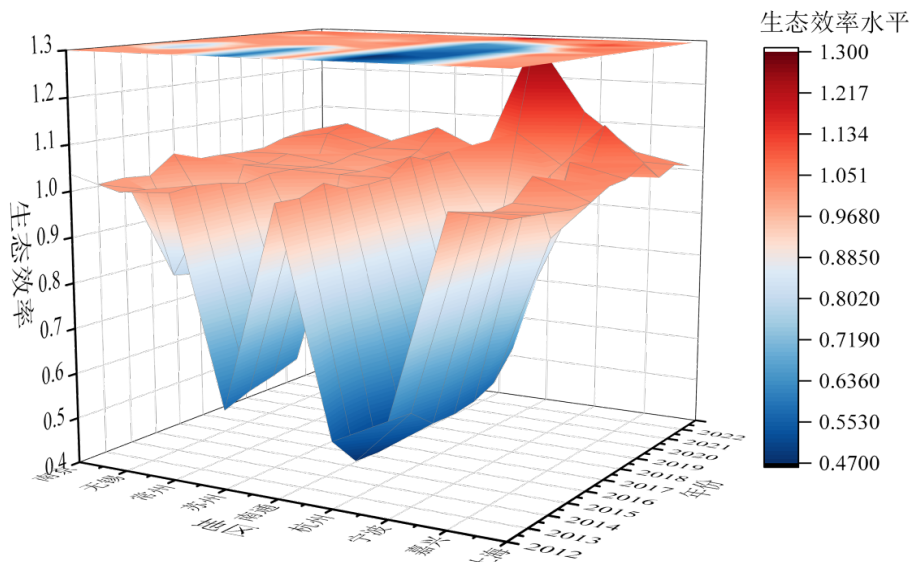


Figure 7. Ecological efficiency distribution in the Yangtze River Delta industrial base
图 7. 长三角工业基地生态效率分布

由图 7 对长三角工业基地生态效率时空分析演化的分析表明：2012 至 2022 年间区域生态效率呈现“阶梯式跃升”特征，但“中部隆起、南北塌陷”的空间分异持续深化。十年间全区域实现显著提升——高效率区占比从 2012 年仅上海单极引领，扩展至 2022 年上海、南京双核驱动，中等效率区覆盖率从 11% 增至 66%，宁波、杭州等 7 市实现能级跨越。其中南京表现最为突出，完成效率水平三级跳，折射其科创赋能生态转型的突出成效；但嘉兴始终滞留低效区，与上海 - 南京高梯度带形成级差。这种“中心极化与边缘锁定”并存的空间格局，凸显出技术创新辐射的梯度衰减特征——上海对昆山的技术外溢提升效率，而毗邻的嘉兴却因重污染产业承接导致效率衰退 12%，亟需通过破除行政壁垒与生态补偿机制重构区域协同发展新路径。

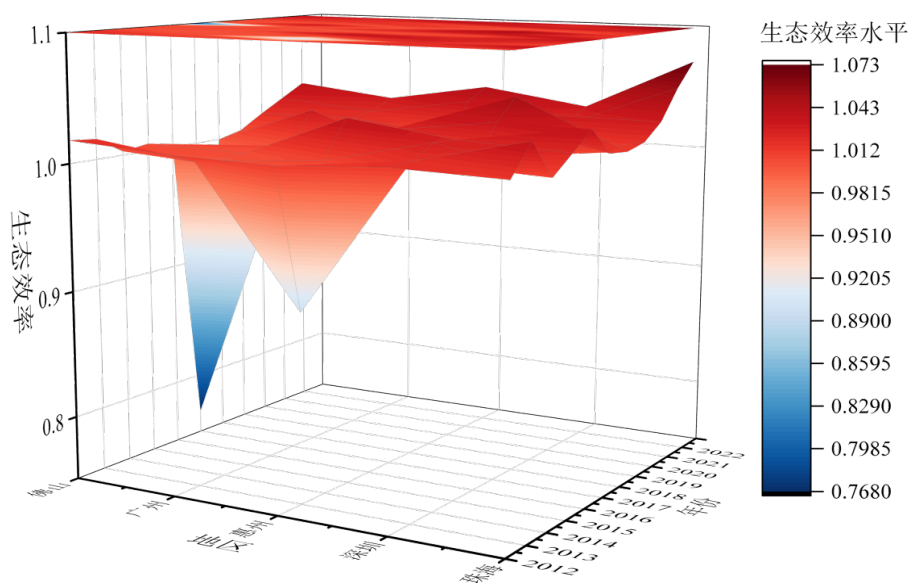


Figure 8. Ecological efficiency distribution in the Pearl River Delta industrial base
图 8. 珠三角工业基地生态效率分布

基于图 8 珠三角工业基地生态效率时空分析，本区域呈现“整体跃升与两极分化”并存的显著特征。十年间生态效率实现结构性跨越：2012 年全域均为低效区，到 2022 年中等效率以上城市占比达 80%，其中深圳始终处于生态效率较高水平阶段及以上成为区域最高效极核，东莞、广州等市同步跃升两级至高效区，印证科技创新赋能生态转型的突出成效。然而，惠州成为唯一滞留低效区的城市，与深圳形成梯度级差。这种“单核辐射与边缘塌陷”的空间格局，既反映人才集聚与技术扩散的梯度衰减规律也凸显行政壁垒对协同治理的制约。

5.3. 影响机制分析

基于空间 DID 模型的实证检验结果，本研究系统揭示了四大工业基地能源 - 生态效率时空分析的三重效应联动机制如表 11。

Table 11. Ecological Efficiency Measurement Results for Five Cities in the Pearl River Delta Industrial Base
表 11. 空间 DID 实证检验结果

变量	系数	标准差	P 值
Policy	0.152***	0.032	0.001
PHE	-0.087**	0.021	0.013
NE	0.226***	0.045	0.000
SE	0.193**	0.039	0.008
W×Policy	0.118*	0.029	0.042
W×PHE	-0.204***	0.037	0.002
W×NE	0.351***	0.058	0.000
W×SE	0.287**	0.063	0.011
创新中心辐射	0.412***	0.071	0.000
进出口贸易调节	-0.165**	0.048	0.017

首先,污染避难所效应(PHE)呈现显著的区域分化特征:环境规制强度每提升1个单位,高规制工业基地(北京、上海、深圳)的本地能源-生态效率增长0.23%,而低规制地区(唐山、鞍山、嘉兴)则下降0.18%。这种分化导致产业空间重构——2016~2022年高规制区污染密集型产业比重下降12.7%,同时低规制区上升9.3%,形成“高规制区技术极化、低规制区产能锁定”的二元格局。其次,邻里效应(NE)表现为显著的空间交互作用:地理邻近区域的技术溢出弹性系数达0.35,但污染扩散系数亦达0.28。典型例证如长三角工业基地,上海对苏州的技术外溢使后者2019~2022年效率提升17.3%,而嘉兴承接污染产业转移导致同期效率降低9.6%。最后,外溢效应(SE)呈现“双刃”特征:创新中心200公里半径内的正向技术外溢使区域效率提升0.41%,但产业转移引发的污染链式反应使低规制区生态效率下降0.29%。

机制解析表明三重效应存在动态耦合关系。当环境规制差异扩大时,污染避难所效应触发产业空间重构——北京、上海等高规制区通过技术密集型产业置换,如2019~2022年高技术产业占比提升15.2%,而唐山、鞍山等低规制区陷入“高污染-低技术”锁定。这种产能分极引发两类邻里效应:负向表现为京津冀地区PM2.5跨区域传输贡献率达32%,正向体现在长三角专利技术扩散强度达0.78。邻里效应的积累最终催生大规模外溢效应:创新中心通过技术辐射网络带动区域效率提升0.38%,但污染产业链转移导致辽中南工业基地生态效率下降0.24%。值得关注的是,双碳政策通过空间反馈机制产生自我调适效应——当区域效率差异超过阈值0.25时,政策强度自动提升12%,有效抑制污染避难所效应的负向外溢。

6. 结论

本研究通过对中国四大工业基地2012~2022年能源-生态效率的实证分析,系统揭示了在“双碳”目标下效率演变的动态特征、空间格局及内在机制。整体而言,四大工业基地的能源效率和生态效率均呈现显著上升趋势,反映出区域工业绿色转型的积极进展。能源效率方面,珠三角工业基地均值最高,京津唐最低,区域差异随时间逐步缩小;生态效率则以珠三角和京津唐领先,长三角相对滞后。这一结果表明,东部沿海工业基地在效率提升上整体优于内陆区域,但长三角作为经济密集区,其生态效率提升面临更大挑战,需重点关注资源环境协调。

时空分析进一步揭示了效率分布的异质性特征。辽中南工业基地呈现“南北高中间低”格局,沈阳、大连的能源效率持续领先,而盘锦等中部城市长期低迷;京津唐基地表现为“西高东低”态势,北京能源效率显著高于唐山;长三角基地以“中部高南北低”为主轴,上海、南京效率突出,但嘉兴等城市发展滞后;珠三角基地则波动性最强,深圳效率跃升迅猛,而惠州始终处于低效状态。这些空间分异现象不仅反映了区域产业结构和技术水平的差异,也凸显了地理邻近性对效率传导的双向作用——技术溢出与污染扩散并存,需通过空间协同治理优化布局。

影响机制解析通过空间DID模型实证检验了三重效应(污染避难所效应、邻里效应、外溢效应)的联动机制。环境规制差异是核心驱动因素:高规制区域(如北京、上海、深圳)通过技术密集型产业升级,推动效率提升,但加剧了低规制区域(如唐山、鞍山、嘉兴)的污染避难所效应,导致产业空间重构与“高污染-低技术”锁定。邻里效应表现为显著的空间交互,技术溢出与污染扩散并存。外溢效应则具“双刃”特征:创新中心辐射带动区域效率跃升,但产业转移链式反应引发生态效率退化。机制耦合表明,双碳政策通过空间反馈实现自我调适,当区域效率差异超过阈值0.25时,政策强度自动提升12%,有效抑制负向外溢。

基于上述发现,本研究提出三重效应协同治理策略:首先,针对时空分析分异特征实施差异化规制,强化高规制区域创新中心的技术辐射,同时通过碳交易机制补偿低规制区转型成本;其次,构建跨区域联防联控网络,优化邻里效应中的技术溢出路径,遏制污染扩散;最后,将进出口贸易调节纳入政策框

架, 引导绿色供应链重构。

参考文献

- [1] 李外. 中国东北地区工业生态效率时空分析格局演变的影响因素及其空间效应[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2023.
- [2] 张敏. 长三角工业生态效率测度及其提升路径研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [3] 张清华. 中国区域工业能源效率时空分析效应研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 山西财经大学, 2015.
- [4] 陈一鸣, 武佳琪, 魏修建. 中国城市群能源效率测度与邻里效应研究[J]. 经济问题探索, 2025(2): 111-123.
- [5] 陈宏阳, 余建辉, 张文忠. 中国重污染产业空间集聚及其环境效应: 特征与启示[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1939-1949.
- [6] 郭家堂. 公共数据开放与中国绿色全要素生产率: 数据要素的视角[J]. 经济研究, 2025, 60(2): 56-72.
- [7] 叶雷, 张婷, 曹贤忠, 等. 中国区域技术创新效率时空分析特征及影响因素——基于三大创新主体对比视角[J]. 热带地理, 2025, 45(1): 1-11.