

重污染企业环境绩效与财务绩效非线性耦合机制及双向U型滞后效应研究

张彩霞¹, 王婧瑜², 周雅婕³, 郑亚男^{1*}

¹华北理工大学经济管理学院, 河北 唐山

²华北理工大学化学工程学院, 河北 唐山

³华北理工大学理学院, 河北 唐山

收稿日期: 2026年4月16日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年6月16日

摘要

在碳减排目标下, 重污染企业环境绩效与财务绩效的协同关系成为绿色转型的关键议题。本研究以2012~2024年53家重污染行业上市公司为样本, 构建含排污费、资产回报率、托宾Q值等九项指标的评价体系, 系统探究双效间的非线性耦合机制与双向滞后效应。首先, 采用WOA-XGBoost耦合回归模型揭示二者非线性拟合关系, 模型拟合度均达0.92以上, SHAP分析表明企业规模为核心驱动因素且影响方向异质。其次, 面板向量自回归(PVAR)模型验证双向U型滞后响应, 资产回报率对排污费长期贡献率为8.7%, 而环境绩效对托宾Q值的贡献率随周期延长升至20.9%。最后, 采用K-Means聚类将企业划分为重经济型、重环保型和经济-环保型三类, 仅16%的企业实现双效协同, 但其环境与财务表现均显著优于其余类型。本研究实证检验了重污染企业环境绩效与财务绩效间的非线性耦合机制及双向动态滞后效应, 为环境规制优化与企业绿色战略制定提供实证参考。

关键词

WOA-XGBoost耦合回归模型, PVAR模型, K-Means聚类, 双向U型滞后响应, 双效协同

A Study on the Nonlinear Coupling Mechanism between Environmental and Financial Performance in Heavily Polluting Enterprises and the Bidirectional U-Shaped Lagging Effect

*通讯作者。

文章引用: 张彩霞, 王婧瑜, 周雅婕, 郑亚男. 重污染企业环境绩效与财务绩效非线性耦合机制及双向U型滞后效应研究[J]. 可持续发展, 2026, 16(6): 75-92. DOI: 10.12677/sd.2026.166225

Caixia Zhang¹, Jingyu Wang², Yajie Zhou³, Yanan Zheng^{1*}

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

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

³School of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: April 16, 2026; accepted: May 17, 2026; published: June 16, 2026

Abstract

Under carbon emission reduction targets, the synergy between environmental and financial performance in heavily polluting enterprises has become a key issue in green transformation. This study uses a sample of 53 listed companies in heavily polluting industries from 2012 to 2024 to construct an evaluation system comprising nine indicators, including pollution discharge fees, return on assets, and Tobin's Q ratio, and systematically investigates the nonlinear coupling mechanism and bidirectional lag effects between the two types of performance. First, a WOA-XGBoost coupled regression model was employed to reveal the nonlinear relationship between the two variables. The model fit exceeded 0.92, and SHAP analysis indicated that firm size is the core driver, with heterogeneous directions of influence. Second, a panel vector autoregression (PVAR) model verified a bidirectional U-shaped lag response. Return on assets contributed 8.7% to pollution discharge fees in the long term, while the contribution of environmental performance to the Tobin's Q ratio rose to 20.9% as the time horizon extended. Finally, using K-Means clustering, firms were categorized into three groups: economy-focused, environment-focused, and economy-environment-focused. Only 16% of firms achieved dual-effect synergy, but their environmental and financial performance significantly outperformed the other categories. This study empirically examines the nonlinear coupling mechanism and bidirectional dynamic lag effects between environmental and financial performance in heavily polluting firms, providing empirical insights for optimizing environmental regulations and formulating corporate green strategies.

Keywords

WOA-XGBoost Coupled Regression Model, PVAR Model, K-Means Clustering, Bidirectional U-Shaped Lag Response, Dual-Action Synergy

Copyright © 2026 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

近年来,我国社会经济飞速发展,在带来众多新发展机遇的同时也带来了许多挑战,我国日益严重的环境问题便是其中之一。重污染企业长期以来作为经济增长的重要引擎,为我国工业化进程加速贡献了不可小觑的力量,但同时其高能耗、高排放的生产模式也对我国生态环境造成了深远影响。根据联合国环境规划署(UNEP)统计,全球工业领域贡献了约30%的温室气体排放,其中钢铁、化工、建材等重污染行业占比超过60% [1]。中国作为世界第二大经济体,其工业污染问题尤为突出。

为应对全球气候危机,推进企业绿色发展转型,中国提出了碳减排目标。在此背景下,重污染企业面临前所未有的规制压力:一方面,环保法规要求企业升级污染治理技术;另一方面,碳排放配额交

易、环境税等市场化工具显著提高了环境违规成本。据生态环境部数据，2022年全国碳市场累计成交碳排放配额达2.3亿吨，企业碳成本内部化趋势日益凸显，环境绩效已成为企业合规经营的核心考核指标。

然而，尽管企业面临持续增强的外部环境绩效压力，重污染企业在实践层面仍面临如何平衡环境绩效与经济绩效的问题。环保成本内部化是否对企业经济绩效产生抑制作用，抑或通过创新补偿效应形成竞争优势，对于企业环境政策实施具有重大意义。因此，对环境绩效与财务绩效的相互作用的研究有助于明确企业开展环境管理的动因，从而为国家和企业制定相应的环境管理策略提供一定依据，助力实现双碳目标。

2. 文献综述

环境绩效与财务绩效的相关性理论主要分为三大学派：传统学派认为环境治理作为“额外成本”会降低企业利润和竞争力，企业因政府监管被动承担环境投入，导致财务绩效受损[2]。修正学派提出反向观点，严格环境规制可激励企业创新，通过提升资源效率或抢占绿色市场，实现环境与财务绩效协同增长，尤其在环保需求高涨的当下，企业主动管理环境绩效可增强长期竞争力[3]。二者的核心分歧在于环境治理的驱动逻辑与作用方向。折中学派认为上述理论均存在局限性：传统学派假设完全理性市场，忽视企业能动性；修正学派的“竞争优势”依赖特定政策或市场条件，普适性不足，环境绩效的经济效益受行业特征、技术路径等因素调节，需结合情境分析[4]。

当前研究结论仍存分歧，主因包括：(1) 环境与财务指标选取差异；(2) 样本异质性；(3) 外部环境动态变化。现有文献较少量化“双碳”背景下碳交易机制、绿色金融等对两绩效的非线性调节效应，为本文通过面板模型与机制检验揭示动态关系提供理论切入点。

3. 数据与模型设定

3.1. 变量与数据说明

本文基于2012~2024年53家重污染行业上市公司的面板数据展开研究，样本筛选流程如下：首先依据生态环境部重污染行业名录，选定煤炭、石化、钢铁、电力等12类行业；其次通过企业年报、ESG报告等渠道，手工采集53家企业环境绩效指标(排污费、ISO14001认证等)及财务指标(ROA、托宾Q值、财务杠杆等)；经数据清洗剔除异常值与缺失样本，最终构建包含689组观测值的平衡面板数据集。样本覆盖化工、电力、采矿等核心污染行业，环境数据经第三方核验，财务数据经审计认证，兼具行业代表性与数据可靠性，为实证分析提供高质量基础。变量选取结果如表1。

Table 1. Variable description

表 1. 变量说明

指标	变量名	符号	说明
环境绩效	排污费	PDF	企业总排污费
财务绩效	资产回报率	ROA	净利润/总资产
	托宾Q值	TQ	市场价值/重置成本
控制变量	企业规模	SIZE	企业总资产的自然对数
	财务杠杆	LEV	负债总额/资产总额
	公司成长性	GROWTH	营业收入增长额/上年营业收入

续表

ISO14001 认证	ISO	通过 ISO14001 认证为 1, 未通过为 0
环境事件应急机制	EME	建立环境事件应急机制为 1, 未建立为 0
“三同时” 制度	TSS	实行“三同时” 制度为 1, 未实行为 0

3.2. 模型设定

3.2.1. XGBoost 回归算法

XGBoost 算法是一类由基函数与权重进行组合形成对数据拟合效果佳的合成算法, 结合了梯度提升框架和正则化技术, 根据目标函数最小化原则寻找最优参数, 能够有效提高模型的预测能力和稳定性。该模型可表示为:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), \quad f_k \in F(i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中, $F = \{f(x) = w_{g(x)}\} (g: R^m \rightarrow \{1, 2, \dots, T\}, w \in R^T)$ 是 CART 决策树结构集合。

3.2.2. 面板向量自回归模型

面板向量自回归模型(Panel Vector Autoregression, 简称 PVAR)是一种用于分析多个时间序列变量在面板数据框架下的动态相互关系的统计模型。它结合了面板数据分析和向量自回归分析的优点, 适用于研究不同个体在时间上的变化以及它们之间的相互依赖关系。

$$Y_{it} = A_0 + A_1 Y_{it-1} + A_2 Y_{it-2} + \dots + A_p Y_{it-p} + \epsilon_{it} \quad (2)$$

其中, Y_{it} 是个体 i 在时间 t 的一组变量, A_0 是常数项, A_1, A_2, \dots, A_p 为参数矩阵, 表示滞后项影响, ϵ_{it} 为随机误差项。

3.2.3. K-Means 聚类模型

K-Means 聚类是一种迭代的聚类算法, 其目的是将数据集分成 k 个簇, 使得每个簇的内部相似度最大, 而不同簇之间的相似度最小。同时, 在无监督学习的思想下, 通过对数据点进行划分进行迭代并通过公式更新簇中心。

$$\mu_k^{new} = \frac{1}{|C_k|} \sum_{x_i \in C_k} x_i \quad (3)$$

其中, μ_k^{new} 为更新后的簇中心, C_k 是上次更新前的簇。

4. 实证研究结果

4.1. 数据预处理与描述性统计

4.1.1. 数据预处理

本文系统性地收集并整理了 53 家重污染企业在 2012 年至 2024 年间详尽的企业经营数据, 旨在深入探究环境绩效与财务绩效之间的内在联系。为此, 本文构建了包含排污费、资产回报率、托宾 Q 值、企业规模、财务杠杆、公司成长性、ISO14001 环境管理体系认证、环境事件应急机制执行情况及“三同时”制度在内的 9 项关键指标, 以全面衡量企业的环境表现与财务健康状况。为了确保后续模型构建与实证分析的准确性和有效性, 对排污费进行自然对数转换消除量纲, 采用多重插补填补缺失值, 去除异常值, 并采用归一化增强数据鲁棒性。

数据处理后，抽选 5 家重污染企业可视化其 2012~2024 年排污费变动趋势，如图 1 所示：

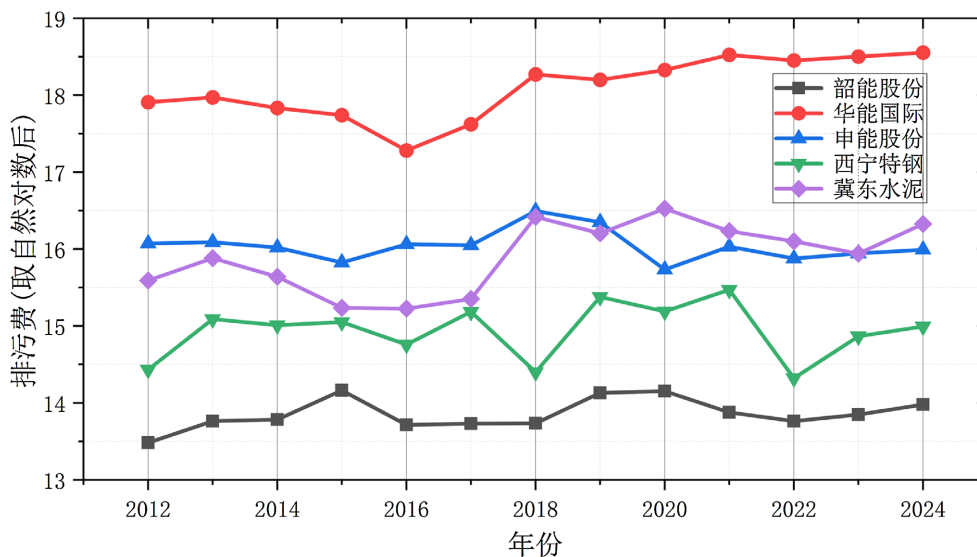


Figure 1. Changes in pollution discharge fees for five heavily polluting enterprises over 13 years
图 1. 五家重污染企业 13 年排污费变动

4.1.2. 描述性统计

本文使用 Python 对排污费与资产回报率、托宾 Q 值和各控制变量做描述性统计分析，分析结果如表 2 所示。

Table 2. Results of descriptive statistics
表 2. 描述性统计结果

变量	样本数	均值	标准差	最大值	最小值
排污费	689	14.996401	1.619505	18.998938	11.259026
资产回报率	689	0.037418	0.053497	0.406690	-0.136700
托宾 Q 值	689	1.567896	0.872820	7.132740	0.749435
企业规模	689	23.350953	1.393218	27.524550	19.909550
财务杠杆	689	0.522487	0.154530	0.966518	0.100981
公司成长性	689	0.119074	0.295790	2.664706	-0.534884
ISO14001 认证	689	0.334906	0.472329	1	0
环境应急机制	689	0.514151	0.500193	1	0
“三同时”制度	689	0.388365	0.487762	1	0

对 689 个样本数据分析显示：环境成本方面，排污费均值 14.996，标准差为 1.619，在区间[11.259, 18.999]内呈离散分布；财务指标中资产回报率均值 0.037，部分企业出现负收益，反映盈利脆弱性。托宾 Q 值均值 1.568，标准差为 0.873 显示市场估值整体合理，但企业间差异显著。环境管理指标显示，仅 33.49%企业通过 ISO14001 认证，38.84%执行“三同时”制度，环保管理体系覆盖率不足。数据表明重污染企业需强化环境管理，推动环境经济协同发展。

4.2. 相关性分析与检验

4.2.1. Pearson 相关性分析

Pearson 相关性分析是一种用于量化两个连续变量之间线性关系强度与方向的统计方法。其核心原理基于协方差与标准化的思想，将变量间的线性趋势转化为标准化系数，取值范围为 $[-1, 1]$ 。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

其中， X, Y 分别代表两个要衡量的变量。

当 $r=1$ 时，表示两个变量呈现完全正相关，即一个变量增加，另一个变量也会以固定比例增加；当 $r=0$ 时，表示两个变量完全没有线性相关关系；当 $r=-1$ 时，表示两个变量呈现完全负相关，即一个变量增加，另一个变量会以固定比例减少。由此，本文得到各变量间 Pearson 相关水平如图 2 所示：

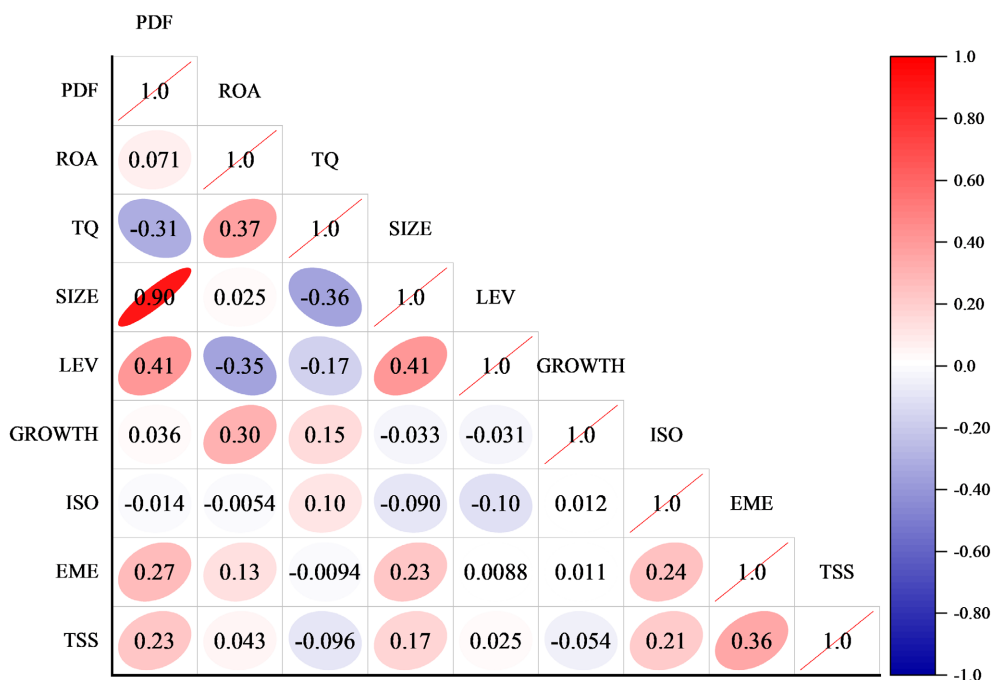


Figure 2. Pearson correlations among variables

图 2. 各变量 Pearson 相关性

图 2 显示，企业规模与排污费线性相关性较高，相关性系数达到 0.90，但其作为控制变量未显著影响被解释变量。其余变量间相关性较弱且均小于 0.5，如托宾 Q 值与排污费、企业规模，以及资产回报率与财务杠杆均呈低度负相关。整体变量间线性关联性不强，以弱相关为主，需进一步探究解释变量与被解释变量间潜在的非线性作用机制。

4.2.2. 多重共线性检验

多重共线性会导致回归系数的不稳定性，从而影响模型的解释和预测能力。因此，在进行模型拟合分析之前，需要对各自变量之间进行多重共线性检验，来用于判断回归模型中自变量之间是否存在高度相关性。为检验自变量之间是否存在多重共线性，采用方差膨胀因子(VIF)来进行评估，计算公式如下：

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (5)$$

其中, R_i^2 表示回归模型中自变量 X_i 与其他自变量的回归平方和。若 $VIF > 10$, 则被认为该自变量与其他自变量之间存在严重的多重共线性。

Table 3. Results of the multicollinearity test

表 3. 多重共线性检验结果

自变量	VIF
资产回报率(ROA)	2.275
托宾 Q 值(TQ)	4.725
企业规模(SIZE)	5.856
财务杠杆(LEA)	3.979
公司成长性(GROWTH)	1.304
ISO14001 认证(ISO)	1.687
环境事件应急机制(EME)	2.521
“三同时”制度(TSS)	1.952
Mean VIF	3.037

根据表 3 中结果分析, 各自变量的方差膨胀因子均小于 10, 这表明不存在多重共线性问题。这一发现为后续的回归拟合提供了良好的基础, 意味着自变量之间的相关性不会显著干扰模型参数的估计。

4.2.3. 平稳性检验

在面板数据分析中, 引入时间维度后需通过平稳性检验区分个体与时间效应, 以提升模型解释力。本文采用 Phillips-Perron (PP) 检验, 通过单位根测试判断序列平稳性。相比 ADF 检验, PP 检验在异方差场景下鲁棒性更强, 能有效修正序列相关性和异方差问题, 确保回归分析前数据平稳性可靠。PP 检验结果如表 4 所示:

Table 4. PP test results

表 4. PP 检验结果

变量	P 值	是否平稳
排污费	0.000	平稳
资产回报率	0.000	平稳
托宾 Q 值	0.000	平稳
企业规模	0.000	平稳
财务杠杆	0.000	平稳
公司成长性	0.000	平稳
ISO14001 认证	0.000	平稳
环境事件应急机制	0.000	平稳
“三同时”制度	0.000	平稳

在经济金融研究中，数据平稳性是模型有效性的基础。表 4 显示，各变量经 Phillips-Perron 检验后 P 值均显著小于 0.05，拒绝单位根原假设，证实面板数据平稳。该结果消除了非平稳性导致的伪回归风险，为后续回归分析提供统计可靠性保障。数据平稳性确保了变量间关系的稳健解释与预测能力，使回归拟合结果更具准确性，支撑研究结论的科学性。

4.3. WOA-XGBoost 耦合回归模型

4.3.1. 耦合回归模型建立与求解

本研究选择 WOA-XGBoost 耦合模型，主要基于以下考量：重污染企业环境绩效与财务绩效的关系受多维因素交织影响，变量间存在复杂非线性与非单调特征。XGBoost 无需预设函数形式，能自适应学习变量交互关系，且对缺失值和异常值具有较好鲁棒性，契合企业异质性明显、数据分布离散的特点。引入鲸鱼优化算法(WOA)对超参数进行全局寻优，可避免传统网格搜索陷入局部最优。

相比面板门槛模型等预设分段结构的非线性方法，WOA-XGBoost 在捕捉高维交互与平滑非线性方面更具灵活性，但可解释性有所牺牲。为此，本研究辅以 SHAP 框架解析特征贡献，并通过 PVAR 动态模型进行交互验证，以弥补单一机器学习模型在经济学机制解释方面的不足。

鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)是一种模拟座头鲸捕食行为的元启发式优化算法，主要用于解决连续优化问题。WOA 模拟了座头鲸的两种捕食行为：围捕与气泡网捕猎[5]。XGBoost 回归模型是一种集成学习算法，它是梯度提升决策树的改进版本，特别适合于特征关系复杂但数据量较小的回归任务。该模型在处理具有复杂交互作用和缺失值的多维数据时表现出色，能够有效应对高维数据、建模非线性特征之间的关系，并且对缺失值具有良好的鲁棒性[6]。

本文构建 WOA-XGBoost 回归模型的流程分为四步：首先进行数据清洗确保数据质量；其次构建九项特征变量以表征多维信息；随后通过标准化处理消除量纲差异，提升模型泛化性；最后利用鲸鱼优化算法(WOA)对 XGBoost 的超参数进行全局寻优，突破传统参数调优的局部收敛限制。该耦合模型通过 WOA 的螺旋捕食机制和气泡网攻击策略，在参数空间内高效探索最优解集，最终输出预测精度更高、鲁棒性更强的集成回归模型。

经过 WOA 优化算法，当鲸鱼数量为 70 时，进行迭代寻优得到以下最优超参数组合(表 5)：

Table 5. Optimal hyperparameter combination

表 5. 最优超参数组合

参数	取值
max_depth	5
learning_rate	0.214
n_estimators	175
colsample_bytree	0.66
reg_alpha	0.26
reg_lambda	2.92
min_child_weight	3

将所获得的最佳超参数组合应用于 XGBoost 回归模型进行拟合与预测后，得到了相应的模型拟合结果。

根据表 6 中的模型结果，可以看出 WOA-XGBoost 模型在训练集和测试集上都展现出了卓越的性能，训练集 R^2 为 0.983，测试集 R^2 为 0.924，约 0.06 的差值提示存在一定过拟合倾向，源于样本企业异质性

强与观测规模有限。但测试集 R^2 仍超 0.92 且 MSE 维持低位，表明模型泛化能力良好，核心关系稳健。为缓解过拟合带来的推断风险，本研究采用 SHAP 值分解进行事后解释，并通过 PVAR 模型从动态时序维度交叉验证变量间的响应关系，使研究结论不完全依赖于单一机器学习模型的点预测结果，从而增强分析的可信度。同时，该模型结果揭示了重污染企业环境绩效与财务绩效间存在显著的非线性回归拟合关系，为下一步的实证研究作出铺垫。

Table 6. Fitting results
表 6. 拟合结果

数据集	训练集	测试集
R^2	0.983	0.924
MSE	0.001	0.002

4.3.2. SHAP 模型解释

针对 XGBoost 模型的可解释性不足，本文引入基于沙普利值的 SHAP 框架，通过量化特征贡献度与可视化分析，直观揭示决策逻辑。该方法解析了模型的非线性机制与特征交互效应，在全局与局部视角下提升了透明度与因果推断力，有效平衡了预测性能与解释需求。

对 WOA-XGBoost 回归结果进行 SHAP 解释，可得到以下全局特征影响和局部特征影响分布图：

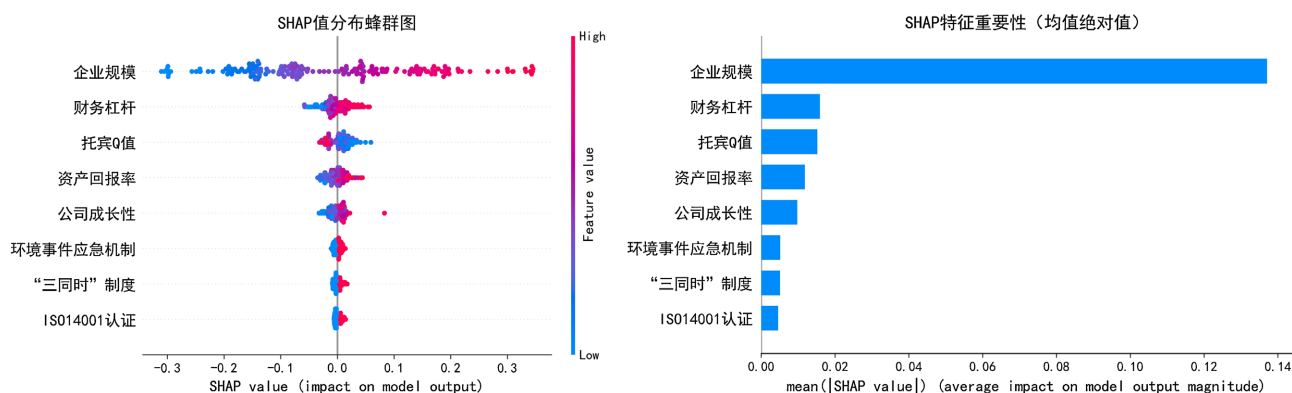


Figure 3. Impact of global features

图 3. 全局特征影响

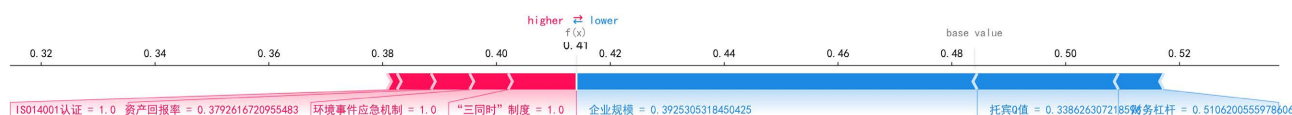


Figure 4. The impact of local features

图 4. 局部特征影响

图 3 与图 4 分析表明，企业规模是影响排污费的核心因素，其 SHAP 值呈现广域分布及方向异质性，揭示非线性主导作用。托宾 Q 值作为次要因素，SHAP 值集中于 $[-0.1, 0.0]$ 区间且多为负向，表明其提升会抑制排污费。财务杠杆与资产回报率虽与排污费正相关，但 SHAP 贡献幅度较小，实际影响有限。该结果表明企业规模因“抓大放小”的监管逻辑成为排污费的首要非市场约束，托宾 Q 值则通过资本市场倒逼路径产生抑制作用。财务杠杆与资产回报率的微弱关联反映环境成本内部化滞后，共同形成“规模主导 - 市场约束辅助 - 财务激励滞后”的驱动格局，提示多中心、非对称的干预思路。

研究核心发现：企业规模通过复杂的非线性机制成为排污费变动的核心驱动要素，托宾 Q 值通过价格信号传导产生间接调节作用，而其他财务指标对企业排污费的影响效应则较为微弱。

4.4. PVAR 模型关系实证研究

基于环境绩效与财务绩效的非线性回归分析结果，本文进一步构建面板向量自回归(PVAR)模型，量化二者的双向动态交互效应。通过脉冲响应与方差分解，揭示财务绩效对环境绩效变动的时滞影响及长期均衡关系，解析两者跨期传导的非对称性与路径依赖特征，深化对复杂动态关联机制的理解。

4.4.1. 平稳性检验

面板向量自回归(PVAR)模型需数据平稳以避免伪回归。本文采用 ADF 检验对财务绩效(资产回报率、托宾 Q 值)及环境绩效(排污费)变量进行平稳性分析,通过引入滞后项修正自相关性,确保检验结果稳健。表 7 显示各变量均通过 ADF 检验, $P < 0.05$, 拒绝原假设, 数据序列平稳, 满足 PVAR 建模前提, 为后续动态关系分析提供可靠性支撑。

Table 7. ADF test results

表 7. ADF 检验结果

变量	ADF 统计量	P 值
排污费	-4.736	0.0000
资产回报率	-13.732	0.0000
托宾 Q 值	-5.3188	0.0000

4.4.2. 最优滞后阶数的选取

在使用面板向量自回归模型时, 需要选取最优滞后阶数来保证模型的准确率与效率。本文综合采用赤池信息量准则(AIC)、贝叶斯信息量准则(BIC)和汉南 - 奎因信息量准则(HQIC)进行判断, 并遵循多数准则一致原则, 以提高模型选择的说服力。计算公式如下:

$$\begin{cases} \text{AIC} = -2\ln(L) + 2k \\ \text{BIC} = -2\ln(L) + k \ln(n) \\ \text{HQIC} = -2\ln(L) + 2k \ln(\ln(n)) \end{cases} \quad (6)$$

其中, L 为模型的似然函数, k 为模型参数的个数, n 为样本容量。

Table 8. Optimal order of lag

表 8. 最优滞后阶数

滞后阶数	AIC	BIC	HQIC
1	-8.220	-8.136*	-8.188*
2	-8.214	-8.066	-8.156
3	-8.205	-7.994	-8.123
4	-8.236*	-7.962	-8.130
5	-8.214	-7.876	-8.082
6	-8.199	-7.797	-8.043
7	-8.213	-7.746	-8.032

续表

8	-8.201	-7.671	-7.995
9	-8.186	-7.591	-7.955
10	-8.172	-7.512	-7.916

注：*代表的是对应变量的最优滞后阶数。

由表 8 中结果可得，AIC 信息准则指向最优滞后阶数为 4，BIC、HQIC 信息准则指向最优滞后阶数为 1。由于托宾 Q 值对于排污费影响比资产回报率对排污费更大，则可推断托宾 Q 值与排污费之间最优滞后阶数为 1，资产回报率与排污费之间最优滞后阶数为 4。

4.4.3. 格兰杰因果检验

格兰杰因果关系检验是一种用于探讨时间序列变量之间因果关系的统计方法，旨在判断一个时间序列 (X) 是否能够通过其过去的值来预测另一个时间序列 (Y) 的当前值。这种方法特别适合于处理数据中可能存在的动态复杂性和异质性，从而能够更准确地评估不同变量之间的影响力和因果关系。检验结果如下表 9：

Table 9. Results of the Granger causality test

表 9. 格兰杰因果检验结果

变量	原假设	P 值	结果
PDF-ROA	排污费不是资产回报率的格兰杰原因	0.251	接受
	资产回报率不是排污费的格兰杰原因	0.044	拒绝
PDF-TQ	排污费不是托宾 Q 值的格兰杰原因	0.000	拒绝
	托宾 Q 值不是排污费的格兰杰原因	0.787	接受

格兰杰因果检验以“X 非 Y 原因”为原假设，若 $P > 0.05$ 则拒绝原假设。表 9 显示滞后 4 阶时资产回报率(ROA)是排污费(PDF)的格兰杰原因，滞后 1 阶时 PDF 是托宾 Q 值(TQ)的原因，证实环境绩效与财务绩效之间存在双向预测关系。

4.4.4. 脉冲响应函数分析

在证明环境绩效与财务绩效之间存在双向因果关系后，为进一步确定二者的滞后响应关系，本文又继续对二者进行了脉冲响应函数分析。脉冲响应函数(IRF)描述系统在某一时刻受到一个单位冲击后，各变量随时间推移的动态变化路径，是分析动态系统或时间序列模型对“外部冲击”反应的重要工具，广泛应用于经济学、工程学、信号处理等领域。脉冲响应结果如下。

如图 5 所示，正交化 PDF-ROA 脉冲响应在 30 期内收敛至零，表明模型稳定。冲击初期 ROA 对 PDF 表现为正向响应，随后在第 4~8 期迅速转入负向区间，形成暂时性抑制效应，至第 10 期后缓慢回升并趋向于零。这一“正 - 负 - 收敛”的多阶段响应特征，反映了环保投入对财务收益的短期促进、中期承压与长期中性化的非线性传导过程。整体揭示环境与财务绩效间存在非线性、短期波动与长期收敛并存的“U”型动态关联。

如图 6 所示，正交化 PDF-TQ 脉冲响应 30 期内收敛至零，模型稳定。PDF→PDF 响应同前；TQ→PDF 几乎平稳，显示二者关联微弱；PDF→TQ 初始呈负向影响，随后转正并归零，体现排污费对投资决策的短期抑制与长期恢复；TQ→TQ 初期急降后迅速收敛，表明自我调节力强但短期冲击显著。结果揭示排污费与托宾 Q 值间复杂的动态交互与时间尺度差异。

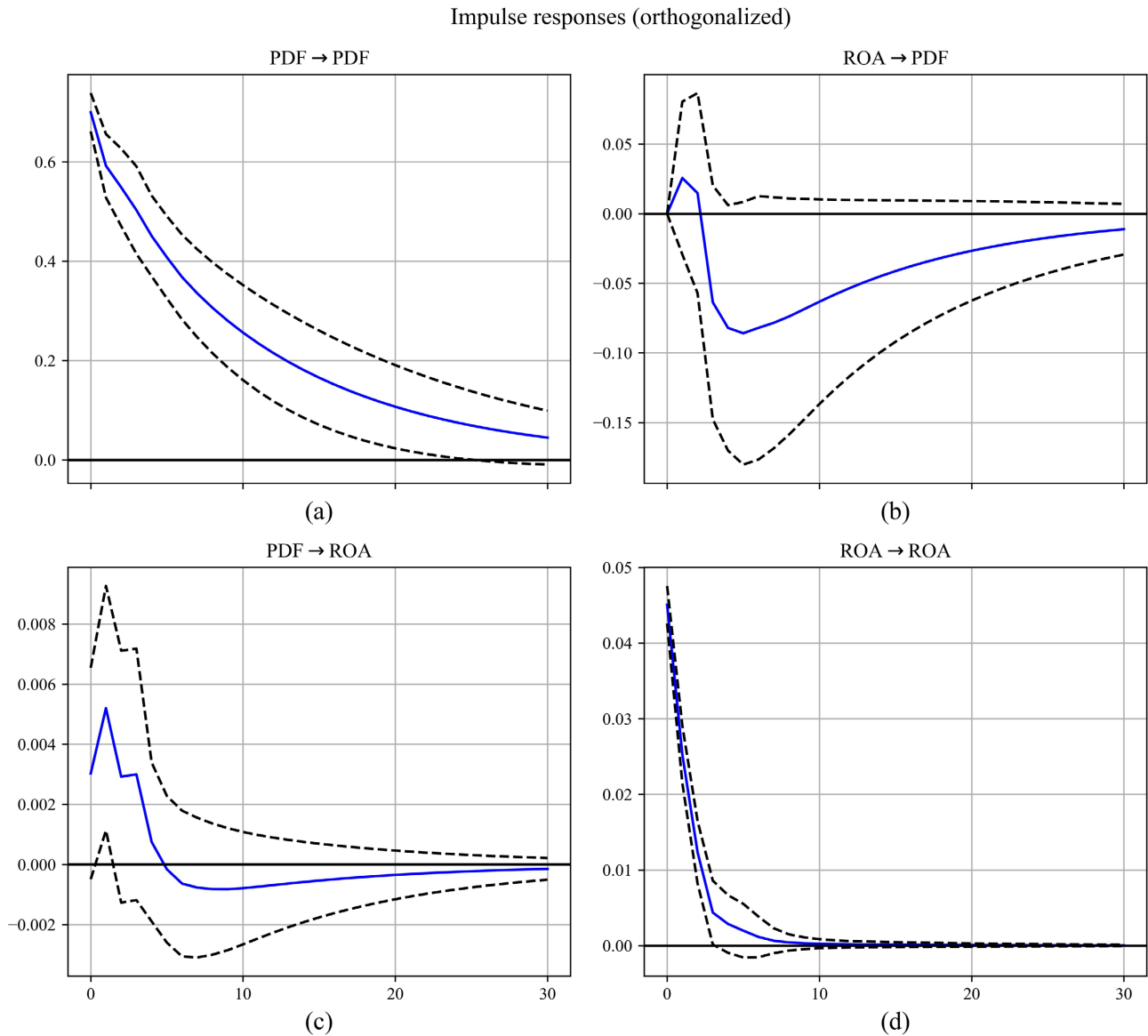


Figure 5. PDF-ROA impulse response results

图 5. PDF-ROA 脉冲响应结果

通过图 5 和图 6 的分析, 可以清晰地看到环境绩效(PDF)与财务绩效(ROA 和 TQ)之间的动态关系。排污费对资产回报率和托宾 Q 值的影响表现出复杂的短期和长期特征, 短期内这一影响可能导致显著波动, 但随着时间的推移, 冲击的效果逐渐减弱, 最终趋向稳定。此外, 在存在格兰杰预测关系的情况下, 资产回报率对排污费(ROA→PDF)和排污费对托宾 Q 值(PDF→TQ)之间的互动关系都呈现出 U 型的响应特征。

这一发现表明, 环境绩效与财务绩效之间的联系并非简单的线性关系, 而是存在一种非线性的 U 型结构。这意味着在特定的条件和时间范围内, 环境绩效先对财务绩效(或财务绩效对环境绩效)产生负面影响, 随后又回归正向, 结合 EPI-FP 协同框架可作出以下判断: 重污染企业在初步发展时更加重视经济发展, 而对环境保护投入较少, 随后追加环保投入后, 短期内因滞后效应财务绩效并不能立马做出反应, 并且极大概率经济利益会因环保不当持续降低, 但当达到一定时间时, 环保滞后效应发挥作用促进财务绩效正向发展, 从而呈现出 U 型结构。

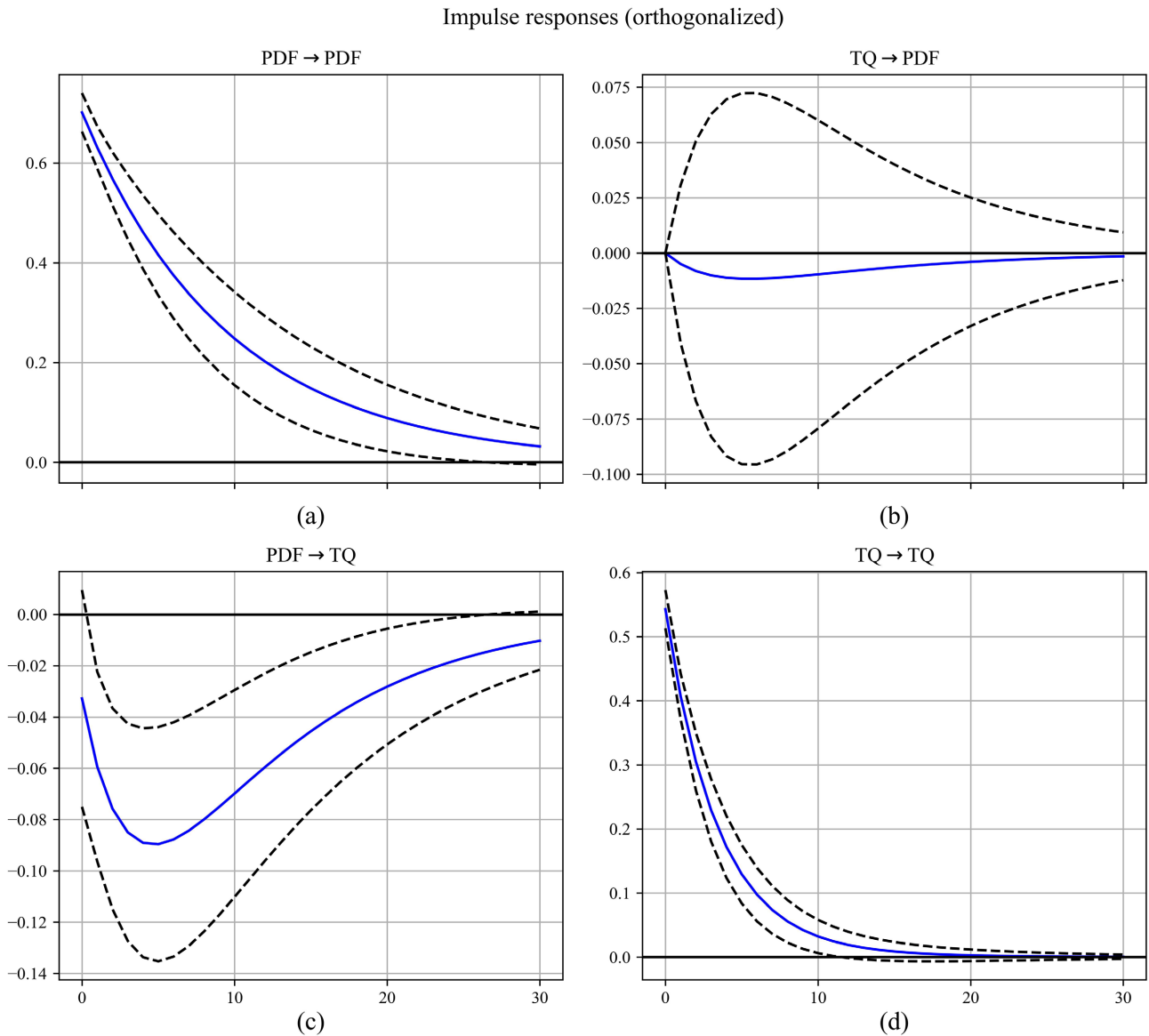


Figure 6. PDF-TQ impulse response results

图 6. PDF-TQ 脉冲响应结果

4.4.5. 方差分解分析

本文采用方差分解法量化变量间动态响应关系，基于面板数据分析不同冲击对目标变量波动的贡献度。如表 10 所示，该方法逐期解析各解释变量对被解释变量方差变动的解释比例，识别主导波动源及其时变效应，揭示环境绩效与财务绩效的跨期交互影响强度与持续性，为因果机制提供动态量化依据。

根据表 10 的分析结果，财务绩效(ROA 和 TQ)在 30 期内对环境绩效(PDF)产生了显著影响，并且这种影响呈现出持续上升的趋势。到 30 期末，ROA 和 TQ 分别对 PDF 的贡献率达到 8.7%和 1.5%。这表明，对于重污染企业来说，在一定范围内，财务绩效确实能够影响其环境绩效，并且随着时间的推移，这种影响趋于加强。同时，环境绩效(PDF)对财务绩效(ROA 和 TQ)也表现出重要的影响，在 30 期末的贡献率分别为 1.5%和 20.9%。这说明在长时间内，环境因素对重污染企业的财务表现产生了显著而逐步增强的影响。

Table 10. Results of the decomposition of variance
表 10. 方差分解结果

变量	期数	PDF	ROA	TQ
FEVD for PDF	1	1.000000	0.000000	0.000000
	15	0.966926	0.022273	0.010801
	30	0.897970	0.086854	0.015177
FEVD for ROA	1	0.004465	0.995535	0.000000
	15	0.048408	0.889226	0.062367
	30	0.015156	0.838965	0.102309
FEVD for TQ	1	0.020421	0.159404	0.820175
	15	0.186664	0.141494	0.671843
	30	0.208819	0.142266	0.648915

4.4.6. PVAR 模型评估

为说明 PVAR 模型实证结果的有效性, 本文采用 Durbin-Watson 统计量和残差正态性检验来证明该 PVAR 模型切实有效。Durbin-Watson (DW) 统计量是用于检验回归分析中残差自相关性的一种统计量, 主要通过判断回归模型中的序列相关性来进行模型诊断。DW 统计量的范围为 0~4。当 $DW \approx 2$ 时, 表示残差是独立的, 没有自相关; 当 $DW < 2$ 时, 表示残差存在正自相关关系; 当 $DW > 2$ 时, 表示残差存在负自相关关系。

$$DW = \frac{\sum_{t=1}^{n-1} (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (7)$$

此外, 还可通过检验残差是否满足正态分布来判断 PVAR 模型及其结果的准确性与有效性, 即残差正态性检验。

采用 Durbin-Watson 统计量和残差正态性检验对滞后阶数为 4 的 PDF 和 ROA 响应关系和对滞后阶数为 1 的 PDF 和 TQ 响应关系中进行计算, 得到以下结果:

Table 11. Results of the DW statistics and test for normality of residuals
表 11. DW 统计及残差正态性检验结果

变量组合	DW	残差正态性 P 值
[PDF, ROA]	[1.999, 2.000]	[0.141, 0.230]
[PDF, TQ]	[2.097, 1.966]	[0.320, 0.190]

由表 11 可得各变量在相应条件下 DW 统计量均满足 $DW \approx 2$, 则证明残差独立, 不具有自相关性。同时残差正态性 P 值均大于 0.05, 接受原假设, 各变量残差呈现正态分布形式, 模型结果拟合良好。

4.5. K-Means 聚类分析

实证分析表明: (1) 环境绩效与财务绩效存在非线性关联; (2) 控制变量固定时, 二者呈现双向滞后效应; (3) 交互关系呈 U 型动态特征。基于此, 对 53 家重污染企业进行 K-Means 聚类评估, 将样本划分为重经济型、重环保型及经济 - 环保型三类模式, 为差异化转型策略制定提供依据。

4.5.1. 确定簇中心数量

K-Means 聚类是一种广泛使用的无监督学习算法，旨在将数据集分成 K 个预定义的簇，通过迭代的方式不断调整聚类结果，直到达到收敛为止，进而达到“簇内差异小，簇间差异大”的效果。通过计算聚类的总平方误差(SSE，即每个点到所属簇中心的距离的平方之和)来衡量聚类效果，进而找到最佳聚类数 k 与 SSE 转折点来确定分几类簇。

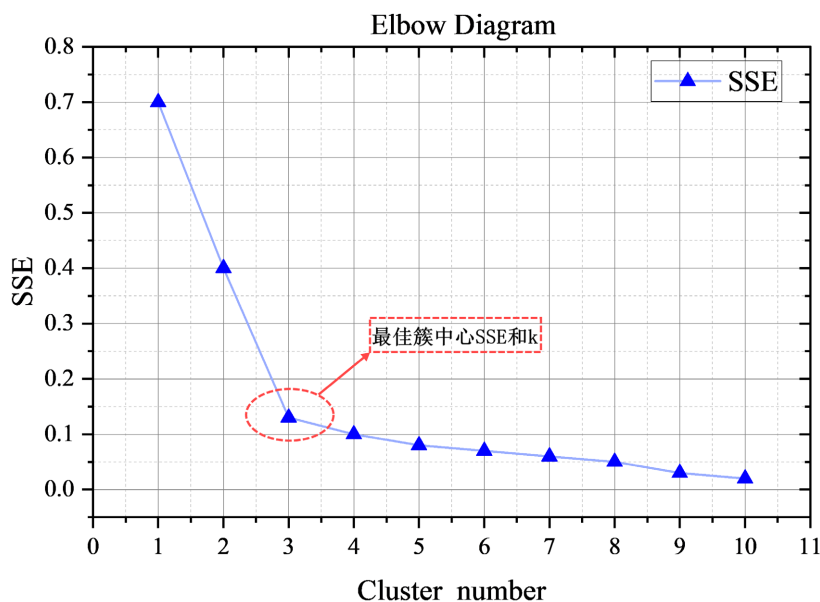


Figure 7. Illustration of the elbow

图 7. 肘部图

由肘部图(图 7)可得，最佳簇中心数量为 $k = 3$ ，且当 $k = 3$ 时， $SSE \approx 0.13$ 说明总平方误差转折最大、聚类效果较好且模型复杂度较低。

4.5.2. 模型结果与评估

经过肘部图判断最佳簇中心数量和数据点分配并进行更新迭代后，得到以下聚类结果，如图 8 所示。

由最终聚类结果可得，在簇中心数量为 $k = 3$ 的条件下，53 家重污染企业被分为 3 类，具体类别如表 12 所示。

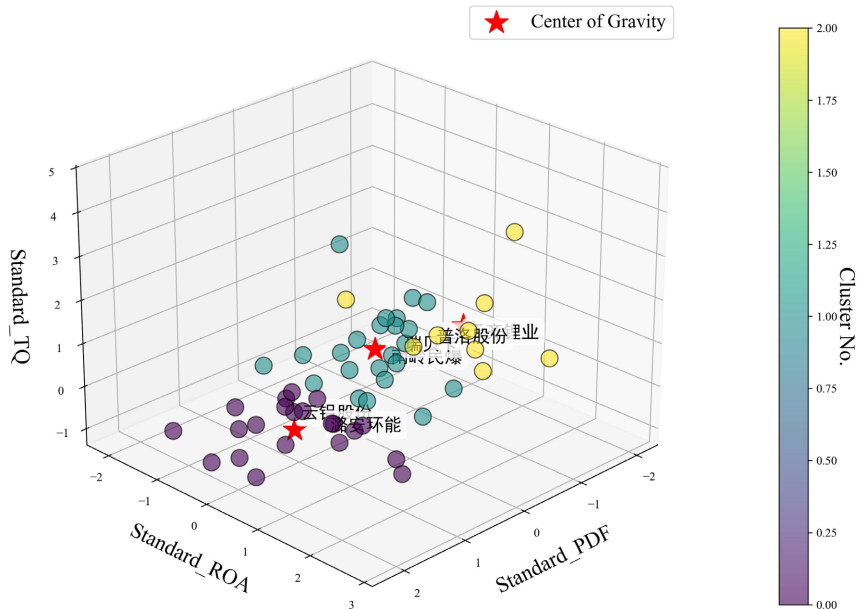
聚类分析将样本企业分为三类：21 家重经济型(如云铝股份、潞安环能)排污费用高但经济优势不显著，需通过清洁生产响应“双碳”政策；23 家重环保型(如南岭民爆、瑞贝卡)环保绩效突出却经济产出最低，亟需构建循环经济体系以平衡环境与经济目标；9 家经济-环保型(如普洛股份、天齐锂业)实现排污成本最低且经济产出最优，验证了环保与经济协同路径的有效性。研究表明，环保投入与经济效益存在非线性均衡关系，重污染企业应差异化制定发展策略：重经济型需强化减排技术应用，重环保型应延伸产业链提升附加值，协同型可输出经验引领行业转型。三类企业均需探索个性化可持续发展模式，推动环境绩效与财务绩效的长期共生。

5. 结论与建议

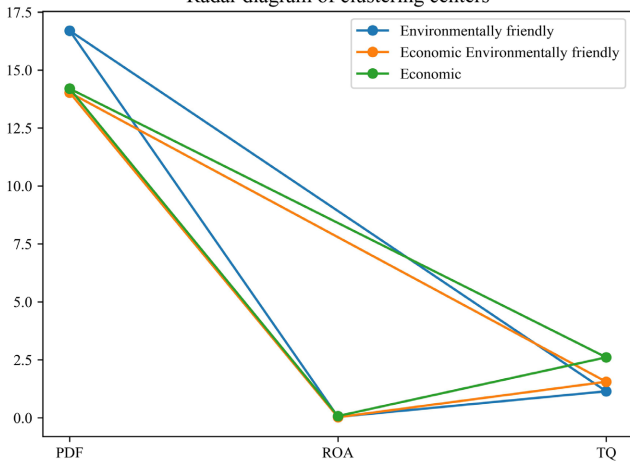
5.1. 结论

本文基于 2012~2024 年 53 家重污染企业面板数据，构建九变量体系，采用三阶段方法展开研究：

3D Clustering Visualization with Representative Labels (k=3)



Radar diagram of clustering centers



Comparison of cluster feature distribution

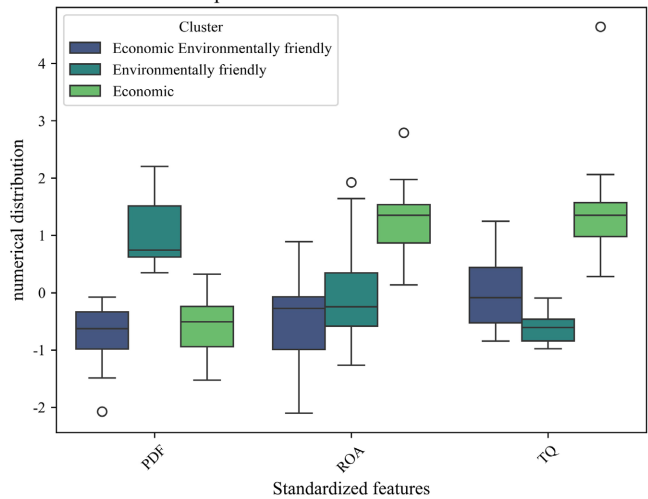


Figure 8. Clustering results

图 8. 聚类结果

Table 12. Category classification

表 12. 类别划分

类别	数量	PDF	ROA	TQ
重经济型	21	[0, 2]	[-2, 2]	[-1, 0]
重环保型	23	[-2, 0]	[-2, 1]	[-1, 1]
经济 - 环保型	9	[-2, 0]	[0, 2]	[0, 2]

首先通过 WOA-XGBoost 模型拟合环境与财务绩效的非线性关联，结合 SHAP 框架解析特征贡献度；其次构建 PVAR 模型检验双向滞后效应，利用格兰杰因果、脉冲响应及方差分解量化动态交互效应；最后

通过 K-Means 聚类将样本分为重经济型、重环保型与协同发展型三类，揭示异质性路径。核心结论证实二者存在 U 型动态关系，为差异化政策制定提供依据。

1) 环境绩效与财务绩效间不是线性关系，而是非线性的回归拟合关系

在 WOA-XGBoost 回归分析中，结果显示训练、测试集准确率均超 0.9，证实环境与财务绩效存在非线性关联，尤其是在使用 SHAP 模型进行结果解释后得到作为控制变量的企业规模对被解释变量的特征贡献值最大，其次是托宾 Q 值、资产回报率等核心驱动因素。

2) 环境绩效与财务绩效间为双向滞后响应关系，且呈现 U 型分布

在 PVAR 实证分析中，通过信息准则的方法选取了 PDF-ROA 的最优滞后阶数为 4，PDF-TQ 的最优滞后阶数为 1。同时在该滞后阶数的条件下，通过脉冲响应函数对动态变化路径进行可视化，得到 ROA → PDF、PDF → TQ 滞后响应均为 U 型分布关系，且方差分解得到在未来 30 期内环境绩效和财务绩效均会受到对方较大影响。

3) 现阶段，重污染企业追求单向发展(重经济发展或重环保发展)的数量远多于双向平衡发展(经济 - 环保发展)的企业数量

在 K-Means 无监督聚类中，通过肘部图法则对数据点进行更新迭代，得到三种聚类结果：重经济型、重环保型、经济 - 环保型，经济与环保双向平衡发展企业仅占总体企业数量的 16% 左右，但经济 - 环保型企业不论是财务绩效还是环境绩效均优于另外两种类型的重污染企业。

5.2. 建议

研究结果表明，财务绩效与环境绩效间存在显著的双向滞后响应关系，但绝大多数企业存在单一追求的发展方向，应平衡好经济与环保之间的协同关系，在碳减排目标框架下实现财务绩效与环境绩效的统筹协调发展[7]：

1) 分类引导，建立差异化转型路径

针对重经济型企业(39.6%)，以技术升级与规制引导推行清洁生产，利用财税优惠缩短环保投入的负向调整周期。对重环保型企业(43.4%)，则需延伸产业链、发展循环经济，通过绿色金融弥补短期收益缺口。而占 16% 的双效协同型企业，应树立标杆并借助专项补贴与市场优先权推广协同经验，引领整体转型。

2) 强化动态监测，优化 U 型响应机制

建议建立“环境 - 财务”双效动态评估平台，实时追踪排污费、ROA 及托宾 Q 值等关键指标，以精准识别 U 型拐点并预警滞后风险。针对双向 U 型滞后效应，应制定分阶段目标：初期利用财政补贴缓冲环保投入对利润的冲击，中期依托技术创新缩短负向周期，长期则以碳资产收益反哺财务绩效，最终形成“投入 - 收益”的良性闭环。

3) 完善政策工具箱，精准激励双效协同

在技术端设立“双碳”专项基金定向支持清洁技术研发；在市场端扩大碳市场覆盖范围，将托宾 Q 值纳入碳配额分配模型以激励绿色投资，并探索“排污权 - 股权”联动机制允许排污权质押融资。监管端则需实施“分级监管+动态奖惩”，对双效协同企业适当降低检查频次并给予绿色信贷利率优惠，以此精准引导企业行为。

4) 构建全链条循环体系，释放协同红利

应推行“产业园区 3.0”模式，强制要求园区内企业实现能源梯级利用与废弃物跨厂循环，并对跨企业循环项目给予用地指标倾斜。同时建立“环境绩效银行”，将减排量与资源回收率转化为可交易的“绿色积分”，允许企业以此抵扣环境税或兑换相应政策支持，从而激发企业绿色转型的内生动力。

参考文献

- [1] UNFCCC (2024) Report of the Conference of the Parties on Its Twenty-Eighth Session, Held in Dubai from 30 November to 13 December 2023. UNFCCC.
- [2] 陈煦江. 企业社会绩效与经济绩效相互关系的实证研究[J]. 软科学, 2010, 24(9): 100-106.
- [3] 李崇茂, 高迪, 聂锐, 等. 煤炭企业社会-环境绩效评价体系研究[J]. 中国煤炭, 2016, 42(9): 5-8+15.
- [4] 胡曲应. 上市公司环境绩效与财务绩效的相关性研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(6): 23-32.
- [5] 李维波, 高峰, 肖朋, 等. 基于 WOA-RF 算法的船舶柴发配电系统故障诊断[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(2): 77-88.
- [6] 吴桢楠, 王超, 朱兴一. 基于数据增强与机器学习的路面构造深度预测研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(4): 1088-1099.
- [7] 张倩, 陈婉莹, 耿建新. 重污染企业环境绩效与财务绩效关系研究——基于演化博弈的理论分析[J]. 财会通讯, 2022(20): 97-103.