

基于STLGBM的供应链韧性空间分异机制研究

闫梦铁

河北工业大学理学院, 天津

收稿日期: 2025年12月7日; 录用日期: 2025年12月28日; 发布日期: 2026年1月9日

摘要

本文以2001~2023年中国A股上市公司为研究样本, 基于供应链的“链式”特征, 采用熵权法对供应链韧性进行定量测度。进一步设计STLGBM模型, 通过留局部交叉验证策略优化模型超参数选择, 揭示供应链韧性在空间维度上的异质性特征, 使用局部重要性得分可视化空间分析中非平稳性的动态变化。研究发现: 模型比较表明STLGBM模型拟合程度较好。不同驱动因素共同塑造了供应链韧性的空间异质性格局: 东部地区受资产负债率和市场竞争主导, 中部以财务杠杆为核心驱动, 南部及东南沿海则主要由企业创新能力驱动。

关键词

供应链韧性, STLGBM, 空间异质性

A Study on the Spatial Differentiation Mechanism of Supply Chain Resilience Based on STLGBM

Mengtie Yan

School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin

Received: December 7, 2025; accepted: December 28, 2025; published: January 9, 2026

Abstract

This study uses Chinese A-share listed companies from 2001 to 2023 as the research sample. Based

on the “chain-like” characteristics of supply chains, the entropy weight method is employed to quantitatively measure supply chain resilience. A STLGBM model is further designed, and a leave-local cross-validation strategy is adopted to optimize hyperparameter selection, revealing the heterogeneous characteristics of supply chain resilience in the spatial dimension. Local importance scores are used to visualize the dynamic changes of non-stationarity in spatial analysis. The research findings indicate that model comparisons demonstrate the STLGBM model exhibits a good fit. Different driving factors collectively shape the spatially heterogeneous pattern of supply chain resilience: the eastern region is dominated by the asset-liability ratio and market competition, the central region is primarily driven by financial leverage, while the southern and southeastern coastal regions are mainly driven by corporate innovation capability.

Keywords

Supply Chain Resilience, STLGBM, Spatial Heterogeneity

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

1.1. 研究背景

在全球经济体系中，供应链的完整性与稳定性对各国经济发展至关重要。近年来，逆全球化趋势不断加深、单边主义与贸易保护主义抬头，以及地缘政治风险的加剧，全球供应链正经历从“效率优先”向“安全 - 效率”动态均衡的范式转型。在此背景下，供应链韧性已成为衡量国家经济抗风险能力的核心指标，其理论内涵从传统的弹性恢复能力扩展至包含预防性、适应性与创新性的多维复杂系统。

对于我国而言，提升供应链韧性水平既是加快现代产业体系构建、推动经济体系优化升级的重要抓手，也是我国在新发展格局下实现国际国内双循环相互促进发展的必然要求，更是应对国际环境复杂变化的重要战略举措。党的二十届三中全会《决定》进一步强调，健全提升产业链供应链韧性和安全水平制度，这既是对供应链韧性提升的明确要求，也是实现我国经济高质量发展的内在逻辑和关键所在。因此，识别供应链韧性提升的关键影响因素刻不容缓。

1.2. 研究现状

在供应链韧性影响机制的研究领域中，探究供应链韧性发展的内里成因尤为重要。当前，学术界对于供应链韧性影响因素的分析，部分仍局限于定性分析的层面。白新华和李国英(2023) [1]认为数字经济和实体经济深度融合可以推动供应链韧性的提高。与此同时，在定量研究的范畴中，有学者聚焦于探讨促进供应链韧性提升的具体影响因素。Grossman 等(2021) [2]指出供应关系多元化能够提高供应链韧性。陶锋等(2023) [3]研究发现下游企业数字化转型主要通过优化供需匹配、稳定供需关系、提高供应商创新能力三个层面增强产业链供应链韧性。此外，亦有学者致力于探究引发供应链韧性减弱现象的根本原因。Bonadio 等(2021) [4]发现，供应链全球化能够减少冲击对供应链的不利影响。以上研究从不同的角度揭示了影响供应链韧性的关键因素，为后续其他学者的研究带来了启发。

尽管学界已形成探究供应链韧性影响因素的基础框架，但现有研究存在显著局限：其一，测度角度

局限于企业微观层面，没有真正考虑到供应链中企业之间存在上下游关系，忽略了供应链中“链”的实际情况；其二，在影响因素建模方面，传统线性回归模型(如 OLS)囿于其参数假设的局限性，难以有效刻画面板数据中普遍存在的非线性关系，更无法解析多个影响因素的交互作用，导致关键变量间因果机制的“黑箱”问题持续存在；其三，现有方法体系普遍忽视供应链韧性存在的空间异质性，难以揭示供应链韧性的空间分异规律与动态演化机制。

1.3. 研究内容

基于上述理论缺口与现实需求，本研究构建以下研究框架：

- 1) 本文以 2001~2023 年 A 股上市公司作为观测对象，立足于供应链的“链式”本质特征，综合上下游企业的实际运营状况，采用熵权法对供应链韧性进行定量测度。
- 2) 本研究旨在揭示不同特征变量对供应链韧性空间分异的影响机制。首先，通过构建地理加权回归(GWR)模型，参考 Yun Luo 和 Shiliang Su (2025) [5] 的研究构建时空轻量级梯度提升机(STLGBM)模型，对比两者在时空数据建模中的拟合性能。其中，STLGBM 模型基于梯度提升决策树(GBDT)的集成学习框架，并利用留局部交叉验证(LLOCV)策略进行超参数优化，以增强其在时空维度上的泛化能力。随后，通过对最佳模型施以局部重要性得分量化，评估各空间单元内部变量贡献的异质性强度。
- 3) 基于以上研究，本文提出了一系列针对性的政策建议，以期推动我国供应链高质量发展，为我国供应链韧性提升提供有力支持。

2. 研究方法与数据说明

2.1. 数据预处理

本研究以 2001~2023 年中国 A 股上市公司为研究样本，基于上市公司年报披露的前五大供应商采购信息及前五大客户销售信息，构建了“供应链上游企业 - 供应链下游企业 - 年份”三维面板数据集。在样本筛选过程中，本研究依次剔除了以下观测值：1) 非上市公司；2) 金融行业企业；3) 被标记为 ST 或*ST 的特殊处理公司；4) 关键变量存在缺失值的样本。经过上述筛选程序，最终获得 3845 个有效的公司 - 年度观测值。

2.2. 数据来源

本研究的数据来源包括：1) 公司层面数据主要取自 CSMAR 数据库，对于数据库缺失的数据，采用年报手工查阅与插值法相结合的方式进行补充；2) 省级层面数据来源于《中国统计年鉴》、各省(直辖市、自治区)统计年鉴及国家统计局官方网站。为控制极端值对估计结果的影响，我们对所有连续变量实施了上下 1% 分位的缩尾处理。此外，考虑到变量量纲差异问题，研究中对连续变量进行了归一化处理。

3. 供应链韧性测度

供应链韧性是企业在面对外部风险时所展现出的抵御、调整与恢复能力，以及它们有效利用内外部资源实现重组、转型与升级的能力。本文结合现有研究及供应链韧性的内涵，从供应链整体视角出发，构建了一套能够全面衡量我国供应链韧性的指标体系。本文从风险缓释力、适度控制力、核心竞争力、弹性重构力四个维度对供应链韧性进行综合衡量。

鉴于此，本文将供应链上游企业与下游企业各自主营业务收入占它们主营业务收入之和的比例对选取的指标进行加权来表征供应链韧性，使用熵权法计算综合得分，具体指标和权重如表 1：

Table 1. Supply chain resilience indicator construction system**表 1. 供应链韧性指标构建体系**

一级指标	二级指标	指标说明	指标属性	权重
风险缓释力	供应链资金营运质量	经营活动产生的现金流量净额与净利润的比值	正向	
	供应链产权比率	负债总额与所有者权益总额的比值	负向	
	供应链应收账款与收入比	应收账款与营业收入的比值	负向	0.19257028
适度控制力	供应链偿债能力	经营活动产生的现金流量净额与流动负债之比	正向	
	供应链库存调整额度	本年度存货净额与上年度存货净额之差的绝对值	负向	
	供应链沉淀性冗余资源	管理费用与营业收入的比例	负向	0.11061183
核心竞争力	供应链成本利润率	利润总额比营业成本	正向	
	供应链创利水平	企业一定时期内利润总额与职工总人数之间的比值	正向	
	供应链产品竞争力	销售收入增长率	正向	0.57297445
弹性重构力	供应链研发费用率	研发费用与营业收入之比	正向	
	供应链长鞭效应	上游企业生产量的标准差与需求量的标准差之比除以下游企业生产量的标准差与需求量的标准差之比	负向	
	供应链净资产收益率	净利润与股东权益平均余额的比值	正向	0.12384344
	供应链每股收益	净利润与总股数之比	正向	

4. 供应链韧性关键因素识别

本文选取了 34 个可能影响供应链韧性的特征变量，在变量处理过程中，遵循以下原则：对于表征规模与资源总量的特征指标(包括 TPA、GVA-PS、GVA-TS)，采用供应链上下游企业对应指标直接加和的方式进行测度，以反映影响供应链的整体规模效应；针对反映效率差异的相对比率变量(含 HHIA、BTM、DAR、TFL、PER、IA 和 GDP pc)，则采用以各节点企业在供应链中的主营业务收入占比为权重的加权平均法进行整合处理，更准确地揭示供应链内部结构的异质特征。

加权 LightGBM-RFE 模型首先基于 LightGBM 训练模型，利用决策树节点的分裂增益生成加权特征重要性评分，量化各特征对预测精度的贡献权重；随后通过递归特征消除(RFE)方法进行动态特征筛选，通过多轮模型训练，逐步剔除对预测性能贡献较小的特征，直至保留预设数量的特征；最后，结合 LightGBM 的初始权重筛选与 RFE 的递归优化形成双重验证机制，从中筛选出 10 个对供应链韧性影响较大的特征变量，变量名称及含义如表 2 所示：

Table 2. Relevant characteristic variables and their specific meanings**表 2. 相关特征变量及具体含义**

变量名称	变量符号	具体含义
供应链韧性	EWM	具体测度见第三章。
市场竞争	HHIA	$HHIA = \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i}{X} \right)^2$ 。其中， X_i 为单个公司的主营业务收入， X 为该公司所属行业的主营业务收入合计。
账面市值比	BTM	企业所有者权益总额与公司市值之比。
资产负债率	DAR	企业负债总计与企业资产总计之比。

续表

财务杠杆	TFL	(净利润 + 所得税费用 + 财务费用)/(净利润 + 所得税费用)
市盈率	PER	今收盘价当期值/(净利润本年年报值/实收资本本期期末值)
专利申请量	TPA	上市公司申请专利总数。
信息不对称程度	IA	参考于蔚等(2012) [6]的做法。
人均国内生产总值	GDP pc	公司所在省份的人均国内生产总值。
第一产业增加值	GVA-PS	公司所在省份的第一产业增加值。
第三产业增加值	GVA-TS	公司所在省份的第三产业增加值。

5. 供应链韧性空间分析

5.1. GWR 和 STLGBM 拟合优劣对比

在供应链韧性的研究中，上下游企业具有不同的区位分布，往往伴随着区域政策与经济制度环境的异质性特征，这种空间分异对供应链韧性形成机制具有显著影响。为深入解析地理空间维度在供应链韧性特征变量影响路径中的非线性效应与空间非平稳性，本研究首先构建 GWR，通过空间变化系数方法捕捉解释变量影响强度的区域异质性；其次设计 STLGBM，整合空间邻接矩阵与时间滞后效应，解析多尺度时空交互特征。在训练 STLGBM 的过程中，在梯度提升决策树架构下，设定 50 次迭代的弱学习器集成规模，通过 CUDA 并行计算实现 GPU 加速。实证结果如图 1，GWR 模型拟合优度($R^2 = 0.488$)与 STLGBM 模型的解释力($R^2 = 0.619$)存在显著差异，表明传统空间回归方法在刻画供应链韧性的时空机制时存在局限性，而融合机器学习算法的 STLGBM 模型通过挖掘非线性关系，有效提高了对复杂空间依赖结构与时空异质特征的建模精度。

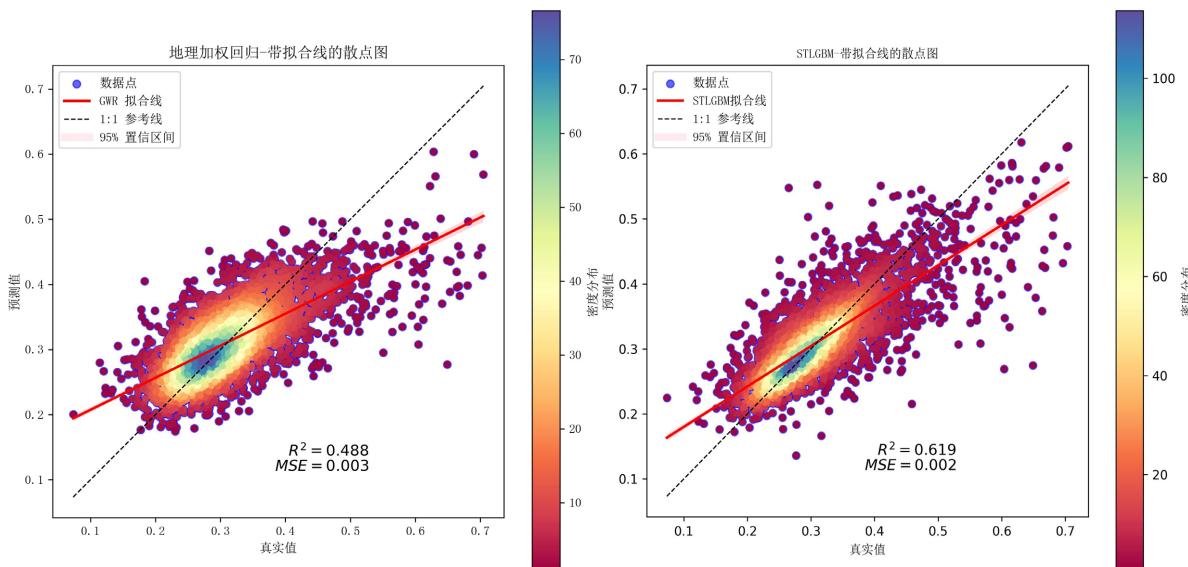


Figure 1. Goodness of fit for GWR and STLGBM

图 1. GWR 和 STLGBM 的拟合程度

5.2. 关键变量的全局重要性与空间异质性驱动效应

STLGBM 模型的全局特征重要性分析结果(图 2)说明供应链韧性形成机制存在显著的空间分异性特

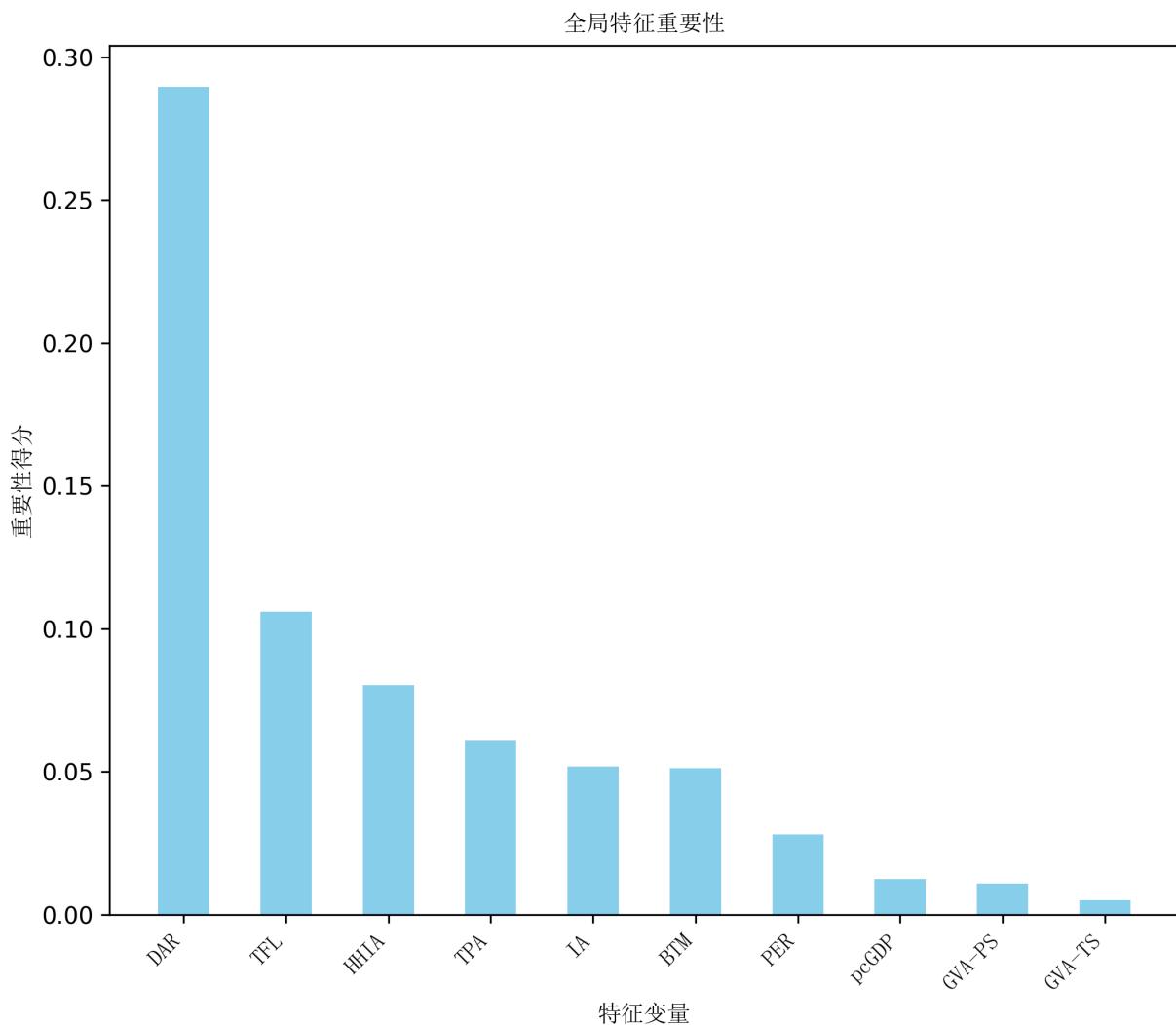


Figure 2. Global importance of feature variables in STLGBM
图 2. STLGBM 特征变量全局重要性

征。通过可视化方法对特征变量重要性排序的解析表明，DAR (0.29)、TFL (0.11)、HHIA (0.08) 及 TPA (0.06) 等变量对区域间供应链韧性差异具有关键解释力。这说明资本结构管理、市场调节机制以及创新要素配置等核心要素对供应链韧性形成的影响存在显著的空间异质性。

在此基础上，为进一步解析关键特征的空间异质性特征，研究基于全局重要性评分筛选出前四大关键变量，并对其局部空间贡献度进行了地理可视化分析(见图 3)。结果表明，从整体来看，DAR、TFL、HHIA、TPA 对供应链韧性的影响程度逐步减弱，与特征重要性排序高度吻合。从地理位置上来看，DAR 对供应链韧性的影响程度呈“东部沿海地区 > 中部地区 > 西北地区”的三级梯度格局；TFL 对供应链韧性的影响贡献度峰值出现在我国中部地区，西北地区及东北地区次之，东部地区的影响最低；HHIA 在东部地区、东北地区和中部地区对供应链韧性的影响较大，西部地区则较为薄弱；TPA 对供应链韧性的影响程度在南部地区及东南沿海地区较为显著，其他地区的影响较小。

上述空间异质性特征可能源于我国区域经济发展水平、产业结构特征及政策导向的非均衡性。具体而言，1) 东部沿海地区高度发达的资本市场与密集型产业形态，强化了资产负债率对供应链资金流稳定性的调控效能；2) 中部地区产业转型升级进程中，企业通过优化财务杠杆实现资本结构动态调整，形成

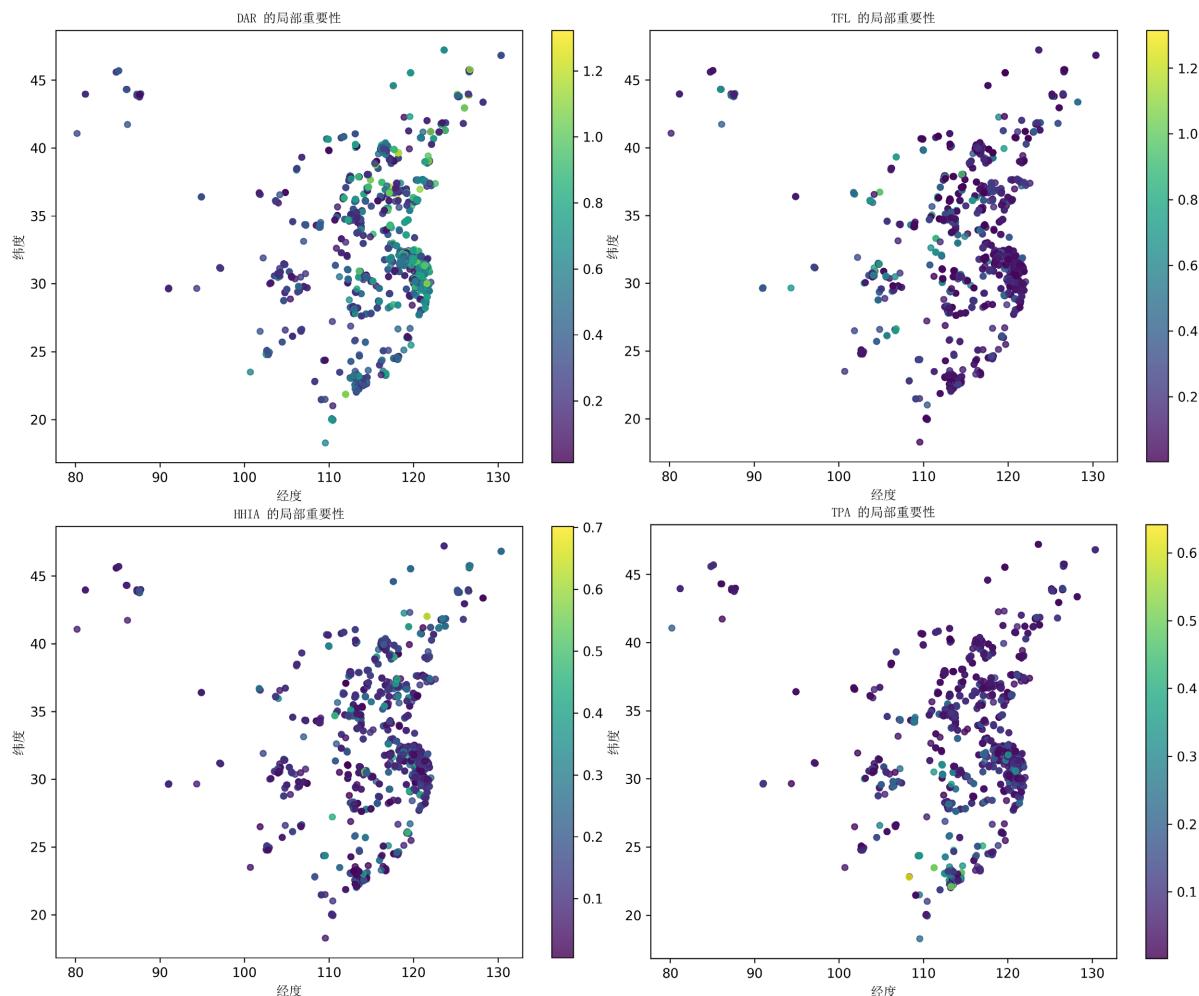


Figure 3. Local importance of the top four feature variables in terms of global importance in the spatial dimension
图 3. 在空间维度上，全局重要性排名前四特征变量的局部重要性

区域性贡献极值；3) 东部及东北部成熟的产业集聚生态，驱动市场竞争机制通过供应链协同效率提升增强系统韧性；4) 粤港澳大湾区与长三角等国家战略创新枢纽的区位优势，其创新要素集聚强化了专利申请对供应链韧性的赋能效应。这种空间分异规律本质上映射出区域经济结构、要素禀赋与制度环境对供应链韧性形成机制的差异化作用。

6. 研究结论与政策建议

6.1. 研究结论

第一，识别供应链韧性的重要驱动因子。首先，基于加权 LightGBM-RFE 混合算法识别出 10 个对供应链韧性有显著影响的特征变量。其次，在模型拟合效果方面，识别出 LightGBM 模型为最优模型。最后，资产负债率、财务杠杆、市场竞争和企业专利申请在最优模型中对供应链韧性影响的贡献最大。

第二，不同驱动因素共同塑造了供应链韧性的空间异质性格局。相较于 GWR 模型，STLGBM 的拟合效果更好，证实其超越传统回归的建模优势。考虑空间异质性的情况下，资产负债率、财务杠杆、市场竞争和企业专利申请对区域间供应链韧性差异仍具有关键解释力。具体表现为：资产负债率对供应链韧性的影响程度呈现“东部沿海地区 > 中部地区 > 西北地区”的三级梯度格局；财务杠杆对供应链韧

性的影响在中部地区达到峰值，西北和东北地区次之，而东部地区的影响程度最低；市场竞争对供应链韧性的影响在东部、东北和中部地区影响较高，西部地区较低；企业专利申请对供应链韧性的影响在南部及东南沿海地区较高，其他地区较低。

6.2. 政策建议

一、差异化金融支持与风险管理机制建构

针对区域金融深化程度与产业集聚阶段异质性，需实施分类信贷资源配置策略：在金融市场化程度较高的东部沿海经济带，可适度放宽企业债务阈值管理，引导多元资本工具应用以优化融资结构，同步建立债务风险预警系统；针对中部产业转型区，重点构建面向成长型中小企业的政策性优惠融资工具组合，完善信用增进体系；对于西部欠发达区域，着力拓展非传统融资渠道网络，配套财政金融协同政策，以缓解负债压力对产业链稳定性的负外部效应。

二、多层次产业集群协同治理框架设计

需构建竞争协作动态均衡的区域产业生态：在产业成熟度较高的东部地区，通过反不当竞争规制维护适度竞争强度，激励企业构建弹性供应网络；在西部新兴产业展区，重点培育专业化产业集群载体，提升本地化配套率以增强抗波动能力；针对跨区域产业链协同体，应建立涵盖多行政层级的制度协调框架与信息互联机制，推进技术标准互认，降低制度性交易成本对创新扩散的阻滞效应。

三、创新要素时空协同机制优化

完善创新激励政策的区域适配性：面向中西部技术追赶区域，强化研发投入补贴，重点突破关键共性技术瓶颈；在东部创新策源地与跨区域创新联合体，建立产业链协同研发基金，聚焦“卡脖子”技术联合攻关；构建全域性技术转移服务网络，通过需求供给精准匹配形成动态协同的创新资源配置格局。

参考文献

- [1] 白新华, 李国英. 以数实融合提升产业链供应链韧性的现实思考[J]. 区域经济评论, 2023(6): 63-68.
- [2] Grossman, G.M., Helpman, E. and Lhuillier, H. (2023) Supply Chain Resilience: Should Policy Promote International Diversification or Reshoring? *Journal of Political Economy*, **131**, 3462-3496. <https://doi.org/10.1086/725173>
- [3] 陶锋, 王欣然, 徐扬, 等. 数字化转型、产业链供应链韧性与企业生产率[J]. 中国工业经济, 2023(5): 118-136.
- [4] Bonadio, B., Huo, Z., Levchenko, A.A. and Pandalai-Nayar, N. (2021) Global Supply Chains in the Pandemic. *Journal of International Economics*, **133**, Article ID: 103534. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2021.103534>
- [5] Luo, Y. and Su, S. (2025) Spatiotemporal Random Forest and Spatiotemporal Stacking Tree: A Novel Spatially Explicit Ensemble Learning Approach to Modeling Non-Linearity in Spatiotemporal Non-Stationarity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **136**, Article ID: 104315. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104315>
- [6] 于蔚, 汪淼军, 金祥荣. 政治关联和融资约束: 信息效应与资源效应[J]. 经济研究, 2012, 47(9): 125-139.