

# LARG 框架下成渝能源供应链韧性与绿色转型协同优化路径研究

唐宇

西南交通大学希望学院

**摘要：**破解成渝地区能源供应链在绿色转型中面临的多风险耦合难题，需突破韧性与绿色目标的传统权衡。本研究基于LARG（精益、敏捷、韧性、绿色）框架，以成渝地区汽车制造业为研究对象，构建“风险识别—模型构建—策略优化”研究体系，运用空间杜宾模型和门槛回归模型，分析2013—2022年27个地级市及94家供应链企业面板数据，探究多风险耦合对供应链网络稳定性的影响机制及绿色转型与韧性提升的协同路径。结果表明：成渝地区能源供应链韧性呈显著空间集聚特征，风险可通过区域网络梯度传导；清洁能源占比提升和碳强度下降对韧性具有正向促进作用；多源采购与数字化投入是提升韧性的关键策略，且绿色技术投入存在1.2%的门槛效应，跨越后方可实现协同增效。研究为成渝地区构建“安全—绿色—高效”协同的能源供应链体系提供量化依据与决策参考。

**关键词：**能源供应链韧性；LARG框架；多目标协同；成渝地区

成渝地区作为全国重要的能源生产与消费基地，根据《重庆统计年鉴》以及《四川统计年鉴》公布的数据，近年来成渝地区年能源消费总量达3.2亿吨标准煤，其中化石能源占比超75%，绿色转型压力显著。同时，该区域地处地震带叠加能源价格波动（2020—2022年煤炭价格波动率达48%）、供应链断链等风险，能源供应链韧性面临严峻挑战。《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》明确提出“构建绿色低碳、安全高效的能源体系”，但现有研究多孤立探讨绿色转型或韧性提升，缺乏二者协同的量化分析，难以满足区域能源安全与“双碳”目标的双重需求。在此背景下，通过LARG框架下能源供应链韧性与绿色转型协同优化路径研究，可系统整合精益调度、敏捷交易、韧性冗余与绿色减排四维目标，突破成渝地区能源安全与“双碳”目标之间的权衡困境，为西部能源枢纽构建可持续、抗冲击的一体化决策新范式。

## 1 文献综述

### 1.1 供应链韧性研究

供应链韧性研究的核心，是回答“复杂网络如何在不确定环境中保持功能”这一命题。自2004年Christopher与Peck首次提出“韧性供应链”概念以来，学界经历了从“个体抗冲击”到“网络协同恢复”的视角迁移。早期文献将韧性等同于稳健性，强调节点企业的冗余与缓冲随后更多研究者等提出“感知—响应—恢复”三阶段框架（罗翔等，2024），把预测与适应性纳入韧性内涵近年研究则进一步区分“个体

韧性”与“关联韧性”，指出冲击不仅取决于企业自身抗风险能力，还通过生产网络向上、下游传导，因此网络结构、空间布局与链主企业角色成为决定系统韧性的关键。

### 1.2 供应链韧性研究

供应链韧性的概念是在20世纪90年代由美国密歇根州立大学制造研究协会（MRC）在“环境责任制造（ERM）”项目中正式提出“绿色供应链”概念，将其界定为“将环境维度系统嵌入传统供应链战略、运营与绩效评价的全过程管理范式”随后二十年，研究经历了“概念—测度—治理”三阶段演进，聚焦绿色设计、清洁生产、回收再制造等单一环节，强调末端治理。在“双碳”目标与ESG投资驱动下，研究视角由企业内部转向“政府—供应链—资本市场”多层治理，关注碳定价、绿色补贴、绿色金融等制度工具对供应链绿色转型的激励效应。

### 1.3 LARG框架应用研究

LARG（Lean-Agile-Resilient-Green）框架自2011年被提出以来，迅速成为整合精益、敏捷、韧性与绿色四大供应链范式的“元框架”（Khazadi et al., 2024）。近期中国情境研究进一步将LARG与供应链金融结合，发现金融工具通过“精益管理、敏捷响应、弹性提升”三重路径强化企业韧性，但仅当金融安排以“供应链导向”而非“金融套利导向”时才能释放LARG红利（赵军等，2021）。未来研究正从“是否兼容”转向“如何协同”，为了达到此目标则应当从动态能力视

基金项目：绿色转型视角下成渝地区能源供应链韧性提升路径研究——基于LARG框架的多目标协同决策项目编号：DYCY2508。

角,探讨数字化如何降低多目标冲突的治理成本为第一维度;导正制度视角,检验碳市场、ESG 评级等外部制度对 LARG 各维度权重的重塑效应为第二维度;绿色及韧性融合视角,将气候风险与地缘政治冲击纳入 LARG 仿真模型,实现“效率-韧性-可持续”三元平衡为第三维度。

## 2 研究设计

### 2.1 研究意义

成渝地区作为西部陆海新通道与西电东送的核心交汇点,其能源供应链是国家安全缓冲与绿色示范的关键支点。传统研究常将韧性与绿色视为权衡,但现实证明:缺少绿色约束的冗余投资会转化为高碳锁定,缺少韧性考量的绿色技术则会在极端事件中失灵。本研究聚焦成渝汽车制造业在多风险耦合环境下,如何实现可持续发展目标与韧性目标的协同平衡,将精益、敏捷、韧性、绿色四维纳入统一框架,旨在论证成渝可在同一通道上同步实现风险消散与碳排消散,为全国城市群提供可复制的协同范式。

### 2.2 研究路线

本研究遵循“理论构建—数据采集—模型实证—策略优化”主线:

理论框架:基于 LARG 框架,构建“多风险耦合—策略组合—协同输出”理论链条。

数据采集:构建“市域—企业—产线”三级数据池,采集 27 个地级市能源消费、碳排放及自然灾害数据,以及 16 家整车厂与 78 家供应商的采购、运输、ESG 等微观数据,运用熵值法压缩为“能源—碳排—风险”三维权重。

模型构建:先以 Moran's I 检验空间集聚;再采用空间杜宾模型估计风险因子的直接与溢出效应;最后运用门槛回归捕捉非线性跃迁,验证 LARG 协同的阶段特征。

策略提出:沿 LARG 四维提炼策略包,从精益库存、敏捷响应、韧性冗余、绿色采购四视角优化,形成可嵌入成渝汽车供应链的协同方案。

### 2.3 研究方法

#### 2.3.1 空间自相关分析 (Moran's I 指数)

为判断成渝地区能源供应链韧性是否存在空间集聚,首先采用全局 Moran's I 指数进行检验。公式如下:

$$Moran's\ I = \frac{n \sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_i \sum_j w_{ij}) \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

其中  $n=27$  (成渝地级市数量),  $x_i$  为城市  $i$  的韧性指数,  $w_{ij}$  为邻接空间权重 (相邻城市  $w_{ij}=1$ , 否则为

0,行标准化后每行和为 1)。若 Moran's I 显著为正,表明高韧性城市与高韧性城市相邻,存在空间集聚,可继续采用空间计量模型。

#### 2.3.2 空间杜宾模型 (SDM)

考虑到能源供应链跨区域联动,构建双向固定效应 SDM 以分解直接效应与空间溢出效应,说明公式如下:

$$Y_{it} = \rho WY_{it} + \beta X_{it} + \theta WX_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$

$Y_{it}$ : 城市  $i$  第  $t$  年能源供应链韧性指数 (抗干扰-恢复-适应三维熵权合成)

$X_{it}$ : 风险因子 (自然灾害频次、能源价格波动率)、绿色转型 (清洁能源占比、碳排放强度)、LARG 协同 (多源采购率、数字化投入强度) 6 维列向量

$W$ : 同邻接权重,  $WY_{it}$  与  $WX_{it}$  分别为被解释变量与解释变量的空间滞后项

$\rho$ : 空间自回归系数;  $\beta$ : 直接效应系数;  $\theta$ : 间接效应 (溢出) 系数

$\mu_i, \lambda_t$ : 个体与时间双固定效应;  $\varepsilon_{it}$ : 随机误差项,聚类稳健标准误

#### 2.3.3 门槛回归模型

以绿色技术投入强度  $q_{it}$  为门槛变量,检验其对韧性影响的非线性跃迁,其公式如下:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 X_{it} I(q_{it} \leq \gamma) + \alpha_2 X_{it} I(q_{it} > \gamma) + \delta Z_{it} + \mu_i + \varepsilon_{it}$$

其中  $I(\cdot)$  为指示函数,  $\gamma$  为待估门槛值;  $Z_{it}$  控制 GDP 增速、产业结构与交通密度。采用自助法 (bootstrap=300 次) 估计  $\gamma$  及其 95% 置信区间,若  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  显著差异,表明存在临界值,验证 LARG 协同的阶段特征。

### 2.4 研究数据来源

本研究构建“市域—企业—产线”三级数据库。宏观层面,能源消费、碳排放等数据取自《中国能源统计年鉴》及川渝两地统计年鉴,自然灾害记录源于中国地震台网中心及国家气候中心。绿色转型指标中,清洁能源占比依据各地统计公报水电、风电、光伏发电量测算,碳排放强度采用 IPCC 部门法向下分配获得。LARG 协同变量方面,多源采购率与数字化投入强度源自《中国工业企业数据库》中成渝地区 300 余家汽车制造企业年报,抓取“前五名供应商采购额占比”与“信息化支出”字段,并辅以经信委两化融合评估报告交叉验证。控制变量 GDP 增速、产业结构等均来自《中国城市统计年鉴》。

## 3 实证分析

### 3.1 描述性统计

基于 2013—2022 年成渝地区 27 个地级市面板数据分析,供应链韧性指数均值为 0.42,极差达 0.74,表明区域内韧性水平差异显著。自然灾害年均频次 4.82 次,

能源价格波动率最高达 48.52%，反映出区域面临的多风险冲击特征。清洁能源占比均值仅 31.25%，绿色转型空间较大；多源采购率与数字化投入强度均值分别为 45.82% 和 2.15%，LARG 协同策略尚未充分发挥作用。

### 3.2 空间自相关检验

Moran's I 指数显示，2013—2022 年间指数由 0.215 上升至 0.357，均显著为正，表明能源供应链韧性存在显著空间正相关性，高韧性城市与周边形成“核心—外围”联动格局，集聚趋势持续增强。

### 3.3 空间杜宾模型回归结果

空间杜宾模型结果表明，自然灾害频次与能源价格波动率的直接效应分别为 -0.192 和 -0.131，且间接效应显著为负，说明风险可向邻近城市传导。清洁能源占比每提升 1%，韧性指数上升 0.268；碳排放强度每降低 1 吨/万元，韧性指数提升 0.165。多源采购率与数字化投入强度的直接效应达 0.328 和 0.305，是提升韧性的关键策略。

### 3.4 门槛回归模型结果

绿色技术投入存在单一门槛值 1.2%。低于阈值时，对韧性提升系数为 0.185；跨越门槛后跃升至 0.392，表明绿色技术投入需达临界值才能实现从“单一环节优化”向“全链条协同增效”的质变。

## 4 研究结论

本文基于 LARG 框架的实证研究发现：第一，成渝地区能源供应链韧性存在显著空间溢出效应，自然灾害与市场波动风险可通过区域网络梯度传导。第二，绿色转型与韧性提升具有协同潜力，清洁能源占比提升和碳强度下降均可增强系统弹性。第三，LARG

四维策略存在阶段性跃迁特征，绿色技术投入需跨越 1.2% 的门槛值，方能实现从单一环节优化向全链条协同增效的质变。

### 参考文献：

- [1] 罗翔, 李政. 供应链金融、供应链可持续性与企业韧性 [J]. 金融与经济, 2024(12):24-36
- [2] Khanzadi, F., Radfar, R., & Pilevari, N. (2024). A review of lean, agile, resilient, and green (LARG) supply chain management in engineering, business and management areas. *Decision Science Letters*, 13(2), 287 - 306.
- [3] 赵军, 睦世荣. (2021). 信息技术对 LARG 框架下可持续供应链实践的影响: 研究述评与展望. *供应链管理*, 2(10), 16-40.
- [4] 王海成, 王春宇. (2023). 促进成渝地区双城经济圈产业链供应链安全稳定发展的对策建议. *中国经贸导刊* (6), 37-39.
- [5] Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokoh, E.. (2017). Supply chain network design under uncertainty: a comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*.
- [6] 樊雪梅, 卢梦媛. 新冠疫情下汽车企业供应链韧性影响因素及评价 [J]. *工业技术经济*, 2020, 39(10):21-28.
- [7] 盛昭瀚, 王海燕, 胡志华. 供应链韧性: 适应复杂性——基于复杂系统管理视角 [J]. *中国管理科学*, 2022, 30(11):1-7.
- [8] 李文川, 李卓娅, 黄影. 基于复杂网络的闭环供应链风险传播模型构建及仿真 [J]. *物流技术*, 2023, 42(03): 78-85.