

智慧交通基础设施对电商物流效率的赋能机理

孙明剑, 蒋盛川*, 周锦波

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2026年7月3日; 录用日期: 2026年7月17日; 发布日期: 2026年8月25日

摘要

随着电子商务的迅猛发展, 即时物流与末端配送面临着时效性要求苛刻、城市路网拥堵等瓶颈约束。传统交通基础设施已难以满足现代电商物流低成本、高可靠的运转需求。为破解这一难题, 本文聚焦于智慧交通基础设施, 深入探讨其对电商物流效率的系统性赋能机理。本文打破传统“要素驱动”的单一视角, 构建了包含“数字化基座-智能决策-功能表现-业务价值”四层递进的协同赋能理论框架。研究结合区域宏观面板数据, 采用耦合协调度模型对该赋能机理进行了定量测度与检验。实证结果表明, 智慧交通基础设施的完善与配送车辆在交叉口等关键节点的延误率降低、配送准点率提升以及综合物流能耗成本的下降呈现出显著的正向相关关系。本研究不仅理清了交通技术变革对现代物流效率提升的传导路径, 也为未来“空地协同”及低空经济背景下的智慧物流网络规划与交通管理提供了理论支撑与决策参考。

关键词

智慧交通, 电子商务, 物流效率, 赋能机理, 路权分配, 时空优化

The Enabling Mechanism of Smart Transportation Infrastructure on E-Commerce Logistics Efficiency

Mingjian Sun, Shengchuan Jiang*, Jinbo Zhou

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: July 3, 2026; accepted: July 17, 2026; published: August 25, 2026

Abstract

With the rapid development of e-commerce, on-demand logistics and last-mile delivery face bottleneck

*通讯作者。

文章引用: 孙明剑, 蒋盛川, 周锦波. 智慧交通基础设施对电商物流效率的赋能机理[J]. 电子商务评论, 2026, 15(8): 906-913. DOI: 10.12677/ecl.2026.158951

constraints such as stringent timeliness requirements and urban road congestion. Traditional transportation infrastructure struggles to meet the modern operational demands of low costs and high reliability. To address these challenges, this paper focuses on smart transportation infrastructure and investigates its systematic enabling mechanism on e-commerce logistics efficiency. Breaking away from the traditional factor-driven perspective, a four-tier progressive framework consisting of digital foundation, intelligent decision-making, functional performance, and business value is constructed. Using regional macro-level panel data, this study applies a coupling coordination degree model to quantitatively assess and empirically examine the mechanism through which smart transportation infrastructure enables the development of the logistics system. Empirical results indicate a significant positive correlation between the advancement of smart transportation infrastructure and reduced delay rates at critical nodes, enhanced delivery punctuality, and lowered overall logistics energy costs. This research clarifies the transmission pathways of transportation technology transformations in enhancing logistics efficiency and provides theoretical support and decision-making references for smart logistics network planning in the future context of air-ground coordination and the low-altitude economy.

Keywords

Smart Transportation, E-Commerce, Logistics Efficiency, Enabling Mechanism, Right-of-Way Allocation, Spatio-Temporal Optimization

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

随着数字经济的深化，电子商务带动的即时物流与末端配送需求呈爆发式增长。然而，海量的高频配送订单与城市有限的道路空间产生了剧烈摩擦，传统交通基础设施受限于物理扩容瓶颈，已难以满足现代物流“高可靠、高时效”的运转需求。在此背景下，以物联网、5G及车路协同为底座的智慧交通基础设施(Smart Transportation Infrastructure, STI)应运而生。其通过数字感知与动态路权分配，为打破物流时空约束、降低综合延误成本提供了全新的破局思路。

探究交通基建与物流产业的交互关系是近年来的研究热点。在交通方面，熊首成[1]等学者的研究指出，通过信息通信技术获取路况参数，配合交通信号控制等系统的应用，为实现智能化交通管理提供了重要支撑。在电子商务与物流协同方面，已有核心期刊研究从供应链数字化、平台协同、配送时窗扰动和物流服务模式等角度展开：孙涛等[2]较早讨论了电子化供应链管理的实施方法，强调信息系统集成对供应链协同的支撑作用；石岩然等[3]在《中国管理科学》中分析了供应链服务平台介入下多物流服务提供商的合作模式，指出合理平台服务机制能够提升市场需求和整体利润；丁秋雷[4]构建了客户时间窗变化条件下的物流配送干扰管理模型，为即时配送场景中的时空重调度提供了方法借鉴；覃雪莲和刘志学[5]进一步研究了供应商竞争背景下电商供应链物流服务模式选择，表明物流服务质量与成本绩效会影响平台和供应商的最优策略。总体来看，现有研究为电子商务物流效率提升、物流服务协同和交通信息化治理奠定了基础，但多将“交通”与“物流”视为相对独立系统进行单向分析，较少在统一宏观框架下刻画二者的协同演化机理。

本文以区域宏观面板数据为实证对象，从宏观时空演化视角，对智慧交通基础设施对电商物流效率

的赋能效应进行定量测度。本文构建了两大系统的评价指标体系,利用熵值法客观赋权,并引入耦合协调度模型揭示其协同发展的时序特征与空间格局。研究旨在理清交通技术变革对物流效率提振的传导路径,为区域智慧交通资源的精准配置及未来“空地协同”智慧物流网络的规划提供科学的数据支撑。

2. 智慧交通基础设施对电商物流的赋能机理

智慧交通基础设施(STI)对电商物流的赋能并非单一硬件的线性叠加,而是物理空间与数字空间的多维系统性重塑。本文打破传统要素驱动的视角,构建了“数字化基座-智能决策-功能表现-业务价值”四层递进的协同赋能理论框架,如图1所示。

首先,在数字化基座层,通过大规模部署路侧单元(RSU)、5G基站与智能感知设备,传统的物理交通网络被转化为高精度的数字孪生空间,为物流要素的全局可见性提供了数据底座。其次,在智能决策层,依托车路协同(V2X)与云端算力,交通系统能够为电商配送车辆提供动态路权分配与绿波干预,并在宏观上实现配送路径的时空联合优化。再次,在功能表现层,上述技术红利转化为直接的物理效能:不仅大幅压缩了配送车辆在关键交叉口的延误时间、提升了末端履约准点率,更通过前瞻性的“空地协同”网络拓展了三维配送空间,缓解了地面路网的承载极限。最终,在业务价值层,交通系统的全链路提效直接传导至电商产业,实现了物流综合成本的显著降低与服务边界的广域拓宽,从而驱动区域宏观经济的高质量演进。

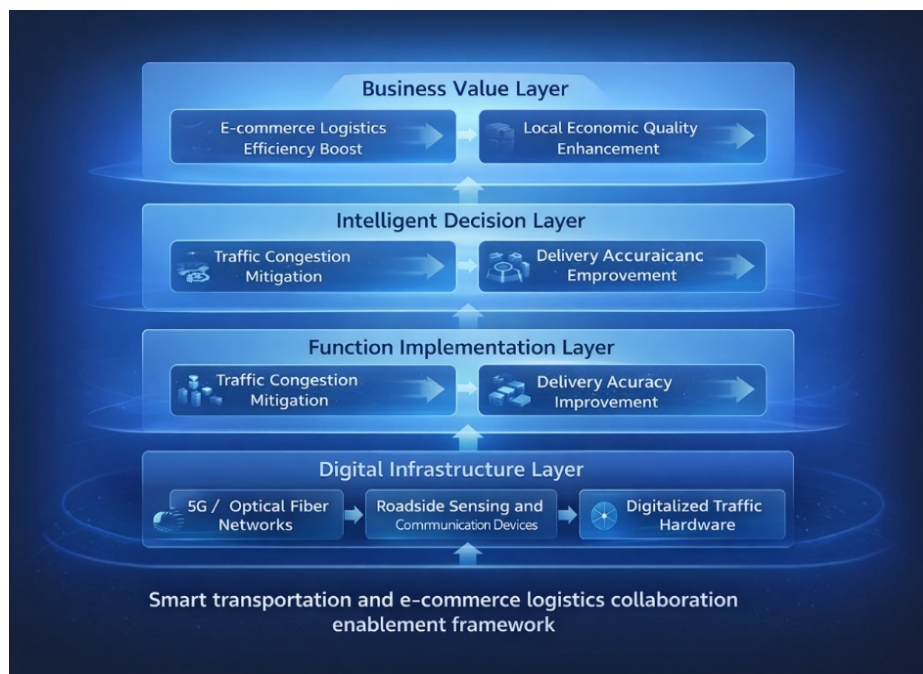


Figure 1. Collaborative empowerment mechanism framework of smart transportation for e-commerce logistics

图 1. 智慧交通对电商物流协同赋能机理框架

3. 评价指标体系构建与数据来源

本文在构建评价指标体系时,遵循科学性、系统性与数据可得性原则。在智慧交通基础设施方面,不仅考量了传统的路网硬件支撑,还重点引入了光缆长度、基站数量等信息通信软基建指标,以反映交通系统的数字化水平;在电子商务物流效率方面,则从规模、效能与成本三个维度进行综合测度。同时,

为保证评价结果的客观性，剔除了部分缺失严重的指标，并利用线性插值法对个别年份的缺失数据进行了补齐，如表 1 所示。

Table 1. Evaluation index system of smart transportation infrastructure and e-commerce logistics efficiency
表 1. 智慧交通基础设施与电子商务物流效率评价指标体系

系统层	一级指标	二级指标	单位
智慧交通基础设施系统 (U ₁)	信息通信基础	光缆线路总长度	万公里
		移动电话基站数	万个
		互联网宽带接入端口数	万个
	交通硬基建支撑	交通运输、仓储和邮政业固定资产投资额	亿元
		等级公路里程	万公里
		人均城市道路面积	平方米/人
	智慧运营与产出	智能交通领域相关专利申请数	件
公共交通客运总量		万人次	
电子商务物流效率系统 (U ₂)	电商发展规模	电子商务销售额	亿元
		快递业务量	万件
		移动互联网接入流量	万 GB
	物流运转效能	货物周转量	亿吨公里
		快递服务网点数量	个
		交通运输、仓储和邮政业增加值	亿元
	物流服务与成本	快递业务收入	亿元
社会物流总费用占 GDP 比重		%	

说明：数据来源于历年《中国统计年鉴》《中国交通运输统计年鉴》及各省统计公报，选取了 2015~2024 年近 10 年的统计数据。¹²

4. 实证模型与测度方法

为了客观、科学地测度智慧交通基础设施与电子商务物流效率之间的协同演化水平，本文采用熵值法对各指标进行客观赋权，并构建耦合协调度模型。具体计算步骤如下。

4.1. 数据的标准化处理

本研究选取了 10 个年份区域的 m 个指标，用 X_{ij} 表示第 i 个样本的第 j 个指标的原始数值。对于正向指标(即数值越大越好的指标，如 5G 基站数量、快递业务量)，其标准化公式为：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

对于负向指标(即数值越小越好的指标，如交通拥堵延时指数、物流损耗率)，其标准化公式为：

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

¹中华人民共和国交通运输部“数据”栏目及交通运输行业发展统计公报，网址：<https://www.mot.gov.cn/shuju/>
²国家统计局：《中国统计年鉴》在线资料库，网址：<https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>

式中: x'_{ij} 为标准化后的数据, 取值范围在 $[0, 1]$ 之间; $\max x_j$ 和 $\min x_j$ 分别为第 j 个指标在所有样本中的最大值和最小值。

4.2. 熵值法测算权重

熵值法是一种客观赋权方法, 主要根据各项指标观测值提供的信息量大小来确定指标权重, 能够有效避免主观因素的干扰。

第一步, 计算第 i 个样本在第 j 个指标下的比重 p_{ij} :

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}}$$

第二步, 计算第 j 个指标的信息熵值 e_j :

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij})$$

式中 $k = \frac{1}{\ln(n)}$, 且 $e_j \geq 0$ 。

第三步, 计算第 j 个指标的差异系数 d_j , 并确定最终指标权重 w_j :

$$d_j = 1 - e_j$$

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}$$

4.3. 综合评价指数构建

基于熵值法求得的权重, 计算智慧交通基础设施系统 U_1 与电子商务物流效率系统 U_2 的综合评价指数:

$$U_1 = \sum_{j=1}^{m_1} \omega_j x'_{ij}$$

$$U_2 = \sum_{j=1}^{m_2} \omega_j x'_{ij}$$

式中: U_1 和 U_2 分别代表两个系统在第 i 个样本的综合得分, m_1 和 m_2 为两个系统各自包含的指标数量。

4.4. 耦合协调度模型

本文为了量化智慧交通与电商物流两个系统之间的互动关系及协同发展水平, 采用耦合协调度模型。首先计算两个系统的耦合度 C

$$C = 2 \sqrt{\frac{U_1 * U_2}{(U_1 + U_2)^2}}$$

耦合度 C 的取值范围为 $[0, 1]$, 值越大说明系统间相互作用越强。但单纯的耦合度无法反映发展水平的高低, 因此需要进一步计算综合协调指数 T :

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2$$

式中: α 和 β 为待定系数。考虑到智慧交通基础设施与电商物流在区域经济发展中同等重要, 本文取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。最后, 计算耦合协调度 D :

$$D = \sqrt{C * T}$$

耦合协调度 D 的取值范围介于 $[0, 1]$ 之间。数值越接近 1，表明智慧交通基础设施对电商物流的赋能效果越好，两者协同发展水平越高。

5. 智慧交通与电商物流协同的时空演化特征分析

基于前文构建的评价指标体系与测度模型，本文对研究 10 年地区的智慧交通基础设施综合评价指数 U_1 、电子商务物流效率综合评价指数 U_2 以及两系统的耦合协调度 D 进行了实证测算。总体来看，研究期内各地区的智慧交通基础设施与电商物流效率均呈现出显著的上升趋势，但两者的演进节奏存在阶段性差异，如图 2 所示。

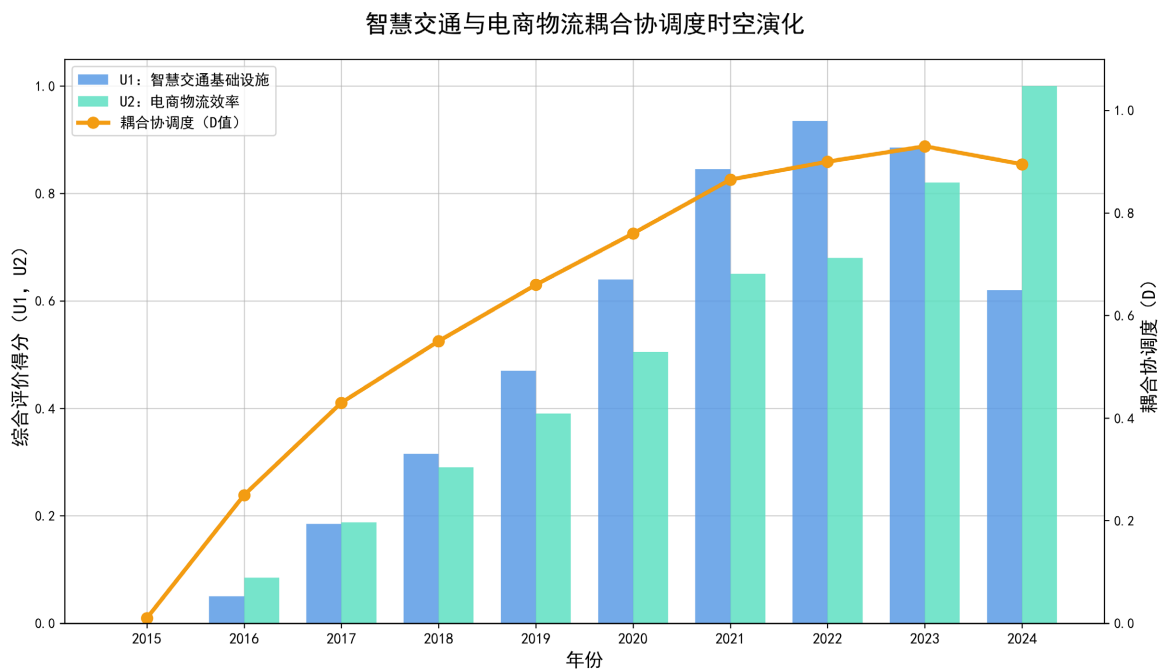


Figure 2. Spatio-temporal evolution of the coupling coordination degree between smart transportation and e-commerce logistics

图 2. 智慧交通与电商物流耦合协调度时空演化

观察图 2 可知，研究期内两大系统的综合评价得分整体均呈上升态势。引入时间序列分析中的事件干预逻辑进行审视，可以发现其演进节奏表现出受外部冲击影响的非同步性。在 2015~2018 年，城市交通网络更多是“被动承载”激增的快递单量，表现为“智慧交通滞后型”。而在 2019~2022 年，受宏观数字基础设施建设加速这一关键外部事件的干预，通信网络、智能路侧感知设备的大规模超前部署，使得智慧交通基础设施(U_1)得分迎来了跨越式增长。这种正向的外部干预为电商即时物流提供了充裕的数字与物理空间，发挥了显著的“筑巢引凤”效应。

研究期内两大系统的耦合协调度(D)实现了从“极度失调”向“优质协调”的历史性跨越，其演化轨迹呈现明显的“S 型”特征：

- 低水平磨合期(2015~2017 年, $D < 0.5$): 此时 D 值自底谷起步，两大系统处于各自为战的状态。交通设施的数字化程度不足，无法为物流路线优化提供有效的数据支撑，系统间尚未形成良性互动。
- 快速拉升期(2018~2021 年, $0.5 \leq D < 0.8$): 该阶段 D 值呈现出最陡峭的上升曲线。随着动态路权分配、

信号灯绿波协同等智能交通管控技术的落地应用，末端配送车辆在城市干道的通行延误被大幅压缩。交通技术的红利迅速转化为电商物流的降本增效，两大系统进入深度耦合的快车道。

- **高水平协同期(2022~2024 年, $D \geq 0.8$):** D 值在这一阶段基本稳定在 0.85 至 0.9 的高位区间, 达到了良好乃至优质协调状态。这验证了本文提出的理论机理: 智慧交通基础设施不仅仅是物理道路的延伸, 更是通过时空资源的精准重配, 与电商物流形成了一个彼此依赖、协同共生的复杂巨系统。

6. 结论

6.1. 主要结论

本文基于 2015~2024 年的时空演化面板数据, 对智慧交通基础设施对电商物流的协同赋能机理进行了定量测度, 得出以下核心结论:

1. 研究期内, 智慧交通与电商物流两大系统的耦合协调度(D)实现了从“极度失调”向“优质协调”的能级跃升, 整体演化轨迹呈现出加速耦合的“S 型”特征。
2. 数据分析表明, 物理路网的数字化升级与电商物流降本增效之间存在显著的正向相关关系。依托车路协同与动态路权分配, 交通系统逐渐从“被动承载”向“主动赋能”的角色转换, 这为物流效率的提升提供了重要的基础环境支撑。

6.2. 对策建议与展望

针对实证结论及未来行业演进趋势, 本文提出以下对策建议:

1. **深化数字孪生与动态路权分配:** 针对目前核心区域路网趋于饱和的现状, 地方政府及交通管理部门应将投资重心从“道路拓宽”等硬基建, 加速转向 V2X 车路协同、自适应信号控制等“软基建”。通过给予电商即时配送车辆动态路权优先或绿波引导, 进一步挖掘地面二维交通的时空潜力。
2. **前瞻布局“空地协同”的三维智慧物流网络:** 面向电商物流“分钟级”履约的极致时效需求, 地面交通网络的优化终将触及物理极限。未来, 应积极把握低空经济发展机遇, 引入电动垂直起降飞行器(eVTOL)与无人机等新型运载工具。建议在物流枢纽与城市核心商圈之间, 率先规划低空运行空域与起降节点, 构建“空中高速骨干 + 地面灵活接驳”的三维立体智慧交通体系, 为电商物流开辟全新的效率增长极。这也是本文未来进一步拓展微观调度与冲突解决研究的重要方向。

6.3. 研究局限性

尽管本文揭示了智慧交通与电商物流协同演化的宏观趋势, 但仍存在一定的局限性。首先, 受限于宏观面板数据的颗粒度, 本文证实的主要是两大系统间的显著相关性, 尚未能完全剥离区域产业结构转型等其他外部经济因素的干扰, 因此不能将其简单等同于严格的因果关系。其次, 宏观测度难以体现交叉口级的微观博弈过程。未来研究可考虑引入微观视角的因果推断模型, 结合车辆微观轨迹提取与多智能体强化学习算法, 对时空路径优化与下游匝道控制的赋能效果进行更精准的验证。

基金项目

省部级项目——上海市科委“科技创新行动计划”课题“基于多智能体仿真的枢纽多模式交通协同换乘关键技术研究”(项目编号: 23DZ1202402)。

参考文献

- [1] 熊首成. 智能交通系统信息通信应用分析[J]. 运输经理世界, 2022(6): 83-85.

-
- [2] 孙涛, 丁荣贵, 刘岗, 等. 电子化供应链管理实施方法研究[J]. 中国管理科学, 2004(3): 76-81.
 - [3] 石岿然, 蒲珏, 孙玉静. 平台介入的多物流服务提供商合作模式研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(4): 78-85.
 - [4] 丁秋雷. 客户时间窗变化的物流配送干扰管理模型——基于行为的视角[J]. 中国管理科学, 2015, 23(5): 89-97.
 - [5] 覃雪莲, 刘志学. 考虑供应商竞争的电子商务供应链物流服务模式优化研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(1): 125-136.