

碳税与补贴政策下物流供应商低碳转型的演化博弈分析

李涛 陈勇

南京交通职业技术学院, 中国·江苏 南京 211166

摘要: 随着电子商务的快速发展, 公路货运对环境的影响日益显著, 推动物流服务供应链的绿色转型成为亟待解决的问题。本研究基于演化博弈理论, 构建政府与物流服务供应商之间的博弈模型, 探讨不同碳税与补贴政策组合对物流供应商采用电动汽车等低碳车辆行为决策的影响。研究分析了静态税收与静态补贴、动态税收与静态补贴、静态税收与动态补贴、动态税收与动态补贴四种政策机制下的演化稳定策略。结果表明: 政府的静态税收与静态补贴机制无法有效激励物流供应商采用低碳车辆; 动态税收与动态补贴的联合机制最为有效, 可使物流供应商采用低碳车辆的概率达到 95%; 碳税在促进低碳服务方面比补贴更有效。研究为政府制定差异化的低碳物流政策提供了理论依据和管理启示。

关键词: 电动汽车; 物流供应商; 碳税; 政府补贴; 演化博弈

Evolutionary Game Analysis of Low-carbon Transformation of Logistics Suppliers under Carbon Tax and Subsidy Policies

Li Tao, Chen Yong

Nanjing College of Communications, China Jiangsu Nanjing 211166

Abstract: With the rapid development of e-commerce, the environmental impact of road freight transportation has become increasingly significant, making the green transformation of the logistics service supply chain an urgent issue to be addressed. This study, based on evolutionary game theory, constructs a game model between the government and logistics service providers to explore the impact of different combinations of carbon tax and subsidy policies on the behavioral decisions of logistics providers to adopt low-carbon vehicles such as electric vehicles. The study analyzes the evolutionary stable strategies under four policy mechanisms: static tax and static subsidy, dynamic tax and static subsidy, static tax and dynamic subsidy, and dynamic tax and dynamic subsidy. The results show that the static tax and static subsidy mechanism of the government cannot effectively encourage logistics providers to adopt low-carbon vehicles; the combined mechanism of dynamic tax and dynamic subsidy is the most effective, which can increase the probability of logistics providers adopting low-carbon vehicles to 95%; carbon tax is more effective than subsidies in promoting low-carbon services. The research provides theoretical basis and management implications for the government to formulate differentiated low-carbon logistics policies.

Keywords: Electric vehicles; Logistics providers; Carbon tax; Government subsidies; Evolutionary game theory

0 引言

环境意识的提高和气候变化给物流服务供应商带来了新的挑战。随着各国政府和企业纷纷设定碳排放目标, 高达 95% 的总碳足迹来自供应商的服务和运营, 环境与经济可持续性要求整个社会重新设计商业活动。在中国, 物流业造成了严重的环境污染问题, 创新驱动的发展政策能否促进城市向绿色物流方向发展, 成为学术界和政策制定者共同关注的焦点。

电动汽车在中国的迅速发展为物流业的绿色转型提供了新的机遇。与传统内燃机汽车相比, 电动商用车可为可持续交通做出重大贡献。物流供应商可以通过使用绿色能

源、低碳汽车和更高效的配送计划来减少碳排放。然而, 物流供应商对低碳运输汽车的投资也面临社会基础设施不足和行程距离短等风险。在此背景下, 政府可以通过税收和补贴等干预措施影响物流供应商的行为决策。

本研究试图回答以下问题: 政府是否应该向使用低碳汽车的物流供应商提供补贴? 碳税是否会影响物流供应商的绿色战略? 政府的行为策略如何影响低碳汽车的采用? 何种政策组合能够最有效地促进物流供应商采用低碳汽车?

1 文献综述

实施绿色物流可以减少环境破坏, 同时提高物流企业

的运营效率。Duarte 等人 (2016) 评估了里斯本城市物流中电动汽车的可行性, 证明电动汽车可保持相同的运营模式, 同时能将能耗降低 57%。在中国, Du 和 Li (2022) 基于 285 个城市的面板统计数据发现, 创新城市的试点政策对绿色物流效率产生了显著影响。

政府政策在推动绿色物流发展中扮演着关键角色。Wang 等人 (2017) 建立了物流负外部成本内部化模型, 证明政府在自由市场经济中实施激励机制具有正向效应。Huang 和 Fu (2020) 研究了基于绿色供应链的医药物流转型, 发现对物流供应商的补贴策略效果最优。Chen 和 Hu (2018) 以及 Hu 和 Wang (2021) 探索了政府财政措施对绿色发展的影响。

演化博弈论为研究政府与企业间的策略互动提供了有效工具。Liu 等人 (2022) 研究了绿色供应链上的演化博弈模型, 发现监管处罚超过预期门槛才能抑制“搭便车”行为。Han 等人 (2022) 分析了外部治理压力对海运供应链绩效的影响, 发现政府补贴在推动物流供应商采用绿色实践方面发挥关键作用。

近期研究进一步深化了这一领域。Tao 等人 (2025) 构建了制造商、物流公司和租赁公司的三方演化博弈模型, 发现针对内燃机物流车的惩罚措施是最有效的初始政策, 而充电站建设补贴在吸引租赁公司参与方面发挥关键作用。Zhang 等人 (2025) 在双政策干预框架下分析了冷链物流企业、新能源汽车制造商与政府的演化博弈, 发现碳税惩罚和环境外部成本是低碳创新的关键驱动因素, 过度依赖补贴而无惩罚可能阻碍长期稳定。在碳税政策导向下, 政府、企业、第三方监查方的三方博弈研究表明, 碳税税额与超额碳排放量对物流企业减排策略具有积极正向作用。

尽管已有丰富研究, 但关于不同税收与补贴政策组合效果的比较研究仍显不足, 特别是动态政策机制的演化稳定性分析有待深入。

2 问题描述与模型构建

2.1 问题描述

本研究聚焦于物流服务供应商在政府政策影响下的车辆选择策略。物流供应商可选用两种车辆: 采用低碳技术的电动或混合动力汽车 (简称 LV), 以及标准内燃机汽车 (简称 OV)。两种车辆的运输成本不同, 但无论是否使用低碳汽车, 客户的物流服务体验不受影响。

假设每公里运费为 p , OV 的运输成本为 c_o , LV 的运输成本为 c 。客户需求仅与运费和市场总运量相关, 每月物流服务需求量为 V 。

市场价格函数为 $p = \varphi - \varepsilon V$ 。

若使用 OV, 月利润为 $\pi_o = (p - c_o) V$;

若使用 LV, 月利润为 $\pi_l = (p - c_l) V$ 。

政府根据碳税和补贴机制进行监管: 对使用 LV 的物流供应商给予补贴 S , 对使用 OV 的物流供应商征收碳税 T 。政府监管成本为 c_{gr} , 处理 OV 环境影响成本为 c_{ge} 。使用 LV 获得的环境价值 H_l 大于使用 OV 的环境价值 H_o 。

设政府实施监管的概率为 $x \in [0, 1]$, 物流供应商采用 LV 的概率为 $y \in [0, 1]$ 。

2.2 模型假设

本研究的基本假设如下:

(1) 政府与物流供应商均为有限理性参与者, 在信息不完全条件下追求自身利益最大化。

(2) 物流供应商的两种车辆选择对客户服务质量无显著差异, 客户需求仅与价格相关。

(3) 政府补贴仅针对采用 LV 的物流供应商, 碳税仅针对采用 OV 的物流供应商。

(4) 政府监管包括对车辆类型的核查、碳排放监测等行为。

3 模型分析与政策比较

3.1 静态碳税与静态补贴模型

在静态政策机制下, 政府补贴 S 和碳税 T 均为固定常数。根据博弈收益矩阵, 可推导出政府“监管”和“不监管”的期望收益, 以及物流供应商“采用”和“不采用”的期望收益。

复制动态方程组为:

$$F(x) = dx/dt = x(1-x)[T(1-y) - yS - c_{gr}]$$

$$F(y) = dy/dt = y(1-y)[(S+T)x - \pi_o + \pi_l]$$

系统存在 $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ 及 (x_0, y_0) 五个平衡点, 其中 $x_0 = (\pi_o - \pi_l) / (T+S)$, $y_0 = (T - c_{gr}) / (T+S)$ 。

稳定性分析表明, 在 $T > c_{gr} > 0$ 且 $\pi_o > \pi_l > 0$ 、 $\pi_o - T < \pi_l + S$ 的条件下, 系统没有演化稳定策略 (ESS), 呈现出具有循环特征的闭环演化路径。这意味着静态政策无法使政府与物流供应商的行为达到稳定均衡, 物流供应商采用低碳车辆的概率将持续波动, 无法形成预期的稳定激励效果。

3.2 动态碳税与静态补贴模型

针对静态机制的局限性, 本研究引入动态碳税机制, 令 $T_1(y) = (1-y)T$, 其中 T 为碳税最大值。当更多物流供应商选择不采用低碳技术时, 政府将提高碳税。

复制动态方程为:

$$F(x) = x(1-x)[T(1-y) - c_{gr} - (T(1-y)+S)y]$$

$$F(y) = y(1-y)[-π_0+π_1-(T(1-y)+S)x]$$

该系统的平衡点 (x_1, y_1) 为渐近稳定焦点, 其中:

$$y_1 = (S+2T-\sqrt{(S^2+4ST+4Tc_{gr})})/(2T)$$

敏感性分析显示: $\partial y_1/\partial T > 0$, 即碳税与物流供应商采用低碳车辆的概率正相关; 而 $\partial y_1/\partial S < 0$, 即补贴与采用概率负相关。这一发现与直觉相悖, 但可以解释为: 高额补贴可能导致部分企业产生“政策依赖”甚至骗取补贴的行为, 反而削弱了采用低碳技术的内生动力。

3.3 静态碳税与动态补贴模型

在静态碳税与动态补贴机制下, 令 $S_1(y) = (1-y)S$, S 为补贴最大值。

复制动态方程为:

$$F(x) = x(1-x)[T - c_{gr} - (T+S(1-y))y]$$

$$F(y) = y(1-y)[-π_0+π_1-(T+S(1-y))x]$$

分析表明, 系统同样存在渐近稳定焦点 (x_2, y_2) 。与动态税收模型类似, 补贴与采用概率呈负相关, 碳税与采用概率呈正相关。

3.4 动态碳税与动态补贴模型

在双动态机制下, 同时引入 $T_1(y) = (1-y)T$ 和 $S_1(y) = (1-y)S$ 。

复制动态方程为:

$$F(x) = x(1-x)[T(1-y) - c_{gr} - (T(1-y)+S(1-y))y]$$

$$F(y) = y(1-y)[-π_0+π_1-(T(1-y)+S(1-y))x]$$

该系统的渐近稳定焦点 (x_3, y_3) 具有最优的激励效果。理论分析表明, 动态联合机制能够根据物流供应商的实际采用行为灵活调整政策力度, 形成良性反馈循环。

4 案例仿真分析

本研究以某物流公司为案例进行仿真分析, 参数设置依据如下: 普通货运卡车 CO₂ 排放量为 0.327 kg/吨公里, 根据全国碳市场发展预期, 碳价按 100 元/吨计算, 每吨公里碳税为 0.0327 元。假设月需求量为 1000 吨公里, 每月碳税总额为 32.7 元。根据碳税与补贴比率 1/3, 每月补贴为 10.9 元。普通车辆运输成本为 0.3 元/吨公里, 低碳车辆运输成本为 0.325 元/吨公里, 运费设为 0.48 元/吨公里。政府监管成本设为每月 1.6 元。

通过仿真结果发现:

静态机制: 当 $y=0.2$ 时, 物流供应商采用低碳车辆的概率在 $[0.2, 0.95]$ 范围内持续波动; 当 $y=0.7$ 时, 波动范围为 $[0.65, 0.85]$ 。系统呈现闭环特征, 无法达到稳定均衡。

动态碳税 + 静态补贴: 系统收敛至稳定概率 $y_1 \approx 0.40$, 相比静态机制有所改善。

静态碳税 + 动态补贴: 系统收敛至 $y_2 \approx 0.95$, 激励效果显著提升。

双动态机制: 系统快速收敛至 $y_3 \approx 0.95$, 收敛速度最快, 稳定性最强。

四种机制的激励效果排序为: 双动态机制 (95%) > 动态补贴机制 (95%, 但收敛较慢) > 动态税收机制 (40%) > 静态机制 (无稳定点)。这一结果表明, 动态调整的政策设计能够有效克服静态政策的局限性, 实现预期的激励目标。

5 讨论

本研究的核心发现揭示了政府政策设计中的关键权衡。首先, 静态税收和补贴机制无法产生演化稳定策略的根本原因在于其缺乏对市场反馈的响应能力。当政府采用固定政策时, 物流供应商的策略选择与政府预期之间形成持续的“追赶”循环, 无法收敛。

其次, 碳税与补贴效果差异的解释值得深入。本研究发现碳税比补贴更有效, 这与传统认知中“胡萝卜加大棒”的直觉有所不同。可能的原因包括: 补贴可能引发“政策租”寻租行为; 碳税直接提高了高碳运输的成本, 形成更强烈的价格信号; 而补贴的效果可能被企业纳入常规利润预期, 反而降低了转型的紧迫感。

再次, 动态机制成功的核心在于其建立了政府与企业的“反馈闭环”。当政府能够根据企业行为调整政策力度时, 企业的策略选择空间被有效引导, 形成良性互动。这一发现对政策设计具有重要启示: 政策的有效性不仅取决于力度, 更取决于其动态调整能力。

值得注意的是, 物流供应商采用低碳车辆的概率与政府补贴呈负相关, 这一反直觉发现提醒政策制定者: 补贴政策需要精心设计时机和退出机制。初始阶段可提供较高补贴培育市场, 当市场成熟后应逐步退出, 避免产生依赖。

6 结论与管理启示

6.1 主要结论

本研究基于演化博弈理论, 系统分析了不同碳税与补贴政策组合对物流供应商低碳转型行为的影响, 得出以下主要结论:

(1) 政府的静态碳税与静态补贴机制无法对物流供应商采用低碳车辆产生稳定的正向激励。政府与物流供应商的行为策略无法达到演化稳定状态, 政策效果呈现持续波动特征。

(2) 动态政策机制能够有效克服静态机制的局限性。在三种动态机制中, 动态税收与动态补贴的联合机制效果

最优, 可使物流供应商采用低碳车辆的概率达到 95%。

(3) 碳税在促进低碳服务方面比补贴更有效。物流供应商采用低碳车辆的概率与碳税正相关, 而与补贴负相关。随着低碳技术普及, 政府可逐步取消补贴, 由市场机制驱动自主转型。

(4) 政府监管概率与监管成本负相关。政府应通过完善信息披露制度、提高监管效率来降低监管成本, 同时保持适度的监管力度。

6.2 管理启示

基于研究结论, 提出以下政策建议:

(1) 政府应建立动态调整的政策机制。根据物流供应商的低碳技术采用率, 实时调整碳税税率和补贴额度, 形成“采用率越高、激励越精准”的正向反馈。

(2) 合理配置碳税与补贴的政策组合。在低碳技术推广初期, 可采用“低税率+高补贴”策略培育市场; 在市场成熟期, 转向“高税率+低补贴”策略, 强化市场信号。

(3) 加强监管能力建设。利用大数据、物联网等技术手段, 建立物流车辆碳排放实时监测系统, 降低监管成本, 提高政策执行效率。

(4) 培育消费者低碳偏好。通过碳标签等制度引导消费者选择低碳物流服务, 形成市场端正向激励, 逐步减少对政府补贴的依赖。

6.3 研究局限与未来方向

本研究存在以下局限: 演化博弈假设信息不对称, 但现实中政府可通过智能监管获取更充分信息; 模型仅考虑政府和物流供应商两方博弈, 未纳入消费者和第三方监查方等利益相关者; 假设客户需求仅与价格相关, 未考虑低碳偏好的影响。

未来研究可扩展至三方或多方博弈模型, 纳入消费者低碳偏好、碳标签制度等因素, 进一步探索复杂情境下的绿色物流政策优化问题。

参考文献:

[1] Tao, Q., Yang, W., Zhu, H., et al. (2025). Electrification of logistics vehicles: Subsidies or penalties? A tripartite evolutionary game analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 142, 104589.

[2] Zhang, J., Zou, C., Li, H. (2025). Tripartite evolutionary game analysis of cold chain logistics enterprises, NEV manufacturers, and government under dual-policy interventions. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 22(1), 528-553.

[3] Du, G., Li, W. (2022). Does innovative city building promote green logistics efficiency? Evidence from a quasi-natural experiment with 285 cities. *Energy Economics*, 114, 106275.

[4] Chen, W. T., Hu, Z. H. (2018). Using evolutionary game theory to study governments and manufacturers' behavioral strategies under various carbon taxes and subsidies. *Journal of Cleaner Production*, 201, 123-141.

[5] Hu, Z. H., Wang, S. W. (2021). An evolutionary game model between governments and manufacturers considering carbon taxes, subsidies, and consumers' low-carbon preference. *Dynamic Games and Applications*, 11(3), 573-598.

[6] Liu, Z., Qian, Q., Hu, B., et al. (2022). Government regulation to promote coordinated emission reduction among enterprises in the green supply chain based on evolutionary game analysis. *Resources Conservation and Recycling*, 182, 106290.

[7] Han, B., Zheng, M., Fan, L., et al. (2022). Mechanism of governance pressures, green production and collaboration on the performance of maritime supply chain: Evidence from the moderating effect of government subsidies. *Research in Transportation Business and Management*, 43, 100782.

[8] 符瑛, 龚哲宇, 吴为等. 政府补贴下新能源汽车产业三级供应链减排策略研究[J]. *物流研究*, 2024(2):29-39.

[9] 李利华, 王瑶, 邓亚军等. 碳税政策下绿色物流发展的三方演化博弈[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(10): 3715-3726.

[10] Duarte, G., Rolim, C., Baptista, P. (2016). How battery electric vehicles can contribute to sustainable urban logistics: A real-world application in Lisbon, Portugal. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 15, 71-78.

[11] Huang, Z., Fu, M. (2020). Research on green decision making of pharmaceutical logistics considering government subsidy strategy. *PLoS ONE*, 15(10), e0241400.

[12] Wang, Z., Tsai, Z., Fu, J., et al. (2017). Internalization of negative external cost of green logistics and incentive mechanism. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(8).

基金项目: 江苏高校哲学社会科学项目(2024SJYB0519)“双碳”目标下长三角汽车产业物流服务供应链研究。

作者简介: 李涛(1979-), 男, 汉族, 博士, 研究方向: 主要从事汽车工程和物流管理方面的研究工作。