

电子商务快速发展背景下城市配送交通碳排放 测算与治理策略研究

——以成都市为例

刘 涛, 董洁霜

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年11月28日; 录用日期: 2025年12月11日; 发布日期: 2025年12月31日

摘 要

随着电子商务规模持续高速增长, 我国城市道路交通结构和运行特征发生显著变化, 电商物流、即时配送及城市货运需求快速攀升, 成为城市交通碳排放的重要推动力量。在“双碳”战略背景下, 厘清电商驱动的交通碳排放变化特征, 对构建绿色电商供应链和推进城市低碳转型具有重要意义。本文以成都市为例, 基于政府统计数据、交通部门资料及相关文献, 构建自下而上的道路交通碳排放测算模型, 对2018~2022年城市配送相关交通工具的碳排放进行量化评估。研究发现: (1) 受电商购物增长和快递物流需求攀升影响, 载货汽车与出租车碳排放显著增加, 其中载货汽车排放五年增长约56%, 出租车增长超过200%; (2) 私人汽车及摩托车因同城配送、即时配送等业务量扩张而呈现隐性增长趋势; (3) 公共交通低碳化成效明显, 但与电商物流关联度较低。基于此, 提出推动配送车辆新能源化、建设前置仓及共同配送体系、利用平台算法优化路径、加强网约车配送监管等策略, 以期在城市在电商时代的绿色交通治理提供参考。

关键词

电子商务, 城市配送, 道路交通碳排放, 低碳物流

Research on Estimation and Governance Strategies of Urban Delivery-Related Transportation Carbon Emissions under the Rapid Development of E-Commerce

—A Case Study of Chengdu

Tao Liu, Jieshuang Dong

文章引用: 刘涛, 董洁霜. 电子商务快速发展背景下城市配送交通碳排放测算与治理策略研究[J]. 电子商务评论, 2025, 14(12): 5668-5682. DOI: 10.12677/ecl.2025.14124537

Abstract

With the rapid expansion of e-commerce in China, the structure and operational characteristics of urban road transportation have undergone significant changes. The sharp increase in e-commerce logistics, instant delivery services, and urban freight demand has become an important driver of transportation-related carbon emissions. Under the national "Dual Carbon" strategy, identifying the characteristics of e-commerce-induced transportation emissions is essential for building a green e-commerce supply chain and promoting low-carbon urban transitions. Using Chengdu as a case study, this paper constructs a bottom-up estimation model based on government statistics, transportation sector data, and relevant literature to quantify carbon emissions from urban delivery-related transportation modes from 2018 to 2022. The results show that: (1) driven by the continuous growth of online shopping and express logistics demand, carbon emissions from freight vehicles and taxis increased significantly, with freight vehicle emissions rising by approximately 56% and taxi emissions increasing by more than 200% over five years; (2) emissions from private cars and motorcycles exhibit implicit growth patterns due to the expansion of same-city delivery and instant delivery services; and (3) public transportation has achieved notable progress in low-carbon development, although its relevance to e-commerce logistics remains limited. Based on these findings, this paper proposes strategies such as accelerating the adoption of new-energy delivery vehicles, developing front-distribution warehouses and joint-delivery systems, optimizing routing through platform algorithms, and strengthening supervision over ride-hailing-based delivery activities. These recommendations aim to provide insights for green transportation governance in the e-commerce era.

Keywords

E-Commerce, Urban Delivery, Road Transportation Carbon Emissions, Low-Carbon Logistics

Copyright © 2025 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

随着全球气温的逐渐升高,以CO₂为主的温室气体排放问题逐渐在全球引起重视,由CO₂等温室气体大量排放引起的气候异常、自然灾害加剧等问题给人类的生存带来了巨大的挑战,对CO₂等温室气体排放的控制,已成为全球范围内重点关注的议题。交通运输是石油消费的重点行业,是温室气体和大气污染排放的主要来源之一。近年来全球交通行业的排放量更是呈现显著增长,并将成为未来几十年内导致气候变暖的重要因素之一。根据最新的国际能源署(IEA)发布的《全球二氧化碳排放报告》显示,2023年全球二氧化碳排放量达到374亿吨,创下历史新高,较上一年增长1.1%。2023年,中国的排放量增长了约5.65亿吨,是迄今为止全球最大的增幅。报告显示全球交通碳排放量占全球总碳排放量的比例约为16%。这一数据相较于2020年的15%有所上升,全球交通活动对气候变化的影响日益显著。对于中国交通运输业的CO₂排放量,国内目前尚未公布官方统计数据,根据国际能源署(IEA)最新数据显示,2021年

中国交通运输业的排放量为 9.69 亿吨, 占比 9.1% [1]。然而该排放量数据依据中国统计年鉴中交通运输业的能耗数据测算, 统计口径在交通运输业的基础上还包含了仓储业和邮政业, 且未涵盖私人交通, 也不能体现客运、货运及不同交通方式的碳排放量, 数据参考价值有限[2]。

与以往研究不同的是, 在我国交通碳排放的增长动力中, 电子商务高速发展所引致的城市配送需求已成为不可忽视的新变量。在“双碳”战略背景下, 电商不仅推动了经济数字化转型, 也深刻重塑了能源消耗结构、配送模式与交通排放格局。赵平等的研究指出, 电商发展在推动绿色经济的同时, 也暴露出绿色配送能力不足、物流运输能耗增长等问题, 暴露出现有城市配送体系的结构性矛盾[3]。与此同时, 岳立等基于国家电子商务示范城市的研究发现, 试点政策显著提升了城市碳排放效率, 并通过软硬件环境改善促进能源利用效率, 从侧面反映出电商体系对交通与物流排放结构的重要影响。更进一步的实证研究也表明电商化具备稳健的低碳效应[4]。徐毅等利用国家电子商务示范城市作为准自然实验, 发现电商化能够显著降低城市碳排放、提升碳效率, 其作用机制主要来自绿色技术创新和产业结构升级[5]。这说明电商化并非单纯带来物流活动增加, 还可能通过技术与结构调整产生“净减排效应”, 是当前城市低碳转型的重要推动力量。但从微观层面的交通运输结构来看, 电商物流的扩张仍显著推高了城市配送交通强度。近年来, 全国电商交易规模与快递包裹数量持续攀升, 2022 年快递业务量突破 1100 亿件, 由此推动仓储物流、干支线运输、同城配送与即时配送等多层级物流体系不断扩张。大量城配货车、网约跑腿车辆及外卖骑手电动车高频运转, 使城市道路交通活动显著增加, 进一步加剧了交通碳排放压力, 也为城市交通低碳化治理带来了新的挑战。

然而现有交通碳排放研究多集中于基于能源消费的宏观测算, 或聚焦客运、货运的传统交通方式排放, 对“电商平台驱动的物流需求对城市交通碳排放的影响”关注不足, 缺乏将电子商务、数字物流体系与城市交通碳排放联系起来的研究视角。这使得在“双碳”目标背景下, 城市难以从电商物流端找到有效的减排抓手。

二氧化碳排放量数据不是由国家或者官方直接公布的, 研究交通碳排放就需要运用收集的指标数据对交通二氧化碳排放量进行测算。目前, 关于交通碳排放的测算方法主要有两种: 一种是“自上而下”的算法, 用研究范围内的各种能源消费量乘以相应能源的 CO_2 排放系数, 这种方法是传统的碳排放测算方法, 同时适用于全行业的碳排放测算或其他细分行业。周琪等采用“自上而下”的方法测算城市轨道交通系统的碳排放量, 综合分析了我我国城市轨道交通的静态和动态碳排放效率[6]。武翠芳等采用“自上而下”的碳排放计算方法, 根据 IPCC 国家温室气体清单指南的数据, 2000~2013 年甘肃省交通碳排放进行测算, 对交通碳排放总量、人均量、交通能源碳排放结构及碳排放强度进行动态分析[7]。另一种为“自下而上”的算法, 根据能源对碳排放的转换系数和转换公式, 用所要研究国家或区域的交通部门各种交通方式的车辆里程数、保有量、单位行驶里程能源消耗量计算得到燃料消费总量, 然后再乘以能源的 CO_2 排放系数得到交通部门的碳排放量。时朋飞等将长江经济带作为研究区域, 首先借助自下而上法测度其在 2006~2021 年的旅游业碳排放[8]。田佩宁等采用改进的自下而上法, 测算 2008~2035 年私家车碳排放和 NEV 碳减排量, 并设置 10 个单一减排措施情景和 2 个综合措施情景, 利用情景分析法, 研究私家车的碳减排策略和达峰路径, 最后提出建议措施[9]。

综上所述, 构建与电商物流发展相结合的城市交通碳排放测算体系, 分析不同配送方式与交通工具的排放特征, 对于推动绿色电商发展和城市交通低碳转型具有重要现实意义。

成都市作为国家中心城市和西部电商核心枢纽, 京东、菜鸟、顺丰、美团等主要平台在当地布局密集仓储网络和城市配送体系, 电商发展与交通需求增长呈高度耦合特征。研究成都市道路交通碳排放, 不仅可为当地构建绿色配送体系提供数据支撑, 也对其他中国城市在“双碳”目标背景下推动电子商务绿色化发展具有示范价值。

2. 交通碳排放量计算

2.1. 道路交通碳排放量测算方法

本文选取 IPCC 推荐的“自下而上”法作为碳排放总量测算方法。该方法以车辆类型、保有量、行驶里程及燃料消耗量等数据为基础, 计算交通能源消耗并推算碳排放量[10]。其计算公式如下[11]:

$$E_{CO_2} = \sum_{i,j} [VKT_{i,j} \times FC_{i,j} \times EC_i] = \sum_{i,j} [VN_{i,j} \times AM_{i,j} \times F_i \times P_i \times G_i \times EC_i] \quad (1)$$

式中 E_{CO_2} 为道路交通碳排放总量(kg); i 为燃料类型; j 为交通工具种类; $VKT_{i,j}$ 为各类交通工具历年的行驶总里程统计数据(km); $FC_{i,j}$ 为使用 i 燃料的 j 类交通工具的单位里程燃料消耗量温室气体排放(TJ/km); EC_i 为 i 燃料的碳排放系数(kg/Tj); $VN_{i,j}$ 为使用 i 燃料的 j 类交通工具的保有量(辆); $AM_{i,j}$ 为使用 i 燃料的 j 类交通工具的年均行驶里程(km/辆); F_i 为 i 燃料的平均百公里油耗量(L/100km); P_i 为 i 燃料的燃油密度(kg/L); G_i 为 i 燃料的净热值(TJ/kg)。若所研究的城市拥有各类交通工具历年的行驶总里程统计数据 $VKT_{i,j}$, 则可直接使用; 若官方机构未发布, 则需收集各类交通工具保有量和年均行驶里程数据, 计算后得到全年行驶里程。

2.2. 人均碳排放量测算方法

人均碳排放量 C_p 用于反映地区人口规模对交通碳排放的影响, 其计算公式为[12]:

$$C_p = \frac{C}{P} \quad (2)$$

其中: C 为城市交通碳排放量; P 为城市人口总数。

2.3. 单位 GDP 碳排放

单位 GDP 碳排放量 C_g (碳排放强度)反映经济产出与碳排放的关系, 计算公式为: $C_g = \frac{C}{G}$ (3)

其中: C 为城市交通碳排放量; G 为国内生产总值(GDP)。

3. 电子商务发展背景下成都市城市配送交通碳排放实证分析

3.1. 数据收集

在电子商务高速发展的背景下, 城市配送需求呈现持续增长趋势, 城配货车、即时配送车辆及部分网约车的运行频率明显增加, 对城市道路交通排放造成直接影响。因此, 本文在传统交通碳排放测算数据的基础上, 将电商物流相关因素纳入分析框架。

为此, 本文收集了成都市近五年交通活动水平、人口经济数据以及燃料排放因子, 数据来源包括政府统计年鉴、交通主管部门公开资料及相关研究文献。所采集的数据主要包含: (1) 城市配送相关交通工具保有量和行驶里程; (2) 载货车与骑手车辆在电商配送中的使用特征; (3) 能源消耗与碳排放因子; (4) 城市人口与经济规模变化。

3.1.1. 城市配送与交通活动水平

近年来, 随着电子商务、即时配送和社区零售的高速发展, 成都市城市配送需求持续攀升, 城配货车、外卖骑手车辆以及共享交通工具的使用密度显著提高, 城市交通运行呈现高强度特征。作为西南区域的电商物流核心城市, 成都的交通基础设施规模与运输活动量长期保持在高位, 为城市配送体系的运行提供了重要支撑。根据成都市 2023 年《成都统计年鉴》[13]和 2022 年《成都市国民经济和社会发展统

计公报》[14]数据显示,成都市年末全市建成区面积达到 1331.1 平方公里,其中,中心城区建成区面积占据主要部分,为 1063.7 平方公里。城市道路面积超过 1.2 亿平方米,为市民提供了便捷的出行条件。在公路交通方面,成都市的公路通车里程已增长至 29,338 公里,而年末公路总里程更是达到了 40.5 万公里,相较于上年末增加了 0.6 万公里。公路密度的提升,从 81.8 公里/百平方公里增加至 83.1 公里/百平方公里,表明成都交通网络结构进一步完善,能够承载更大规模的物流与出行需求。在客货运方面,成都市公路运输承担着重要的角色。2022 年,成都市公路货物运输量达到 35047.0 万吨,货物周转量高达 3,932,547 万吨公里,其中电商平台及仓储物流企业的配送需求占比快速提升。随着京东、顺丰、菜鸟、美团等电商物流企业在成都加速仓储布局和配送网络建设,电商包裹、中小件配送以及同城即时物流的需求显著增强,成为推动货物运输量增长的重要力量。同时,公路旅客运输量和旅客周转量也分别达到了 3431.1 万人次和 310,960 万人公里,显示出城市出行需求依然旺盛。公共交通方面,成都市已构建了以公交、地铁为主,共享单车、共享汽车、新能源汽车等为辅的绿色出行网络。2022 年全年公交客运总量达到 97,204 万人次,客运总量更是高达 156,193 万乘次。在机动车保有量方面,成都市年末机动车保有量达到 660.7 万辆,其中新能源汽车保有量快速上升,为城市配送车辆的新能源化提供了良好基础。

3.1.2. 排放因子

在排放因子的选择上,本文遵循地方、国家、国际标准的优先选取原则,并结合成都市的实际情况,选择准确、适用的排放因子数据。由于成都市没有测算本地化排放因子,本文参考 IPCC (联合国政府间气候变化专门委员会)发布的《IPCC 国家温室气体清单指南》中各种燃料的碳排放系数。能源碳排放系数如下表 1 所示。

Table 1. Carbon emission factors of various energy sources
表 1. 各种能源碳排放系数

燃料类型	碳排放系数(kg/TJ)
煤炭	107,000
焦炭	107,000
原油	73,300
汽油	69,300
煤油	71,500
柴油	74,100
燃料油	77,400
天然气	56,100

与此同时,考虑到电商物流中天然气货车、汽油私家车与摩托车、电商配送轻卡等车辆的不同燃料结构,本研究按不同车辆类型区分排放系数,以提高测算精度。

3.1.3. 人口经济数据

电子商务的快速发展离不开城市人口规模、居民消费能力和经济活力的支撑,这些因素同时影响着城市配送需求的规模与强度,从而成为交通碳排放的重要间接驱动因素。根据《2022 年成都市国民经济和社会发展统计公报》显示,成都市全年实现地区生产总值(GDP)为 20817.5 亿元。在人均层面,按常住人口计算,成都市人均地区生产总值为 98,149 元,较上一年增长 2.0%,表明居民消费能力持续提升,也为即时配送、社区零售、电商购物等业务的增长创造有利条件。2022 年年末,成都市常住人口达到 2126.8 万人,较上年末增加 7.6 万人,增长率为 0.4%。其中,城镇常住人口数量为 1699.1 万人,常住人口城镇

化率达到 79.9%，较上年末提高了 0.4 个百分点，高水平的城镇化意味着居民生活半径更依赖配送体系，多元化消费场景的出现进一步放大了电商物流需求，推动城市配送车辆和骑手运力的高频运转。户籍人口方面，成都市年末户籍人口为 1571.6 万人，较上年末增加 15.4 万人，户籍人口城镇化率为 68.8%。常住人口与户籍人口之间的差异反映了成都较高的流动人口规模，而流动群体通常是电商、外卖和即时配送服务的重要消费主体，对城市配送交通量具有显著影响。此外，居民消费价格(CPI)的变化也会影响交通碳排放的计算。全年居民消费价格(CPI)比上年上涨 2.4%，其中交通和通信类价格上涨 5.8%。交通服务价格变动不仅影响居民出行行为，也反映了物流行业的运营成本变化，间接影响电商配送企业的运力调度与碳排放特征。总体来看，成都经济增长、人口规模扩大与城镇化水平提高共同推动了电商消费的旺盛增长，也带动了城市配送活动的快速扩张。这些人口经济因素为后续分析电子商务背景下的交通碳排放提供了重要的基础支撑。

3.2. 测算边界

根据成都市的官方统计机构公布的资料，本文将成都市道路交通系统的碳排放测算边界确定为 2018 年至 2022 年成都市公共汽车(作为对照，用于分析电商配送替代效应)、出租车/网约车(部分承担即时配送或跑腿业务)、私人汽车(受电商购物减少实体出行但配送量增多等因素影响)、摩托车(外卖与即时配送的主要运力)和载货车辆(电商物流核心配送载体)这五类交通方式所产生的能源消耗 CO₂ 排放。这些交通方式覆盖了城市配送体系中最主要的运行车辆，能够为制定针对性的减排措施提供科学依据。

3.3. 数据整理与参数设定

3.3.1. 行驶总里程数据 VKT_{it}

由于成都市未公布各类交通工具的年度总行驶里程，本文依据车辆保有量与单位车辆年均行驶里程进行估算。车辆保有量取自《成都统计年鉴》(2018~2022)，年均行驶里程参考生态环境部《机动车使用年限及行驶里程参考值》及相关学者研究。具体说明如下。

(1) 公共汽车

统计年鉴未提供公交车行驶总里程。本文依据公交线路长度与运营班次数推算，2018~2022 年公交线网平均长度 17,984 km，线路数 1202 条，平均单线路长约 14.96 km。假设每辆车日均运行 6 班次(即 12 个单程)，得单位车辆年均行驶里程 65,525 km。进而估算行驶总里程，具体结果见表 2。

Table 2. Bus mileage for 2018~2022
表 2. 2018~2022 公共汽车行驶里程

年份	公共汽车数量(辆)	全年行驶总里程(10 ⁸ km)
2018	15,903	10.42
2019	15,948	10.45
2020	14,542	9.53
2021	16,658	10.92
2022	16,657	10.91

(2) 出租汽车(包括部分网约车配送参与者)

根据《成都统计年鉴》中提供的出租汽车数量数据和运营线路长度数据，由于无法获取每辆出租车的确切行驶里程，假设每辆出租车每日完整运行一次线路，则由出租汽车数量与运营线路长度二者相乘即可得出出租汽车全年行驶里程数据，具体结果见表 3。考虑到网约车在即时配送、跑腿服务中使用频率

增加, 此里程估算在一定程度上也反映了电商即时物流的运力需求增长。

Table 3. Taxi mileage for 2018~2022
表 3. 2018~2022 出租汽车行驶里程

年份	出租汽车数量(辆)	运营线路长度(km)	全年行驶总里程(10^8 km)
2018	12,650	225	10.39
2019	16,524	342	20.63
2020	16,385	558	33.37
2021	16,862	558	34.34
2022	16,347	558	33.29

(3) 私人汽车

统计年鉴仅提供保有量, 缺乏行驶里程。本文采用江辰星的研究[11]提出的年均行驶里程 13,575 km 作为固定值。具体结果见表 4。虽然私人汽车并非电商配送核心运力, 但其流动性与居民出行变化仍可能受到电商购物活动的影响, 因此作为对照变量保留。

Table 4. Private car mileage for 2018~2022
表 4. 2018~2022 私人汽车行驶里程

年份	私人汽车数量(万辆)	全年行驶总里程(10^8 km)
2018	420.28	570.53
2019	438.83	595.71
2020	441.39	599.19
2021	460.49	625.12
2022	552.16	749.56

(4) 摩托车(含外卖配送车辆)

参考中华人民共和国生态环境部发布的《机动车使用年限及行驶里程参考值汇总表》中有关摩托车使用年限和行驶里程参考值, 本文将成都市摩托车单位车辆年均行驶里程定为 8782 km。由此得出摩托车行驶总里程数据如下表 5。该类车辆是外卖骑手和即时配送小件业务的重要运力来源, 其行驶里程与电商平台订单量高度相关。

Table 5. Motorcycle mileage for 2018~2022
表 5. 2018~2022 摩托车行驶里程

年份	摩托车数量(万辆)	全年行驶总里程(10^8 km)
2018	56.67	49.77
2019	55.43	48.68
2020	55.43	48.68
2021	55.44	48.69
2022	52.47	46.08

(5) 载货汽车

载货汽车是电商物流体系中城配、干线运输的重要承担者。参考中华人民共和国生态环境部发布的《机动车使用年限及行驶里程参考值汇总表》中有关载货汽车使用年限和行驶里程参考值, 本文将成都市载货汽车单位车辆年均行驶里程定为 38,667 km。由此得出载货汽车行驶总里程数据如下表 6。

Table 6. Truck mileage for 2018~2022

表 6. 2018~2022 载货汽车行驶里程

年份	载货汽车数量(万辆)	全年行驶总里程(10^8 km)
2018	28.64	110.74
2019	31.91	123.39
2020	36.04	139.36
2021	40.06	154.90
2022	44.76	173.07

3.3.2. 单位里程燃料消耗量 $FC_{i,j}$

鉴于官方统计数据的缺失, 本文假设在过去十年间, 不同交通工具的单位里程燃料消耗量保持恒定。为了进行测算, 本文采用了一个转换公式, 该公式将单位里程燃料消耗量转化为百公里油耗、净热值和燃油密度的乘积。这一转换依据主要来源于国际气候变化委员会(IPCC)的温室气体清单指南, 以及交通和环境部门官方发布的资料, 并结合了相关领域学者的深入调查研究。根据我国 2023 年《中国能源统计年鉴》[15]中提供的数据, 成都市主要燃料净热值的参考取值如下表 7 所示。

Table 7. Net calorific values of major fuels

表 7. 主要燃料净热值

燃料类型	净热值(TJ/kg)
汽油	43.1×10^{-6}
柴油	42.7×10^{-6}
天然气	$32.2 \times 10^{-6} \sim 38.9 \times 10^{-6}$ (TJ/m ³)

各种车型的百公里油耗量来自于北方汽车网的专题研究《百公里耗油公布》。其中, 公交车的百公里油耗均值为 30 升, 出租车和私人汽车的百公里油耗均值为 8 升, 载货汽车百公里油耗均值为 20 升 [16]。

(1) 公共汽车

成都市自 2018 年 4 月起, 氢燃料电池公交车示范线在成都市正式投入运行。这些公交车利用氢燃料电池发电驱动, 不仅发电效率高, 而且尾气排放只有水, 实现了零污染和零排放。截至 2019 年 6 月, 成都市已有氢燃料电池公交车累计运营超过 40 万公里, 载客人次达 120 万人次。根据《成都统计年鉴》数据显示, 2019 年成都市全年公交客运总量 164,197 万人次, 氢燃料电池公交车所占的比例还是很小的。在此之前, 成都市的公交车主要使用传统的化石燃料(0#柴油), 密度为 0.835 kg/L。根据公交车的百公里油耗均值为 30 L, 由此得出公共汽车的单位里程燃油消耗量为 1069.64×10^{-8} TJ/km。

(2) 出租汽车(含部分即时配送运力)

根据四川省交通运输厅发布的信息显示, 成都市出租车主要以燃油和天然气为主, 这些出租车通常是油气两用的, 当天然气用尽时, 会自动转换为使用汽油。这里为了计算方便, 本文取出租汽车使用的主要燃料为天然气, 密度为 0.7174 kg/m³。根据出租车百公里油耗均值为 8 L, 天然气净热值取中间值 35.6

$\times 10^{-6}$ TJ/m³, 可以得出出租汽车的单位里程燃油消耗量为 204.32×10^{-8} TJ/km。随着跑腿与同城配送需求提升, 该参数能较好反映其在电商即时物流中的运力表现。

(3) 私人汽车

2018 年到 2022 年间成都市私人汽车的主要燃油类型呈现多样化的特点, 但汽油在私人汽车中仍占据主导地位。从 2004 年以来的注册车辆情况来看, 成都市汽油类车辆的平均比例达到了 88.56%。因此本文将成都市私人汽车主要燃料定位 93#汽油, 密度为 0.725 kg/L。根据私人汽车的百公里油耗均值 8L, 由此得出私人汽车的单位里程燃油消耗量为 249.98×10^{-8} TJ/km。

(4) 摩托车(外卖骑手使用频繁)

根据成都市交通管理局《关于摩托车交通秩序管理的通告》显示, 禁止三轮摩托车、三轮轻便摩托车以及发动机排量 150 毫升以上的两轮摩托车(警用、抢险等特种用途摩托车除外)在成都市绕城高速(G4202)以内(含绕城高速)区域的道路上行驶。根据汽车之家提供的不同排量摩托车百公里油耗数据, 本文取摩托车百公里油耗为 2 L。成都市摩托车使用的燃油主要是 93#汽油, 密度为 0.725 kg/L。由此得出摩托车的单位里程燃油消耗量为 62.50×10^{-8} TJ/km。鉴于摩托车是即时配送的重要运力, 该数据对测算电商配送碳排放尤为重要。

(5) 载货汽车(城配物流核心车辆)

成都市载货汽车使用的燃油主要是 0#柴油, 密度为 0.835 kg/L。根据载货汽车的百公里油耗均值为 20L, 由此得出载货汽车的单位里程燃油消耗量为 713.09×10^{-8} TJ/km。随着城配物流规模扩大, 该类车辆为电商物流碳排放贡献最大。

3.3.3. 碳排放系数 EC_i

本文碳排放系数采用 IPCC 发布的《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》中的碳排放系数缺省值, 如下表 8 所示。

Table 8. Carbon emission factors of major fuels
表 8. 主要燃料碳排放系数

燃料类型	碳排放系数(kg/TJ)
汽油	69,300
柴油	74,100
天然气	56,100

这些参数能够准确反映成都市电商物流相关车辆在运行过程中的碳排放水平, 为后续的城市配送交通碳排放计算提供可靠依据。

4. 城市配送相关交通碳排放测算结果与分析

4.1. 城市配送相关道路交通碳排放量

根据上述测算方法(1)及数据来源, 可以计算出成都市道路交通碳排放总量和不同道路交通方式的碳排放量。结果如下表 9、图 1 所示。

Table 9. Road transport carbon emissions in Chengdu (2018~2022)
表 9. 2018~2022 年成都市道路交通碳排放量

碳排放总量(万吨)	公共汽车	出租汽车	私人汽车	摩托车	载货汽车	合计
2018 年	82.59	11.91	988.36	21.56	585.15	1689.57

续表

2019 年	82.83	23.65	1031.99	21.08	651.99	1811.54
2020 年	75.54	38.25	1038.01	21.08	736.38	1909.26
2021 年	86.55	39.36	1082.93	21.09	818.49	2048.42
2022 年	86.47	38.16	1298.51	19.96	914.50	2357.60

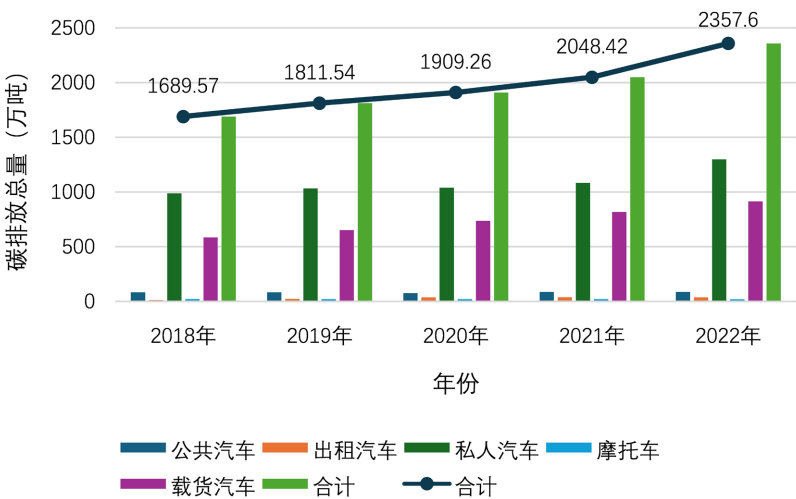


Figure 1. Road transport carbon emissions in Chengdu (2018~2022)
图 1. 2018~2022 年成都市道路交通碳排放量

从 2018 年到 2022 年，道路交通总碳排放量呈现上升趋势，从 1689.57 万吨增长到 2357.60 万吨，增长了约 40%，呈现持续上升趋势。不同类型交通工具的碳排放结构变化具有明显差异，其背后反映了城市交通需求、电商物流发展以及出行方式转变的综合影响。公共汽车碳排放量在 2018 年至 2022 年间波动不大，但在 2020 年受到新冠疫情影响，碳排放量出现负增长。总体来看，公共交通碳排放一直在持续增长，但在整个交通碳排放中占比相对较小，且相对稳定。出租汽车碳排放量从 2018 年的 11.91 万吨显著增长到 2022 年的 38.16 万吨，增长了约 220%。增长速度非常快，这一快速增长不仅与共享出行、网约车规模扩张有关，也与即时配送、同城跑腿等平台业务发展带来的高频运营需求密切相关。尽管其排放占比仍然较小，但增长趋势反映了新型交通服务模式对城市碳排放的影响日益突出。私人汽车是交通碳排放的主要来源，占比较大且持续增长。随着经济的增长和人们生活水平的提高，私人汽车的使用量不断增加，导致碳排放量持续增长。碳排放量从 2018 年的 988.36 万吨增长到 2022 年的 1298.51 万吨，增长了约 31%。私人汽车的高占比说明居民出行方式仍以私家车为主，对交通碳排放影响深远。摩托车在总碳排放中的占比相对较小。碳排放量在 2018 年至 2021 年间波动不大，但在 2022 年有所下降，这与外卖骑手车辆结构逐渐向电动两轮车转型、以及成都市 2021 年发布的《关于摩托车交通秩序管理的通告》中对摩托车限制有关，使燃油摩托车的出行规模有所下降。载货汽车碳排放增长最能体现电商物流的影响。其碳排放量逐年显著增长，从 2018 年的 585.15 万吨增长到 2022 年的 914.50 万吨，增长了约 56%。是整体交通碳排放增长的重要推动力量。随着电商、快递和即时配送需求持续扩张，城配车辆和干线物流车辆的运行频率大幅提高，成为仅次于私人汽车的第二大排放来源。

4.2. 人均碳排放量

《成都统计年鉴》提供了成都市历年人口数据，根据上述公式(2)可以计算出成都市 2018~2022 年历

年人均碳排放量，如下表 10、图 2 所示。

Table 10. Per capita carbon emissions in Chengdu (2018~2022)

表 10. 2018~2022 成都市人均碳排放量

年份	总人口(万人)	人均碳排放量(吨/人)
2018	1476.05	1.14
2019	1500.07	1.21
2020	1519.70	1.26
2021	1556.18	1.32
2022	1571.57	1.50

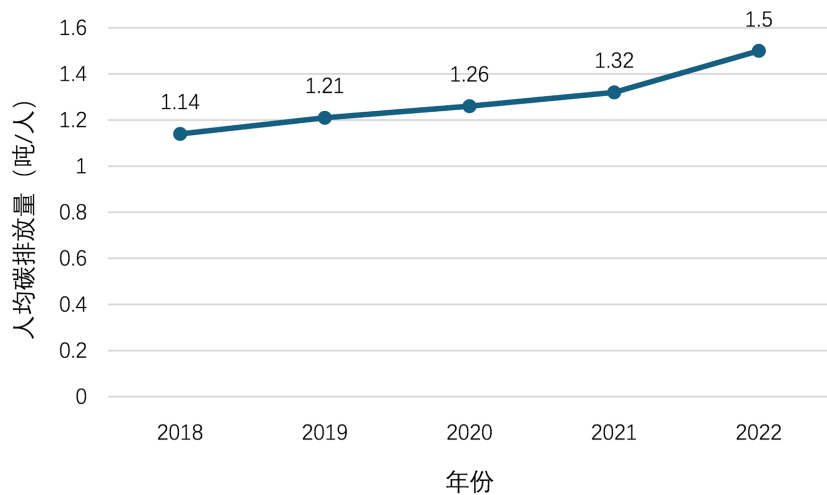


Figure 2. Trend of per capita carbon emissions in Chengdu (2018~2022)

图 2. 2018~2022 年成都市人均碳排放量趋势

成都市作为西部地区的重要城市，近年来经济发展迅速，工业化、城市化进程不断加快，这在一定程度上导致了能源消费和碳排放的增加。成都市人均碳排放量呈现出逐年上升的趋势，从 2018 年的 1.14 吨/人增长至 2022 年的 1.50 吨/人，五年间增长了约 32%。2021 年至 2022 年是五年内增长最快的一年，增长率高达 14%，人均碳排放量也达到五年来的最高值 1.50 吨/人。在电子商务快速发展和即时配送需求激增的背景下，城市配送车辆(如载货汽车、摩托车、网约车配送等)的高频运行，是人均交通碳排放持续上升的重要推动因素。虽然成都近年来陆续出台了多项交通低碳政策，如推动公交车新能源化、要求网约车新增车辆使用新能源汽车等，但政策在城市配送领域的覆盖力度仍有限，而电商物流对交通需求的拉动效应持续增强，使得整体碳排放增长压力依然存在。未来，成都市应进一步加强交通领域的精细化管理，特别是针对电商物流配送体系，推动新能源配送车辆应用、优化配送路径、提升物流效率，以降低城市配送的碳排放强度。同时，应继续完善公共交通体系和绿色出行引导机制，从源头减少交通排放增量，为实现碳达峰、碳中和目标提供更强支撑。

4.3. 单位 GDP 碳排放

《成都统计年鉴》提供了成都市历年地区生产总值，根据上述公式(3)可以计算出成都市 2018~2022 年历年单位 GDP 碳排放，如下表 11 所示。

Table 11. Carbon emission intensity per unit GDP in Chengdu (2018~2022)
表 11. 2018~2022 成都市单位 GDP 碳排放

年份	地区生产总值(万元)	单位 GDP 碳排放(吨/万元)
2018	156,989,426	0.108
2019	170,106,620	0.106
2020	178,380,035	0.107
2021	199,623,149	0.103
2022	208,175,035	0.113

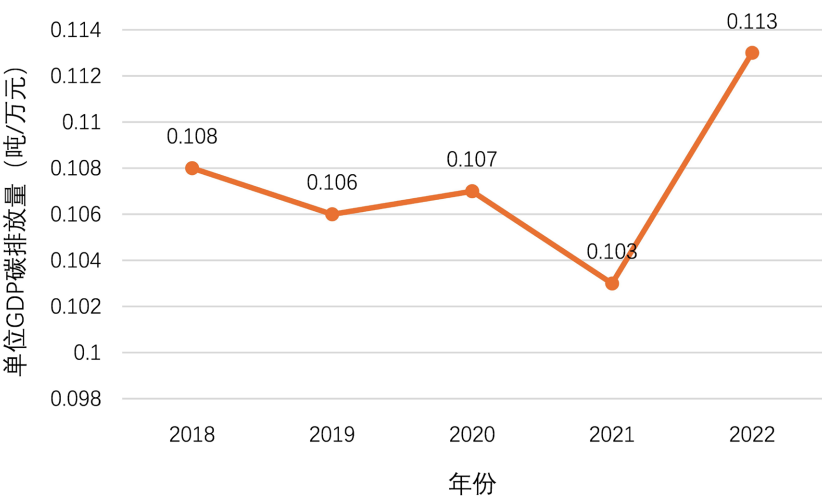


Figure 3. Trend of carbon emission intensity per unit GDP in Chengdu (2018~2022)
图 3. 2018~2022 年成都市单位 GDP 碳排放趋势

成都市单位 GDP 碳排放趋势如上图 3 所示，成都市地区生产总值在 2018~2022 年间持续增长，由 156,989,426 万元上升至 208,175,035 万元，体现出城市经济和消费市场的稳步扩张。与此相对应，成都市单位 GDP 碳排放整体呈现稳中有降的趋势，说明在经济规模不断扩大的同时，交通领域的排放效率逐渐改善，反映出交通结构优化、公共交通体系扩展以及新能源汽车推广等政策措施取得了一定成效。五年间单位 GDP 碳排放虽存在小幅波动，但总体变化不大，表明成都市在经济增长与碳排放控制之间保持了相对稳定的平衡。然而，2022 年单位 GDP 碳排放出现一定程度的回升，主要与疫情后经济活动恢复、城市交通需求快速反弹以及电商物流和即时配送需求大幅增长有关。特别是物流运输和配送车辆的高频运行，增加了交通领域的能源消耗，使碳排放出现阶段性上升。总体而言，成都市在提升经济质量的同时，交通领域碳排放强度逐步下降，但随着电商物流规模持续扩大、配送需求不断增长，未来仍需加强对城市配送体系的低碳化管理，以避免交通排放对经济效益改善形成抵消。

4.4. 基于测算结果的定量减排潜力

基于对成都市 2018~2022 年不同交通方式排放特征的测算，可以对主要低碳政策工具的潜在减排效果进行初步的量化评估，从而为政策选择提供更加明确的决策依据。具体结果如表 12 所示。首先，配送车辆新能源化是城市配送体系中减排潜力最大的政策方向。2022 年载货汽车碳排放量达到 914.50 万吨，若每年以 10%的比例将燃油货车替换为新能源车型，考虑到柴油货车与新能源货车之间约 60%的单位里程排放差异，可实现约 50~60 万吨 CO₂/年的减排，是目前城市配送环节最具规模化效应的措施。其次，

完善前置仓布局 and 构建共同配送体系能够有效减少城市末端配送里程。既有研究表明, 前置仓模式可降低 15%~25% 的配送距离。以成都 2022 年城配车辆总行驶里程 173.07 亿 km 为基数, 若按 20% 测算, 则可减少约 18~25 万吨 CO₂/年。第三, 通过路径优化算法提升配送效率也具备显著的减排空间。出租车与摩托车(部分承担即时配送与跑腿业务)在 2022 年的总排放量约为 60 万吨, 若通过订单聚合与路径优化提升 12% 的效率, 可减少约 7 万吨 CO₂/年。最后, 规范网约车参配业务同样具备可观的减排潜力。若通过政策手段使网约车承接配送订单量下降 20%, 按出租车碳排放量 38.16 万吨估算, 可减少约 7~8 万吨 CO₂/年。综合以上测算结果可见, 城市配送体系的结构优化在交通领域具有显著的整体减排潜力, 其中新能源货车替代与前置仓体系建设是最关键的两项政策支点, 而基于算法的智能调度与加强平台监管则可作为辅助性措施协同推进, 共同构建低碳高效的都市配送体系, 为成都市乃至其他大城市在电商驱动背景下实现交通领域碳减排提供可量化的路径依据。

Table 12. Estimation of emission reduction potential for low-carbon urban freight delivery policies
表 12. 城市配送低碳政策的减排潜力估算

政策措施	测算依据	年减排潜力(万吨 CO ₂)	说明
配送车辆新能源化替换	载货车排放 914.50 万吨; 10% 替换比例; 60% 减排	50~60	潜力最大, 为核心政策方向
前置仓与共同配送体系	行驶里程 173.07 亿 km; 减少 15%~25% 里程	18~25	组织模式优化效果显著
路径算法优化与订单聚合	出租车 + 摩托车排放 60 万吨; 效率提升 12%	≈7	平台算法优化的直接减排
网约车配送监管	网约车排放 38.16 万吨; 订单减少 20%	7~8	规范配送业务的结构性调节

4.5. 成都城市配送碳排放特征的城市间比较

为进一步凸显成都市城市配送碳排放的阶段特征, 有必要将研究结果与国内其他典型城市的研究结论进行比较。现有文献显示, 北京、上海、深圳、杭州等电商高度活跃城市均呈现“电商物流驱动的城市配送碳排放增长快于客运排放”的共同趋势。例如, 北京市近年网约车与即时配送车辆的行驶总里程增幅显著, 其中出租车及网约车的碳排放增长率高于传统客运方式; 上海在电商仓配体系布局加密背景下, 城配轻型货车排放成为增长最快的交通子部门; 深圳与杭州则因即时配送订单密度高, 摩托车与电动两轮车替代燃油摩托车后, 单位订单排放有所下降, 但配送频次扩大仍使总量维持增长。

与上述城市相比, 成都的排放结构呈现出以下差异化特征: 第一, 载货汽车排放占比更高。成都作为西部电商枢纽, 承担区域集散与干线连接功能, 城配货车保有量增速高于一线城市, 使载货汽车五年排放增长达 56%, 明显高于北京(约 30%)及上海(约 36%)的研究结果。第二, 出租车/网约车排放增幅突出。成都出租车碳排放五年增长超过 200%, 增速远高于深圳(约 80%)及杭州(约 60%), 其主要原因在于跑腿、代购、即时配送中大量使用网约车车辆, 使该类交通方式部分承担了物流职能。第三, 摩托车排放下降幅度更明显。成都实施区域限行政策后, 燃油摩托车大规模被电动两轮车替代, 使摩托车排放出现下降, 而北京、上海等城市因电动化已基本完成, 波动不明显。

综上, 成都在电商驱动的交通碳排放结构中兼具“区域物流枢纽”特征(货车排放高)与“即时配送平台城市”特征(出租车排放增幅高), 与一线城市相比具有独特性, 也为后续的分类减排策略提出了更明确的着力方向。

5. 结语

本文基于 2018~2022 年成都市道路交通碳排放数据, 构建“自下而上”测算模型, 系统分析了公共汽车、出租汽车、私人汽车、摩托车与载货汽车等五类交通方式的碳排放特征, 并结合电商物流与即时配送的发展趋势, 对城市配送体系的低碳化挑战进行了深入探讨。研究表明: 成都市道路交通碳排放总量在五年间由 1689.57 万吨上升至 2357.60 万吨, 增长约 40%, 呈持续攀升态势。

在不同交通方式中, 私人汽车和载货汽车是最主要的排放来源, 分别增长约 31% 和 56%。其中, 载货汽车排放的快速增长与近年来电商物流规模扩张、仓配体系完善以及即时配送需求上升密切相关, 已成为城市交通碳排放上升的重要推动力。出租汽车排放增幅超过 220%, 体现出共享出行与网约车配送业务兴起带来的额外交通负荷; 公共汽车排放相对稳定, 新能源化推广初见成效; 摩托车排放略有下降, 与外卖车辆电动化比重提升及城市交通管理政策有关。

从宏观指标看, 人均交通碳排放量由 1.14 吨/人上升至 1.50 吨/人, 五年增长 32%, 反映出人口规模扩大、居民消费需求增长以及电商配送车辆高频运行的共同作用。单位 GDP 碳排放虽呈缓慢下降趋势, 但 2022 年出现反弹, 说明经济恢复与物流运输需求上升对交通排放形成了阶段性压力。

上述结果表明, 在电子商务高速发展的背景下, 传统交通方式的排放结构正在发生新的变化, 城市配送活动已成为影响交通碳排放的重要变量。因此, 未来的交通碳减排政策应更加关注电商物流链条的碳排放控制。一方面, 应引导城配车辆电动化、推动共同配送、前置仓优化与路径算法调度, 降低“小批量、多频次”配送带来的排放压力; 另一方面, 应继续强化网约车平台监管、限制高排放车型使用, 并提高公共交通吸引力, 减轻道路交通整体负荷。

总体而言, 成都市在交通绿色转型方面已取得一定进展, 但面对电商物流与即时配送快速扩张带来的新挑战, 仍需从政策协同、技术创新和城市治理等多维度发力。本研究的测算与分析为城市在“双碳”目标背景下构建绿色配送体系和优化交通结构提供了实证参考, 也对其他大城市开展交通与电商融合下的碳排放治理具有一定借鉴意义。

基金项目

教育部, 教育部人文社会科学研究一般项目(24YJCZH147)出行即服务环境下城市居民低碳多模式出行链重构机理研究, 2024/10~2027/12。

参考文献

- [1] International Energy Agency (2023) CO₂ Emissions in 2022. IEA.
- [2] 田佩宁, 毛保华, 童瑞咏, 等. 我国交通运输行业及不同运输方式的碳排放水平和强度分析[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(3): 347-356.
- [3] 赵平, 李恺怀, 王玉华. 电子商务助力绿色经济发展的策略[J]. 学术交流, 2023(3): 130-141.
- [4] 岳立, 王昕冉. 国家电子商务示范城市试点政策对城市碳排放效率的影响[J]. 资源科学, 2024, 46(12): 2477-2490.
- [5] 徐毅, 姜长运. 城市的电商化转型能否推动低碳发展——基于国家电子商务示范城市的经验证据[J]. 调研世界, 2023(10): 31-44.
- [6] 周琪, 梁肖, 黄俊生, 等. 城市轨道交通碳排放效率与影响因素研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(1): 30-38+85.
- [7] 武翠芳, 熊金辉, 吴万才, 等. 基于 STIRPAT 模型的甘肃省交通碳排放测算及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 826-834.
- [8] 时朋飞, 王梦君, 陶春艳, 等. 长江经济带旅游业碳排放影响因素与峰值预测[J]. 统计与决策, 2023, 39(12): 90-95.

- [9] 田佩宁, 陈硕, 毛保华, 等. 新能源汽车对中国私家车碳排放的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(5): 88-98.
- [10] 沙爱敏, 陈婷, 吕凡任, 等. “双碳”目标下扬州交通碳排放量测算及分析[J]. 绿色科技, 2022, 24(15): 276-280.
- [11] 江辰星. 城市低碳交通测算模型及策略研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2023.
- [12] 刘博威, 刘晓佳, 张亦弛. 城市等级划分的交通碳排放影响因素分析[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2024, 29(2): 142-151.
- [13] 李洁, 《成都统计年鉴 2023》编辑委员会. 成都统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [14] 成都市统计局, 国家统计局成都调查队. 2022 年成都市国民经济和社会发展统计公报[N]. 成都日报, 2023-03-25(004).
- [15] 胡汉舟, 《中国能源统计年鉴 2023》编辑出版人员. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [16] 孙思. 四川省城市交通碳排放的政策仿真[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.