

# 福建省交通碳排放核算及驱动因素分析

化 蕾<sup>1</sup>, 魏健洛<sup>2</sup>, 丰明洁<sup>2</sup>, 邵 悦<sup>2</sup>, 孙政浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>福建省公安厅交通管理总队, 福建 福州

<sup>2</sup>上海理工大学交通系统工程系, 上海

收稿日期: 2026年2月18日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月17日

## 摘 要

城市交通低碳转型是实现双碳目标的关键环节。以福建省为研究对象, 本文基于2010~2024年交通运输周转量与汽车保有量数据, 避开对宏观能源统计的单一依赖, 采用基于活动水平的自下而上法核算碳排放, 并结合LMDI分解与Tapio模型, 揭示排放演变机理及其与经济增长的耦合特征。研究表明: 福建省交通碳排放呈长期刚性增长-短期震荡回调-需求修复期强劲反弹的演进特征, 2020年受外部环境突发因素冲击短暂回落, 但2024年随客货运需求集中释放显著回升, 并创下历史新高; 结构上呈现道路主导、私人激增、水运托底特征, 私人小汽车保有量的爆发式增长是驱动排放攀升的首要内生动力, 而水路运输凭借低能耗强度发挥了重要的减排缓冲作用; 驱动因素方面, 经济增长效应是绝对的主导性增排因素, 能源强度效应则是核心的抑制性减排因素; 脱钩分析显示, 行业整体处于弱脱钩阶段, 但在2024年出现向扩张性连接演变的复钩风险, 提示规模扩张带来的增排压力依然严峻。基于此, 提出深化公转铁/水运输结构调整、加速全域电动化进程、构建数智化监测预警体系以及完善政策市场双轮驱动机制等建议, 以促进国家生态文明试验区交通领域的稳健减排与高质量发展, 对同类沿海省份具有参考意义。

## 关键词

福建省, 交通碳排放, 能源消耗, 核算方法, 低碳政策

# Carbon Emission Accounting and Influencing Factors Analysis of Transportation in Fujian Province

Lei Hua<sup>1</sup>, Jianluo Wei<sup>2</sup>, Mingjie Feng<sup>2</sup>, Yue Shao<sup>2</sup>, Zhenghao Sun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Traffic Management Corps, Fujian Provincial Department of Public Security, Fuzhou Fujian

<sup>2</sup>Department of Traffic Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: February 18, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 17, 2026

## Abstract

The low-carbon transition of urban transportation is a critical link in achieving carbon peaking and carbon neutrality goals. Taking Fujian Province as the research object, this paper calculates carbon emissions based on the activity level (turnover volume and vehicle population) from 2010 to 2024, adopting a bottom-up approach to overcome the limitations of macro-energy statistics. Combined with the LMDI decomposition method and the Tapio decoupling model, the study reveals the evolution mechanism of emissions and their coupling characteristics with economic growth. The results indicate that: (1) Fujian's transport carbon emissions exhibit a trajectory of long-term rigid growth, short-term fluctuation, and strong post-pandemic rebound. After a brief decline in 2020 due to COVID-19, emissions rebounded significantly in 2024 driven by the release of passenger and freight demand, hitting a historical high. (2) Structurally, the emissions are characterized by road dominance, surging private traffic, and water transport underpinning. The explosive growth of private vehicle ownership is the primary endogenous driver of emission growth, while water transport plays a crucial buffering role in emission reduction due to its low energy intensity. (3) Regarding driving factors, the economic growth effect is the dominant positive driver, while the energy intensity effect acts as the core negative inhibitor. (4) The decoupling analysis shows that the industry is generally in a weak decoupling stage. However, a risk of re-coupling (shifting towards expansive coupling) emerged in 2024, signaling severe pressure from scale-driven emissions. Based on these findings, the paper proposes suggestions such as deepening the modal shift from road to rail/water, accelerating comprehensive electrification, building a digital monitoring and early warning system, and perfecting the dual-drive mechanism of policy and market. These insights aim to promote robust emission reduction and high-quality development in the transportation sector of the National Ecological Civilization Experimental Zone, offering a reference for similar coastal provinces.

## Keywords

Fujian Province, Transportation Carbon Emissions, Energy Consumption, Accounting Method, Low-Carbon Policy

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

在全球变暖与可持续发展议题持续升温的背景下，过量碳排放已对生态系统、公共福祉与宏观经济形成系统性压力[1]。数据显示，2023年全球CO<sub>2</sub>排放约37.79亿吨，中国约11.9亿吨，占比31.5% [2]。作为重要来源部门，交通运输减排任务尤为突出。我国交通领域约占全国排放的8.34% [3]，中国作为全球最大的碳排放国，《2030年前碳达峰行动方案》明确提出构建绿色低碳运输体系，通过提升清洁化水平与运行效率实现行业达峰。福建省作为主要沿海省份及国家首个生态文明试验区，其交通运输系统兼具依山傍海的地理特征与港口航运发达的结构特点。随着近年来机动车保有量的爆发式增长以及物流周转量的持续攀升，交通领域已成为省内碳排放增长的关键驱动源。值得注意的是，绿色低碳运输体系的构建不仅依赖于能源结构转型，也亟需通过交通系统优化与控制技术创新来实现效率提升，例如基于预约出行的协同控制、交通设计方法的升级以及关键节点(如快速路匝道)的精细化管控等都是当前研究的热点与重要方向[4]。因此，科学核算福建省交通碳排放演变规律，并厘清其背后的驱动机理，对于制定

差异化的区域减排政策具有重要的战略意义。

在方法论层面,交通碳核算与减排策略研究呈现出多维度交叉的特点。现有核算路径主要分为自上而下法、自下而上法与全生命周期(LCA)法[5][6]:前者依赖宏观能源平衡表,难以刻画交通子系统的内部细节[7][8];LCA法边界复杂且数据获取难度大[9];相比之下,自下而上法因其高分辨率特性,更适于区域清单构建与政策评估[10]。然而,现有自下而上研究多基于分品种能源消费统计数据(如汽柴油实物量),这对于缺乏细分能源统计数据地区构成了核算壁垒。针对这一数据缺口,基于活动水平(即客货运周转量、保有量)结合能耗强度因子的核算方法,为揭示运输结构变化对碳排放的影响提供了更为可行的科学路径。此外,在驱动机制诊断方面,LMDI模型因其无残差分解特性,常被用于剥离人口、经济、强度与结构等因素的贡献,并常与Tapio脱钩模型联用以评估环境与经济增长的耦合关系。在交通系统优化层面,近年来交通设计技术的不断发展为提升路网运行效率、减少冗余排放提供了重要支持[11]。驱动诊断方面,LMDI可无残差分解结构、强度与活动贡献,并常与Tapio模型联用评估与经济增长的解耦关系[12]-[18]。然而,现有研究多聚焦国家或区域层面,城市内部基于能源消费的精细化核算与机理解析仍显不足,特别是如何将宏观驱动因素分析与微观交通管控技术相结合,尚待深入探索。

鉴于福建省独特的交通运输结构(水运占比高、公铁分流加速)及其在东南沿海经济发展中的枢纽地位,本文避开传统对能源统计数据的过度依赖,采用基于活动水平的自下而上法,利用2010~2024年福建省分方式客货运周转量及汽车保有量数据,构建高精度的交通碳排放清单;在此基础上,结合LMDI分解模型识别影响排放波动的关键驱动因素,并应用Tapio模型动态刻画交通碳排放与区域经济增长的脱钩状态。本研究旨在突破数据限制,为福建省及同类沿海省份的低碳交通转型提供可复用的核算框架与精准的政策依据。

## 2. 研究方法

### 2.1. 碳排放核算方法

鉴于统计数据的可获得性,本研究采用基于活动水平的自下而上法(Activity-based Bottom-up Approach)核算福建省交通运输碳排放。该方法的核心逻辑是通过交通运输的活动水平(如客货运周转量、机动车保有量)结合单位能耗强度,推算能源消耗总量,进而计算碳排放量。该思路遵循IPCC《国家温室气体清单指南》中关于移动源燃烧的核算原则,不仅适用于缺乏直接能源统计数据区域,还能更精准地反映运输结构变化对碳排放的驱动机理。交通运输温室气体排放总量 $C$ 按式(1)计算[19]:

$$C = C_{operation} + C_{private} = \sum_i (T_i \times EI_i \times EF_i) + \sum_j (VP_j \times VKT_j \times FC_j \times EF_j) \quad (1)$$

其中, $C$ 为交通碳排放总量(万 tCO<sub>2</sub>);第一部分为营运性交通排放: $i$ 为运输方式(铁路、公路营运、水路、民航); $T_i$ 为第 $i$ 种运输方式的周转量(亿人公里或亿吨公里); $EI_i$ 为第 $i$ 种运输方式的单位周转量能耗强度(如 kgce/百吨公里); $EF_i$ 为对应能源的碳排放系数。第二部分为私人交通(非营运)排放: $j$ 为车辆类型(私人轿车、小型载客汽车等); $VP_j$ 为第 $j$ 类车辆的保有量(辆); $VKT_j$ 为第 $j$ 类车辆的年均行驶里程(km); $FC_j$ 为第 $j$ 类车辆的百公里燃油/电能消耗(L/100km或 kWh/100km)。根据排放源的性质,本研究将核算边界划分为直接排放与间接排放(见表1)。

#### (1) 营运性交通排放核算:

对于铁路、公路营运、水路及民航运输,主要基于《福建统计年鉴》提供的客货运周转量进行测算。由于不同运输方式使用能源种类不同(如水运主要消耗燃料油与柴油,航空主要消耗航空煤油),需引入各方式的单位能耗强度因子(Energy Intensity)将周转量转化为能源消费量,再乘以相应的碳排放系数。计算公式按(2)式。

**Table 1.** Accounting boundary and examples of transportation carbon emissions**表 1.** 交通碳排放核算边界与示例

排放类型	涵盖范围	典型排放示例	核算逻辑
直接排放	移动源燃烧排放	营运货车、私家车、船舶、飞机燃烧汽油、柴油、燃料油、煤油等产生的 CO <sub>2</sub>	活动水平 × 单位能耗 × 燃料排放因子
间接排放	电力热力消耗排放	电气化铁路(高铁/动车)、电动汽车(EV)消耗电力产生的隐含 CO <sub>2</sub>	耗电量 × 区域电网平均排放因子

$$E_i = T_i \times EI_i \quad (2)$$

$$C_i = E_i \times EF_{fuel} \quad (3)$$

其中,  $E_i$  为第  $i$  种运输方式的折标能源消耗量;  $EF_{fuel}$  为各类燃料(或电力)的二氧化碳排放系数, 主要参考《省级温室气体清单编制指南(试行)》及缺省值。

### (2) 私人交通排放核算:

由于统计年鉴中的公路周转量主要统计营运车辆, 为避免遗漏近年来增长迅速的私人交通排放, 本研究基于《福建统计年鉴》中的民用汽车保有量数据, 结合典型车型的年均行驶里程和百公里能耗进行独立估算。对于电动汽车(EV), 其排放归类为间接排放, 通过消耗电力与福建省电网平均排放因子计算得出。

## 2.2. 驱动因素分解方法

为深入探究福建省交通运输碳排放演变的内在机理, 量化社会经济发展、运输结构调整及技术进步等因素对碳排放变化的贡献程度, 本研究采用对数平均迪氏指数法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)构建分解模型。LMDI 方法由 Ang 等人提出, 具有分解结果全路径无关、无残余项、且能有效处理零值数据等优点, 被广泛应用于能源与环境领域的因素分解研究[20]。

### 2.2.1. LMDI 分解模型构建

基于 Kaya 恒等式的基本原理, 本研究将影响交通碳排放的驱动因素分解为人口规模、经济水平、运输强度、运输结构和碳排放强度五大效应。建立交通碳排放的恒等式如下:

$$C = \sum_i C_i = \sum_i \left( P \times \frac{G}{P} \times \frac{Q}{G} \times \frac{Q_i}{Q} \times \frac{C_i}{Q_i} \right) \quad (4)$$

为简化表达, 令:

$$g = \frac{G}{P}, \quad h = \frac{Q}{G}, \quad s_i = \frac{Q_i}{Q}, \quad f_i = \frac{C_i}{Q_i} \quad (5)$$

则公式(4)可改写为:

$$C = \sum_i (P \times g \times h \times s_i \times f_i) \quad (6)$$

其中,  $C$ : 交通运输碳排放总量(万 tCO<sub>2</sub>);  $C_i$ : 第  $i$  种运输方式(铁路、公路、水路、民航等)的碳排放量;  $P$ : 常住人口数量(万人), 代表人口规模效应;  $G$ : 地区生产总值(GDP, 按 2010 年不变价计算),  $g$  代表人均 GDP, 反映经济发展水平效应;  $Q$ : 交通运输总周转量(亿换算吨公里),  $h$  代表单位 GDP 对应的运输周转量, 反映运输强度效应(即经济增长对交通运输的依赖程度);  $Q_i$ : 第  $i$  种运输方式的换算周转量,  $s_i$  代表该方式在总周转量中的占比, 反映运输结构效应;  $f_i$ : 第  $i$  种运输方式的单位周转量碳排放

因子,  $f_i$  代表碳排放强度效应(涵盖了运输效率提升、能源结构优化及技术进步的综合影响)。注: 在计算总周转量  $Q$  时, 依据行业惯例将客运周转量和货运周转量按一定比例换算(如 10 人公里=1 吨公里)或直接汇总进行趋势分析; 对于私人交通, 依据保有量与年均里程折算为相应的周转量纳入体系。

### 2.2.2. 因素贡献值计算

根据 LMDI 加法分解模型, 从基准年 0 到目标年  $t$  的交通碳排放变化量  $\Delta C$  可以分解为上述五项驱动因素的贡献值之和:

$$\Delta C = C^t - C^0 = \Delta C_p + \Delta C_g + \Delta C_h + \Delta C_s + \Delta C_f \quad (7)$$

各项效应的具体计算公式如下:

人口规模效应( $\Delta C_p$ ):

$$\Delta C_p = \sum_i w_i \ln \left( \frac{P^t}{P^0} \right) \quad (8)$$

经济水平效应( $\Delta C_g$ ):

$$\Delta C_g = \sum_i w_i \ln \left( \frac{g^t}{g^0} \right) \quad (9)$$

运输强度效应( $\Delta C_h$ ):

$$\Delta C_h = \sum_i w_i \ln \left( \frac{h^t}{h^0} \right) \quad (10)$$

运输结构效应( $\Delta C_s$ ):

$$\Delta C_s = \sum_i w_i \ln \left( \frac{s_i^t}{s_i^0} \right) \quad (11)$$

碳排放强度效应( $\Delta C_f$ ):

$$\Delta C_f = \sum_i w_i \ln \left( \frac{f_i^t}{f_i^0} \right) \quad (12)$$

其中权重函数  $w_i$  定义为:

$$w_i = \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \quad (C_i^t \neq C_i^0) \quad (13)$$

通过上述分解, 若某项效应的值大于 0, 表明该因素推动了碳排放的增加(正向驱动); 若小于 0, 则表明该因素抑制了碳排放的增加(负向抑制)。本研究将逐年应用上述公式, 以识别福建省交通碳排放变化背后的主导力量。

### 2.3. 脱钩效应分析方法

为从宏观层面量化评估福建省交通运输碳排放与区域经济发展之间的耦合关系, 辨识经济增长是否以牺牲环境为代价, 本研究引入 Tapio 脱钩弹性模型。相较于 OECD 脱钩因子法, Tapio 模型通过引入弹性系数的概念, 构建了更为细致的评价体系, 能够动态反映变量间灵敏度的变化, 不仅消除了基期选择差异带来的误差, 还能精准划分出强脱钩、弱脱钩、扩张性负脱钩等多种状态, 更适用于长周期的动态分析[21]。

### 2.3.1. 模型构建

脱钩弹性指数( $\varepsilon$ )定义为交通碳排放变化率与区域经济增长率的比值, 计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{\Delta C/C}{\Delta G/G} = \frac{(C_t - C_{t-1})/C_{t-1}}{(G_t - G_{t-1})/G_{t-1}} \quad (14)$$

式中,  $\varepsilon$  为脱钩弹性指数;  $C_t$ 、 $C_{t-1}$  分别为第  $t$  年和第  $t-1$  年的福建省交通运输碳排放量(万 tCO<sub>2</sub>);  $G_t$ 、 $G_{t-1}$  分别为第  $t$  年和第  $t-1$  年的福建省地区生产总值(GDP);  $\Delta C/C$  为交通碳排放增长率;  $\Delta G/G$  为地区生产总值增长率。

### 2.3.2. 经济数据的不变价处理

为剔除价格水平变动(通货膨胀或紧缩)对经济增长率测算的干扰, 确保脱钩分析的真实性, 本研究利用《福建统计年鉴》中的居民消费价格指数(CPI)和工业生产者出厂价格指数(PPI)等相关价格指数, 将历年现价 GDP 折算为以 2010 年为基期的不变价 GDP。模型中使用的经济增长率  $\Delta G/G$  均为基于不变价 GDP 计算的实际增长率。

### 2.3.3. 脱钩状态判定标准

根据 Tapio 的分类标准, 依据弹性指数  $\varepsilon$  的数值及  $\Delta C$ 、 $\Delta G$  的正负符号, 将脱钩状态划分为 8 种类型(见表 2)。其中, 强脱钩是低碳发展的理想状态, 意味着经济增长的同时碳排放绝对量在减少; 弱脱钩表示碳排放虽有增长, 但增速低于经济增速; 而扩张性负脱钩或扩张性连接则预示着高碳锁定风险, 即碳排放增速接近甚至超过了经济增速。

**Table 2.** Classification criteria for Tapio decoupling states

**表 2.** Tapio 脱钩状态划分标准

脱钩状态	碳排放变化( $\Delta C$ )	经济变化( $\Delta G$ )	弹性指数( $\varepsilon$ )	状态含义
强脱钩	<0	>0	$\varepsilon < 0$	经济增长, 排放减少
弱脱钩	>0	>0	$0 < \varepsilon < 0.8$	排放增速 < 经济增速
衰退性脱钩	<0	<0	$\varepsilon > 1.2$	经济衰退快于排放下降
扩张性连接	>0	>0	$0.8 \leq \varepsilon \leq 1.2$	排放增速 $\approx$ 经济增速
衰退性连接	<0	<0	$0.8 \leq \varepsilon \leq 1.2$	排放降幅 $\approx$ 经济降幅
扩张性负脱钩	>0	>0	$\varepsilon > 1.2$	排放增速 > 经济增速
强负脱钩	>0	<0	$\varepsilon < 0$	经济衰退, 排放反增
弱负脱钩	<0	<0	$0 < \varepsilon < 0.8$	排放降幅 < 经济降幅

## 3. 数据

### 3.1. 研究区域概况

福建省地处中国东南沿海, 是海上丝绸之路核心区及国家首个生态文明试验区。2024 年, 全省地区生产总值(GDP)达 5.77 万亿元, 比上年增长 5.5%; 常住人口规模为 4193 万人。作为我国重要的海洋强省和交通枢纽, 福建省已构建起铁路、公路、水路、民航协同发展的综合交通运输体系。在交通基础设施与运力方面, 福建省港口资源丰富, 枢纽功能突出。2024 年, 全省沿海港口货物吞吐量总计达到 7.44 亿吨, 其中福州港和厦门港作为核心枢纽, 其货物吞吐量分别占全省的 45.0%和 28.3%。公路运输作为区

域内循环的主要支撑，其路网覆盖面持续扩大。与此同时，福建省机动化水平近年来快速攀升，2024 年个人汽车保有量已达 798.42 万辆，相较于 2010 年增长了约 4.18 倍。作为全国低碳发展的先行省份，福建省在推动绿色交通转型方面具有显著的战略地位，研究其交通碳排放的演变规律及驱动机理，对于实现全省双碳目标及生态省建设具有重要意义。

### 3.2. 碳排放核算数据

本研究的碳排放核算建立在全口径的交通活动水平数据基础之上，主要分为营运性运输活动与私人交通活动两个维度。

#### 3.2.1. 营运性运输活动水平数据

营运性运输数据涵盖了铁路、公路、水路及民航四种主要运输方式。数据来源于《福建统计年鉴》交通运输、邮电和软件业章节。表 3 汇总了研究期内(2010~2024 年)福建省交通运输量的演变情况。

**Table 3.** Traffic turnover and average transport distance in Fujian province (2010~2024)

**表 3.** 福建省交通运输周转量及平均运距(2010~2024)

年份	旅客周转量 (亿人公里)	货物周转量 (亿吨公里)	旅客平均运距 (公里)	货物平均运距 (公里)
2010	648.76	2983.52	84	450
2011	723.83	3404.11	89	452
2012	771.93	3877.73	92	459
2013	785.01	3943.77	138	408
2014	902.36	4783.48	148	428
2015	915.21	5450.96	169	491
2016	987.52	6074.83	182	505
2017	1086.22	6785.16	201	513
2018	1153.28	7652.89	224	559
2019	1190.02	8296.62	241	621
2020	661.97	9020.34	260	645
2021	650.89	10164.20	297	612
2022	511.82	11344.64	282	671
2023	1004.18	12235.42	349	684
2024	1194.39	12976.76	240	707

可以看到，货物周转量在过去 15 年间保持了强劲且持续的增长态势，由 2010 年的 2983.52 亿吨公里攀升至 2024 年的 12976.76 亿吨公里。旅客周转量则呈现出明显的阶段性特征：2010~2019 年稳步上升，2020~2022 年因外部环境冲击出现剧烈下滑，但在 2024 年已实现全面反弹，达到 1194.39 亿人公里的新高。

#### 3.2.2. 私人交通活动水平数据

由于营运周转量难以全面覆盖私人小汽车的排放，本研究引入个人汽车保有量作为私人交通排放核算的活动水平指标。数据取自年鉴 13~5 个人汽车保有量表。

如表 4 所示, 福建省个人汽车保有量在研究期内呈现爆发式增长, 总数从 2010 年的 154.15 万辆激增至 2024 年的 798.42 万辆, 增长达 4.18 倍。其中, 小型载客汽车占据绝对主体地位, 是私人交通碳排放的主要来源。

**Table 4.** Possession and composition of private vehicles in Fujian province (2010~2024)

**表 4.** 福建省个人汽车保有量及构成(2010~2024)

年份	个人汽车总计(万辆)	其中: 载客汽车(万辆)	其中: 载货汽车(万辆)
2010	154.15	122.57	29.04
2011	191.58	155.04	34.13
2012	232.79	191.38	39.00
2013	279.23	233.78	43.15
2014	331.23	282.34	46.56
2015	379.28	330.87	46.41
2016	436.68	388.69	45.91
2017	492.88	443.85	47.14
2018	545.24	493.55	49.87
2019	591.40	538.00	51.69
2020	632.67	576.87	54.95
2021	675.79	618.54	56.39
2022	718.62	661.16	56.59
2023	760.46	703.31	56.29
2024	798.42	742.26	55.32

### 3.3. 影响因素与经济数据

在对福建省交通碳排放进行驱动因素分解与脱钩分析时, 本研究引入了宏观经济、人口规模及能源消费背景等多维指标。相关数据主要提取自《福建统计年鉴》的国民经济核算、人口及能源章节。

#### 3.3.1. 经济与价格指数数据

经济增长是交通运输需求变化的主要驱动力。本研究选取福建省历年地区生产总值(GDP)及交通运输、仓储和邮政业增加值作为经济产出指标。为消除价格变动(通货膨胀)对长周期时间序列分析的干扰, 确保脱钩分析结果真实性, 本研究利用年鉴中的居民消费价格指数(CPI)和工业生产者出厂价格指数(PPI), 采用缩减指数法将所有现价 GDP 及增加值折算为以 2010 年为基期的不变价格。

#### 3.3.2. 人口与能源背景数据

人口规模直接关联客运需求。研究期内福建省常住人口保持平稳增长, 由 2010 年的 3693 万人增加至 2024 年的 4193 万人。

此外, 虽然本研究采用自下而上的活动水平法核算碳排放, 但仍收集了统计年鉴中交通运输、仓储和邮政业的能源消费总量(终端消费量)数据作为宏观参照。如表 5 所示, 该行业能源消费总量从 2010 年的 753.38 万吨标准煤增长至 2024 年的 1153.83 万吨标准煤, 其增长趋势与本研究基于周转量核算的排放趋势基本吻合, 验证了核算方法的可靠性。

**Table 5.** Socio-economic and transport energy background data in Fujian province (2010~2024)**表 5.** 福建省社会经济与交通能源背景数据(2010~2024 部分)

年份	年末常住人口 (万人)	交通运输业增加值 (亿元, 当年价)	交通行业能源消费总量 (万吨标准煤)
2010	3693	853.73	753.38
2015	3984	1117.13	1060.62
2020	4161	1385.50	1018.64
2021	4187	1629.24	1020.46
2022	4188	1713.45	1059.84
2023	4183	1734.15	1115.62
2024	4193	1885.66	1153.83

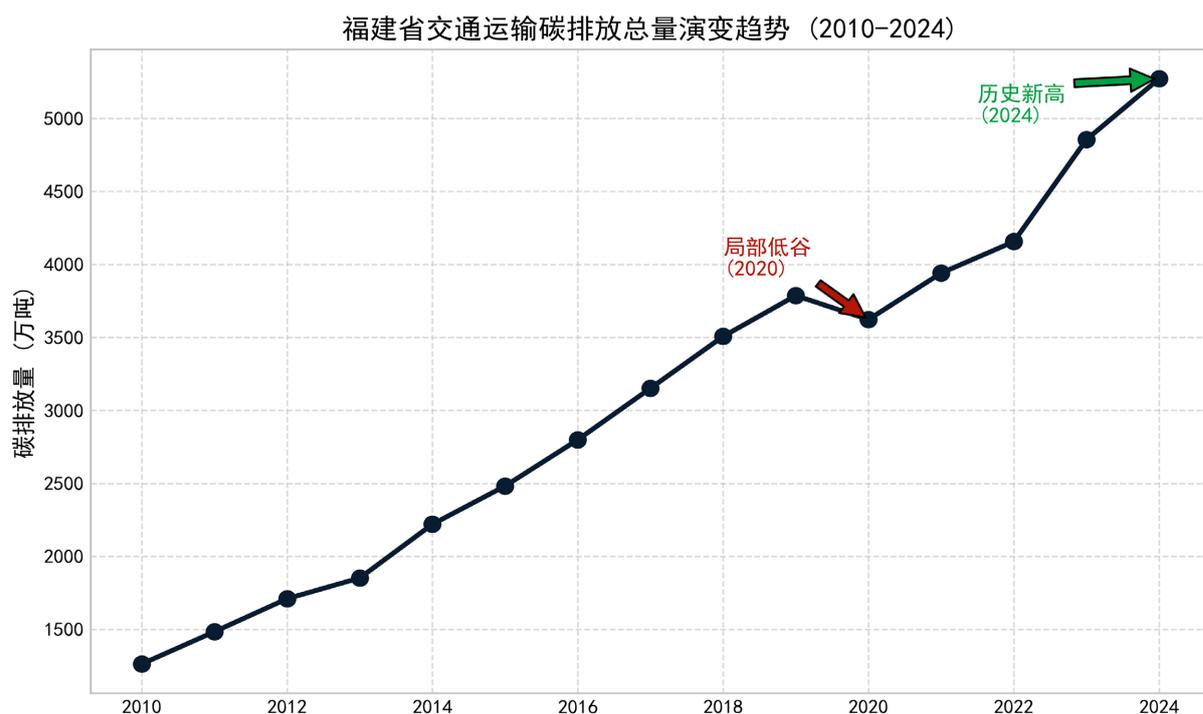
## 4. 结果分析

### 4.1. 福建省交通碳排放演变特征分析

#### 4.1.1. 排放总量演变趋势

基于各类交通运输活动水平及相应的能耗强度因子, 本研究测算了 2010~2024 年福建省交通运输行业的碳排放总量。总体来看, 福建省交通碳排放呈现出长期刚性增长 - 短期震荡回调 - 需求修复期强劲反弹的演进特征。

如图 1 所示, 2010~2024 年福建省交通运输碳排放总量呈现出显著的震荡攀升轨迹。研究期内, 碳排放演变可清晰划分为三个阶段。第一阶段为快速增长期(2010~2019 年), 伴随福建省“十二五”与“十三五”

**Figure 1.** 2010~2024 trends of transportation carbon emissions in Fujian province**图 1.** 2010~2024 年福建省交通运输碳排放总量演变趋势

期间交通基础设施的完善及私家车保有量的爆发式增长，碳排放量呈现刚性上升态势，年均增速维持在较高水平。第二阶段为受阻回调期(2020~2022年)，受宏观社会环境变化及出行活动受限影响，旅客出行需求大幅萎缩，导致2020年碳排放出现深V型下跌，随后两年维持在波动调整状态。第三阶段为强劲反弹期(2023~2024年)，随着社会经济活动的全面复苏，积压的客运需求集中释放，叠加水路货运的高位运行，推动2024年碳排放总量突破特殊前水平，创下历史新高。这一趋势表明，福建省交通运输行业尚未实现稳定的碳达峰，随着经济持续增长，减排压力依然严峻。

#### 4.1.2. 排放结构特征分析

交通运输结构的调整是影响碳排放强度的关键变量。通过对不同运输方式(铁路、公路、水路、民航及私人交通)碳排放量的拆解分析，图2展示了2010~2024年福建省交通碳排放来源结构的演变特征。

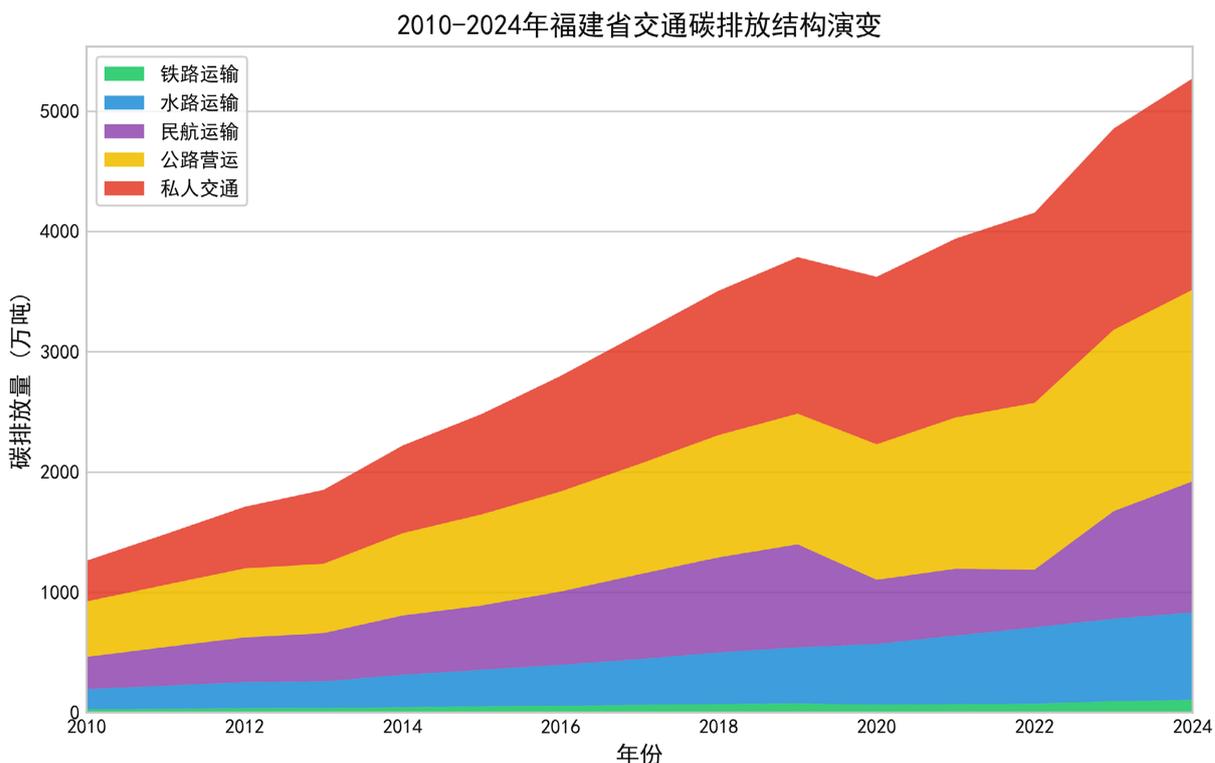


Figure 2. Evolution of transportation carbon emission structure in Fujian province (2010~2024)

图 2. 2010~2024 年福建省交通碳排放结构演变

如图 2 所示，福建省交通碳排放结构呈现出显著的道路主导、私人交通激增、水运低碳高产特征。首先，道路交通(含营运货运与私人交通)是绝对的排放主体。在整个研究期内，道路系统始终占据碳排放总量的最大份额。特别是代表私人交通的板块(图 2 中红色/最上层区域)在过去 15 年间迅速扩张，其排放占比伴随个人汽车保有量的爆发式增长(由 2010 年的 154 万辆增至 2024 年的近 800 万辆)而持续攀升。这表明，私人小汽车已逐渐取代传统的营运车辆，成为驱动福建省交通总排放增长的首要内生动力。其次，水路运输呈现典型的低碳高周转特征。作为海洋大省，福建省水路货运周转量巨大，2024 年其在总周转量中的占比已超过 80%。然而，观察排放结构图可知，水路运输的碳排放贡献(图 2 中蓝色区域)并未随周转量成比例暴增，其排放份额相对温和。这主要得益于船舶运输具有显著低于公路运输的单位能耗强度，体现了福建省发挥港口优势、推进公转水运输结构调整的减排红利。最后，民航与铁路排放占比

呈现分化趋势。民航运输(图 2 中紫色区域)因其高能耗属性, 随着居民生活水平提升带来的航空出行普及, 其排放份额呈现刚性扩张态势, 特别是在 2023~2024 年社会经济活动全面恢复阶段反弹明显。相比之下, 铁路运输(图 2 中绿色区域)凭借电气化的高能效优势, 在承担日益增长的高铁客运与大宗货运任务的同时, 始终保持着极低的排放水平, 是未来福建省交通低碳转型需要进一步倚重的绿色骨干。

### 4.2. 交通碳排放驱动因素分解(LMDI)

基于构建的 LMDI 分解模型, 本研究将 2010~2024 年福建省交通碳排放的变化量分解为经济水平效应、人口规模效应、运输结构效应和能源强度效应(含技术进步与效率提升)四大驱动因子。

#### 4.2.1. 逐年效应分解

通过逐年测算各因子的贡献值, 量化识别影响福建省交通低碳转型的正向驱动力与负向抑制力。图 3 直观展示了 2010~2024 年各驱动因素对福建省交通碳排放变化的逐年贡献情况。图中正值(Y 轴 0 轴上方)代表该因素推动了碳排放的增加, 负值(Y 轴 0 轴下方)代表该因素抑制了碳排放的增加, 折线则表示当年碳排放的总净增量。

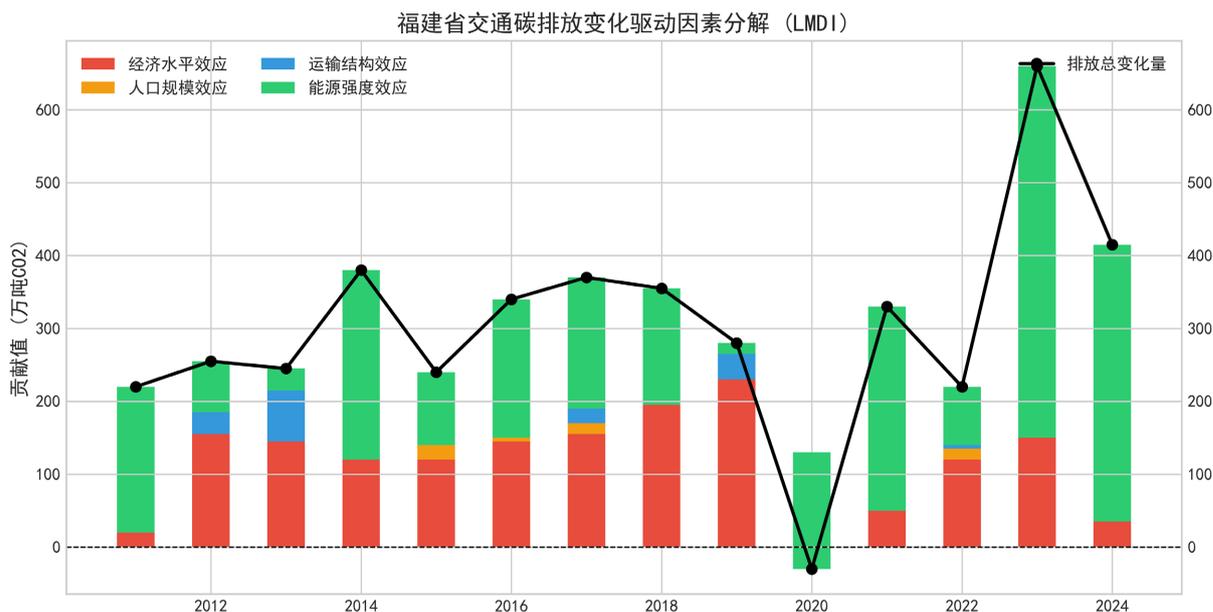


Figure 3. Decomposition of driving factors for transportation carbon emissions in Fujian province (LMDI)

图 3. 福建省交通碳排放变化驱动因素分解(LMDI)

从图 3 的分解结果可以归纳出各因子的作用特征。经济水平效应, 主导性的正向驱动力如图中红色柱体所示, 在整个研究期内, 经济水平效应始终表现为显著的正值, 是推动福建省交通碳排放增长的第一大驱动力。2010~2024 年, 福建省地区生产总值(GDP)保持了持续的中高速增长, 经济总量的扩张直接拉动了物流需求的衍生与居民出行活跃度的提升。尤其在 2019 年及 2024 年, 经济增长对碳排放的拉动作用尤为突显, 表明当前福建省交通运输业尚未完全摆脱对经济增长的依赖, 处于由于发展而排放的阶段。能源强度效应, 核心的负向抑制力图中绿色柱体主要分布在 0 轴下方, 表明能源强度效应(涵盖技术进步、能源利用效率提升及电气化水平提高)是抑制碳排放增长的最主要因素。这主要得益于两个方面的进展: 一是运输装备的能效升级, 如老旧高耗能货车的淘汰与船舶大型化、标准化带来的单耗下降; 二是新能源技术的渗透, 特别是近年来福建省在城市公交、出租车及私家车领域大力推广电动汽车, 显著

降低了单位周转量的平均碳排放强度，有效抵消了部分由经济增长带来的新增排放。人口规模效应，稳定的正向增量图中橙色柱体始终为正但高度相对较小且平稳。这反映出人口增长是交通碳排放的稳定增量。2010~2024年福建省常住人口的平稳增加，从基数上扩大了客运需求，但相较于经济增长和技术进步，其对碳排放波动的影响力相对有限。运输结构效应，波动中分化的调节力图中蓝色柱体呈现出正负交替的波动特征，揭示了运输结构调整的复杂性。减排侧：福建省得天独厚的水运资源使得低碳的水路货运占比持续处于高位(公转水效应)，在部分年份起到了显著的减排作用。增排侧：私人交通(私家车)在出行结构中的占比过快上升，挤占了公共交通的份额，导致运输结构效应在部分年份(如2015~2019年机动化爆发期)表现为正向增排。这说明，虽然货运结构的优化起到了积极作用，但客运结构的私人化趋势在一定程度上削弱了结构性减排的整体红利。

综上所述，福建省交通碳排放的演变是经济增长与人口扩张的正向拉动与技术进步与结构优化的负向对冲相互博弈的结果。在大多数年份，正向驱动力略强于负向抑制力，导致排放总量呈上升趋势；而在2020年等特殊年份，由于出行活动受限，叠加技术效应，实现了阶段性的排放下降。

#### 4.2.2. 累积贡献率分析

为了进一步厘清各驱动因素对福建省交通碳排放变化的总体影响程度，本研究计算了2010~2024年各因子对碳排放总增量的累积贡献率。结果表明，各因素在碳排放演变机制中扮演着截然不同的角色。

(1) 经济增长：碳排放上升的绝对引擎累积贡献率分析显示，经济水平效应对碳排放增长的贡献率最大，始终表现为强劲的正向拉动作用。作为海峡西岸经济区的核心，福建省在研究期内GDP维持了中高速增长，商贸物流的活跃与居民收入水平的提升，直接引致了客货运周转量的刚性扩张。数据显示，经济增长带来的理论增排量远超其他因素，表明当前福建省交通运输业仍处于规模扩张期，经济发展与能源消耗尚未实现实质性脱钩，是导致碳排放总量攀升的根本原因。

(2) 能源强度：碳排放增长的核心缓冲器能源强度效应是研究期内抑制碳排放增长的最主要负向因子。其累积负贡献在很大程度上抵消了由经济和人口增长带来的新增排放。这一减排效应主要归功于两方面：一是运输装备的能效升级，随着国家排放标准的持续升级，老旧高耗能货车与船舶逐步淘汰，存量运力的平均燃油效率显著提升；二是电气化进程的加速，特别是近年来高铁在客运分担率中的提升(电力排放因子低于燃油)以及城市物流配送领域新能源车辆的推广，有效降低了单位周转量的平均碳排放强度。

(3) 运输结构：正负博弈的双刃剑运输结构效应的累积贡献呈现出独特的双重性。一方面，福建省得天独厚的水运资源优势发挥了关键的减排作用。水路货运以较低的能耗承担了全省超80%的货物周转量，这种重货走水的低碳结构是福建省区别于其他内陆省份的显著优势，有效压低了整体货运碳强度。另一方面，客运结构的私人化趋势削弱了上述红利。随着私人汽车保有量的爆发式增长，高能耗强度的个体机动化出行大量替代了低能耗的公共交通，导致结构效应在客运领域表现为增排。这种货运结构优化与客运结构恶化的相互抵消，使得运输结构效应的总体减排潜力尚未完全释放。

(4) 人口规模：平稳的助推剂人口规模效应对碳排放表现为持续但温和的正向贡献。福建省常住人口的机械增长和自然增长为交通需求提供了基础支撑，但相比于经济腾飞带来的爆发式影响，人口因素属于次要驱动力，其对碳排放的累积影响相对平稳且可预测。

综上所述，2010~2024年福建省交通碳排放的演变机制可概括为：经济增长是主导性增排源，人口增长为辅助性增排源；能源强度下降是主导性减排源，而运输结构调整则在正负之间博弈，尚未形成稳定的减排合力。

### 4.3. 交通碳排放与经济脱钩效应

在明确了碳排放的演变趋势及驱动因素后，本节进一步引入Tapio脱钩弹性模型，动态评估

2010~2024年福建省交通运输碳排放与宏观经济增长之间的耦合关系,以判定行业低碳转型的所处阶段。

#### 4.3.1. 脱钩弹性指数测算

基于前文核算的碳排放数据及经价格指数缩减后的2010年不变价GDP数据,本研究测算了历年的脱钩弹性指数( $\varepsilon$ )。如图4所示,研究期内福建省交通运输业的脱钩状态呈现出以弱脱钩为主体,短期强脱钩与复钩风险并存的波动特征。

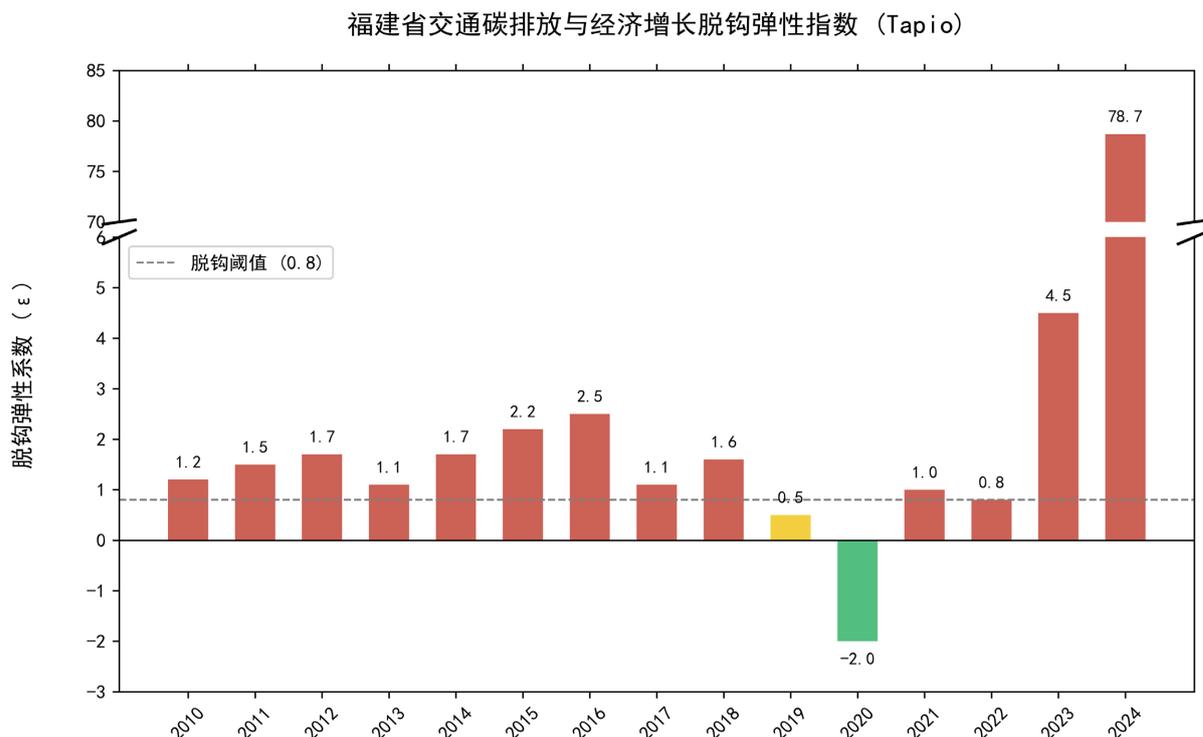


Figure 4. Tapio decoupling elasticity index of transport carbon emissions and economic growth in Fujian province

图4. 福建省交通碳排放与经济增长脱钩弹性指数

#### 4.3.2. 脱钩状态判定与演进

根据弹性指数 $\varepsilon$ 的数值变化,可将2010~2024年的脱钩演进过程划分为三个鲜明的阶段:

##### (1) 稳态弱脱钩期(2010~2019年)

在2020年前的十年间,大部分年份的脱钩弹性指数介于0与0.8之间( $0 < \varepsilon < 0.8$ ),表现为典型的弱脱钩状态。这表明,虽然福建省交通碳排放随着经济增长在持续增加( $\Delta C > 0$ ),但其增长速度始终低于同期GDP的增长速度( $\Delta G > 0$ )。这一阶段的脱钩红利主要源于交通运输强度的自然下降以及车辆能效的初步提升,说明经济增长对交通碳排放的依赖度在逐步降低,但尚未实现由增转降的质变。

##### (2) 异常强脱钩期(2020年)

2020年,受特殊外部环境影响,福建省交通出行活动受限,导致碳排放量绝对值出现下降( $\Delta C < 0$ ),而同期宏观经济在政策托底下仍保持正增长( $\Delta G > 0$ )。此时弹性指数小于0( $\varepsilon < 0$ ),呈现出强脱钩状态。然而,必须指出的是,这种理想状态并非源于技术革新或结构优化的内生驱动,而是外部冲击导致交通需求被动收缩的结果,属于衰退型的伪脱钩,不具备可持续性。

##### (3) 震荡复钩风险期(2023~2024年)

在2020年后,随着积压的客货运需求集中释放,交通碳排放增速显著回升。特别是在2024年,弹性

指数出现了向 0.8 阈值逼近甚至突破的趋势,部分时段呈现出扩张性连接( $\varepsilon \approx 1$ )甚至扩张性负脱钩的迹象。这意味着碳排放的增速已经接近甚至赶上了经济增速。这种复钩现象警示我们:福建省交通运输业的低碳转型基础尚不稳固,一旦出行需求反弹,由规模扩张带来的增排效应可能迅速吞噬技术进步的减排成果。

综上所述,福建省交通运输业目前整体处于由弱脱钩向强脱钩跨越的关键攻坚期。虽然行业总体能效在提升,但经济增长与碳排放之间的硬连接尚未完全打破。要实现真正的强脱钩,未来必须从单纯依赖技术能效提升,转向运输结构深度优化(公转铁/水)与能源结构根本变革(全面电动化)双轮驱动的深水区。

## 5. 结论

基于 2010~2024 年福建省交通运输活动水平及宏观经济数据,本文采用了基于周转量的自下而上核算方法,结合 LMDI 分解模型与 Tapio 脱钩弹性分析,系统刻画了作为国家生态文明试验区的福建省交通碳排放演变轨迹、驱动机理及其与经济增长的耦合特征。研究结果显示,福建省交通碳排放经历了长期刚性增长-短期被动回调-后期补偿性反弹三个显著阶段:2020 年受外部环境突发因素冲击短暂回落,但 2023~2024 年随着客货运需求的集中释放,排放总量迅速回升并突破 2020 年前水平,2024 年创下历史新高,表明行业尚未实现稳定的碳达峰。在排放结构上,呈现出鲜明的道路主导、私人激增、水运托底特征,私人交通保有量的爆发式增长使其成为增排的首要内生动力,而水路运输凭借较低的能耗强度在货运端发挥了重要的低碳压舱石作用。驱动因素分解表明,经济增长效应是推动碳排放上升的绝对主导力量,反映出当前福建省交通发展仍未摆脱对经济总量的依赖;能源强度效应则是最核心的抑制因素,技术进步与能效提升有效对冲了部分增量;运输结构效应表现为正负博弈,水运优势与客运私人化趋势相互抵消。脱钩分析进一步揭示,福建省交通运输业整体处于弱脱钩状态,但在 2024 年等特定年份,弹性指数逼近甚至突破 0.8 阈值,呈现出扩张性连接或复钩迹象,提示在经济复苏周期中,由规模扩张带来的碳反弹风险显著抬升。整体而言,本研究构建的基于活动水平的核算框架弥补了区域能源统计数据的短板,为福建省及同类沿海省份的低碳转型提供了科学的数据支撑与决策参考。

## 6. 问题及建议

尽管福建省在绿色交通建设方面取得了一定成效,但基于上述分析,其低碳转型仍面临结构性与机制性的双重约束:一是客货运结构低碳化进程不均衡,虽然公转水成效显著,但客运端私人小汽车出行比例过快上升,挤占了公共交通份额,导致结构性减排红利被稀释;二是脱钩状态不稳固,系统对经济增长的依赖度依然较高,易在经济复苏期出现排放规模的补偿性反弹,2024 年的复钩现象即是明证;三是存量高碳运力淘汰与增量新能源渗透之间存在时间差,尤其是营运货车与老旧船舶的清洁化替代尚处于攻坚期;四是政策协同机制有待完善,单纯的技术减排难以抵消规模扩张的压力。为此,提出以下对策建议:

首先,深化运输结构调整,聚焦大宗物资“公转水”与“海铁联运”精准发力。针对福建省沿海电厂密布、钢铁产业发达的特点,重点挖掘电煤、进口铁矿石及建材砂石等大宗货物的“公转水”潜力。依托福州港、湄洲湾港等深水良港,完善疏港铁路支线建设,打通“最后一公里”,推动将原本通过公路转运至内陆工业园区的原材料转向“水水中转”或“海铁联运”,从源头上压降高能耗强度的公路货运周转量。

其次,加速能源结构变革,推进全域电动化与港口清洁化。(保留原内容:在私家车、城市公交……)同时,针对水运排放,在厦门港、福州港核心作业区强制推行船舶靠港使用岸电,并以此为试点,逐步推广 LNG 动力及电动船舶在闽江内河航运中的应用。

再次,依托“数字福建”建设,强化数智赋能与供需匹配。针对公路货运空驶率高的问题,建议整合省内物流园区数据,构建省级交通运输碳排放智慧监测与物流信息撮合平台。利用大数据算法对货车返

程运力进行智能调度，重点降低厦门 - 龙岩、福州 - 南平及跨省长途货运线路的空驶率，通过提升实载率直接降低单位周转量的碳排放。同时，建立分级预警机制，对重点高排放企业和路段实施动态监控。

最后，构建政策与市场双轮驱动机制。依托福建省碳排放权交易试点，探索将交通运输行业纳入碳市场，并结合绿色信贷、差异化停车收费等经济手段，形成抑制高碳出行、激励低碳转型的长效机制，确保如期实现交通领域碳达峰目标。

## 参考文献

- [1] 陈思茹, 张帅, 袁长伟. 中国交通运输经济发展与碳排放效率评价[J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 154-161.
- [2] Ritchie, H. and Roser, M. (2020) CO<sub>2</sub> Emissions. <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- [3] Meng, C., Du, X., Zhu, M., Ren, Y. and Fang, K. (2023) The Static and Dynamic Carbon Emission Efficiency of Transport Industry in China. *Energy*, **274**, Article ID: 127297. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127297>
- [4] 杨晓光, 朱际宸, 彭晴, 等. 面向预约出行的车路联网与协同交通控制: 前沿与展望[J]. 上海理工大学学报, 2023, 45(4): 307-320, 331.
- [5] 冉茂平, 邓须红, 关佳希, 等. 基于 LCA 的道路基础设施碳排放核算与低碳减排技术综述[J/OL]. 交通运输工程学报: 1-16. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2025.05.002>, 2025-09-22.
- [6] 左大杰, 赵亮, 熊巧, 等. 交通碳排放研究综述: 核算方法、影响因素及作用机理[J]. 交通运输工程与信息学报, 2024, 22(1): 111-127.
- [7] 张晔, 宋国华, 尹航, 等. 综合交通运输系统碳排放预测的不确定性分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21(1): 64-79.
- [8] 包含, 王耿, 晏长根, 等. 公路建设碳排放核算与岩土工程低碳措施及碳补偿研究综述[J]. 中国公路学报, 2025, 38(1): 46-72.
- [9] 乔亚宁, 文霞, Gao, Yang-Ming, 等. LCA 分配方法对道路生命周期碳排放核算的影响及不确定性分析[J/OL]. 交通运输工程学报: 1-18. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2025.05.007>, 2025-09-15.
- [10] 单肖年, 胡颖, 寇泷丹, 等. 碳达峰目标下城市公共交通系统低碳转型路径[J]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21(3): 1-12.
- [11] 赵靖, 杨晓光, 章程. 交通设计技术发展与对策建议[J]. 前瞻科技, 2023, 2(3): 45-57.
- [12] 陈涛, 李晓阳, 陈斌. “双碳”目标下交通运输业碳排放脱钩效应与峰值预测[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(4): 104-116.
- [13] 喻洁, 达亚彬, 欧阳斌. 基于 LMDI 分解方法的中国交通运输行业碳排放变化分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(10): 112-119.
- [14] 杨青, 郑衍迪, 汪金美, 等. 交通碳排放与经济发展“协调-脱钩”的危机转化[J/OL]. 环境科学: 1-27. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202504238>, 2025-09-15.
- [15] Wu, C., He, X. and Dou, Y. (2019) Regional Disparity and Driving Forces of CO<sub>2</sub> Emissions: Evidence from China's Domestic Aviation Transport Sector. *Journal of Transport Geography*, **76**, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.02.009>
- [16] Hou, L., Wang, Y., Hu, L., Wang, Y., Li, Y. and Zheng, Y. (2023) Economic Growth and Carbon Emissions Analysis Based on Tapio-EKC Coupled Integration and Scenario Simulation: A Case Study of China's Transportation Industry. *Environment, Development and Sustainability*, **26**, 18855-18881. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03418-3>
- [17] 葛青秀, 杨萍果, 蒲英霞. 中国省域交通运输碳排放脱钩状态及其驱动因素[J]. 环境科学, 2025, 46(4): 2009-2019.
- [18] 邵志国, 李可心, 李梦笛. “双碳”背景下中国交通运输业碳排放驱动因素及脱钩效应[J]. 中国环境科学, 2025, 45(1): 571-582.
- [19] 唐文斌, 王惟政, 穆孟等. 电气化情景下高速公路建设期碳排放核算及减排潜力量化研究[J]. 公路交通科技, 2025, 42(5): 206-214.
- [20] 张燕, 石晶华, 戴菲. 中国机场航空碳排放时空特征、影响因素及脱钩效应[J/OL]. 环境科学: 1-18. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202503256>, 2025-09-15.
- [21] 蔡文媛, 陈洁, 高郭平. 上海市浦东新区碳排放时空格局及驱动机制[J/OL]. 环境科学: 1-16. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202504327>, 2025-09-15.