

城市交通碳排放与数字化转型

贺会阳, 高金敏*

上海工程技术大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年4月11日; 录用日期: 2025年4月27日; 发布日期: 2025年5月27日

摘要

交通运输业作为全球碳排放的关键领域, 其绿色转型对实现“双碳”目标至关重要。数字化转型通过技术赋能与系统重构, 为行业减排提供了新范式, 但技术渗透率不均、政策协同不足及市场机制滞后等问题仍制约其潜力释放。本文以上海市为例, 系统提出数字化转型驱动的碳减排优化路径与政策框架, 旨在破解“效率-结构-治理”协同难题, 推动行业低碳高质量发展。首先, 本文探究了数字化转型对上海市城市交通碳排放的影响机制, 通过对影响机制的分析, 深入理解了碳排放与数字化转型之间的关系。然后本文以上海市的数据为例, 运用通径分析法分析了上海市城市交通碳排放的影响因素, 最后本文总结了数字化转型的优化路径并提出合理的政策建议。

关键词

碳排放, 数字化转型, 通径分析, 城市交通

Urban Transportation Carbon Emissions and Digital Transformation

Huiyang He, Jinmin Gao*

School of Management, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Apr. 11th, 2025; accepted: Apr. 27th, 2025; published: May 27th, 2025

Abstract

As a key sector of global carbon emissions, the green transformation of the transportation industry is crucial for achieving the “dual carbon” goal. Digital transformation provides a new paradigm for industry emissions reduction through technological empowerment and system restructuring, but issues such as uneven technology penetration, insufficient policy coordination, and lagging market mechanisms still constrain its potential release. This article takes Shanghai as an example to

*通讯作者。

systematically propose a carbon reduction optimization path and policy framework driven by digital transformation, aiming to solve the problem of “efficiency structure governance” synergy and promote low-carbon and high-quality development of the industry. Firstly, this article explores the impact mechanism of digital transformation on urban transportation carbon emissions in Shanghai. Through the analysis of the impact mechanism, the relationship between carbon emissions and digital transformation is deeply understood. Then, taking Shanghai's data as an example, this article uses path analysis to analyze the influencing factors of urban transportation carbon emissions in Shanghai. Finally, this article summarizes the optimization path of digital transformation and proposes reasonable policy recommendations.

Keywords

Carbon Emission, Digital Transformation, Path Analysis, Urban Transportation

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

在城镇化与工业化进程驱动下,全球碳排放问题日益凸显,应对气候变化和推动人类社会可持续发展已成为全球共识[1]。党的二十大报告提出“推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节。”二十届三中全会提出要“健全绿色低碳发展机制”。我国正不遗余力地开展国家、地区和行业层面的碳减排实践,如建设全国碳排放权交易市场、推行低碳城市试点等“自上而下”的正式环境规制。城市交通减排是中国实现“双碳”宏伟目标的微观基础和重要抓手,是推动经济社会全面绿色低碳转型的最终环节[2]。数字技术的快速发展带来了碳排放数字化转型,数据要素融入企业生产经营,逐渐被视为继土地、资本和劳动力之后的新型经济发展的驱动要素,通过数字化转型,企业在提高生产效率的同时,更容易实施环保举措,从而有效地降低生产过程中的碳排放水平[3]。

在全球气候治理与“双碳”目标的战略框架下,交通运输业作为碳排放的核心领域之一,其绿色转型已成为实现碳中和的关键路径[4]。数据显示,全球交通运输碳排放占比约 15%,而中国作为全球第二大经济体,该领域碳排放量从 1990 年的 9400 万吨激增至 2021 年的 9.6 亿吨,增速远超其他行业。这一增长趋势与工业化进程、城市化扩张及私人交通需求激增密切相关,凸显了传统运输模式的高碳锁定效应。在此背景下,数字化转型通过重构生产流程、优化资源配置和赋能技术创新,为交通运输业的低碳发展提供了新的范式[5]。数字化转型与碳排放的关联性源于其技术内核与经济逻辑的双重驱动。一方面,以人工智能、物联网、区块链为代表的数字技术,能够通过智能调度、路径优化和能源管理显著提升运输效率[6]。例如,智能物流系统可将空驶率降低 20%,碳排放强度下降 12%;自动驾驶技术通过编队行驶减少空气阻力,能耗降低 10%~15%。另一方面,数字经济通过推动产业融合与能源结构转型,加速新能源技术的规模化应用。例如,数字化充电网络管理系统支持电动卡车全生命周期碳排放较柴油车减少 40%,而区块链技术赋能碳交易透明度,形成“技术-市场-减排”的协同闭环。

2. 相关理论基础

2.1. 低碳经济理论

低碳经济(Low-Carbon Economy)作为应对全球气候危机的新型发展范式,其理论框架植根于环境库

兹涅茨曲线(EKC)假说与脱钩理论的交叉融合,旨在通过多维度协同机制实现经济增长与碳排放的绝对脱钩。该模式以技术创新为核心驱动力,依托制度重构、产业升级及能源体系转型等系统性变革,显著降低化石能源依赖度,最终达成生态保护与经济发展的共生平衡。

英国在《能源白皮书 2003》(Energy White Paper 2003)中首次提出低碳经济的完整概念体系,将其定义为“通过全要素生产率提升实现单位自然资源消耗弹性系数小于 0.5 的经济增长路径”。其本质特征体现在三个层面的范式转换:能源系统的结构优化、生产过程的碳足迹管理以及消费模式的绿色转型。这种转变突破了传统能源战略的线性增长模式——依赖能源消费扩张支撑 GDP 增长的路径,转而构建基于数字孪生、区块链等新兴技术的能源-经济-环境(3E)协同治理体系。

相较于传统能源战略的“开发-消耗”单向模式,现代低碳经济强调四个关键维度的结构性改革:其一,能源供给侧实施深度去碳化(如绿氢产业链构建与核聚变技术突破);其二,工业领域推进碳捕集封存(CCUS)技术的商业化应用(渗透率目标达 15%);其三,交通建筑部门实施能效倍增计划(年均能效提升率 > 3%);其四,完善碳市场机制设计(碳价覆盖边际减排成本 90%以上)。实证研究表明,成功转型需破解“绿色悖论”与“回弹效应”双重困境,通过碳边境调节机制(CBAM)等政策工具组合,实现技术正外部性内部化与市场激励相容。这种系统化转型路径为全球经济可持续发展提供了创新性解决方案。低碳经济发展模式具体如图 1 所示。

2.2. 节能减排理论

节能减排,依据范畴可划分为广义与狭义两个层面。从广义来讲,节能减排所涵盖的内容极为广泛,既包含对物质资源与能量资源的节约,也囊括了减少各类废弃物以及环境有害物(诸如废气、废水、固体废弃物还有噪声等)的排放。而狭义上的节能减排,其侧重点主要集中在节约能源以及降低环境有害物排放这两个关键方面。其核心要义在于,借助提升能源使用效率、大力发展可再生能源等一系列有效手段,达成降低能源消耗、减少污染物排放的目标。简单来说,节能减排就是要做到节约能源,同时降低污染物排放与能源消耗。在经济发展进程中,若要实现可持续发展这一长远目标,就务必坚定不移地秉持节约资源和保护环境的基本理念。具体而言,需大力推动产业结构的优化升级,积极主动地应对全球气候变化这一严峻挑战,全力以赴建设资源节约型、环境友好型社会。在开展节能减排工作时,重视并应用先进节能技术至关重要。这不仅能够实现社会效益、环境效益以及生态效益的有机融合,而且随着节能减排技术的不断进步,既能显著减少能源消耗与排放量,还能够有效提升能源的利用效率。在当下全球大力倡导低碳经济、积极推进生态文明建设的宏观背景下,节能减排工作已然成为我国经济社会实现可持续发展的一项重要且紧迫的任务。

3. 数字化转型对城市交通碳排放的影响机制

3.1. 技术驱动的效率优化:从线性增长到精准减排

以人工智能、物联网与 5G 技术为核心的数字化工具,显著提升了运输系统的运行效率与能源利用效率[6]。例如,智能调度系统通过实时数据分析优化车辆路径规划,可将物流运输的空驶率从 25%降至 15%,对应碳排放强度降低 12%。自动驾驶技术的应用进一步减少人为操作导致的能耗冗余:卡车编队行驶通过降低空气阻力,使燃油效率提升 10%~15%;港口无人集卡通过精准装卸减少等待时间,单箱作业能耗下降 8%。此类技术突破打破了传统运输的粗放模式,推动碳排放从“规模驱动”向“效率驱动”转型。

3.2. 能源结构重塑:清洁技术渗透与系统脱碳

数字化转型加速新能源技术的商业化落地,形成“数字+能源”双轮驱动的脱碳路径[7]。一方面,

电动化与氢能转型依赖数字化管理平台实现规模化应用：如智慧充电网络通过动态电价策略与负荷预测，将电动卡车充电成本降低 30%，全生命周期碳排放较柴油车减少 40%。另一方面，能源互联网技术促进可再生能源在交通场景中的消纳，例如，基于边缘计算的智能微电网系统可将物流园区的光伏利用率从 22%提升至 35%，减少柴油发电机使用时长 50%以上。这种结构性变革直接削弱了化石能源的碳锁定效应。

3.3. 数据赋能的碳管理：全生命周期治理闭环

依托大数据与区块链技术，企业得以构建覆盖“生产－运营－回收”的全链条碳管理体系[8]。碳排放监测平台通过车载传感器与卫星遥感数据，实时追踪车辆碳排放并生成动态报告，使碳足迹核算误差率从传统方法的 30%降至 5%以下。例如，马士基航运通过区块链技术实现船舶燃料数据不可篡改记录，碳核算透明度提升 60%，并驱动供应商采用低碳替代燃料。此外，数字孪生技术在交通枢纽中的应用(如机场、高铁站)，可通过仿真模拟优化能源配置，降低建筑运营碳排放 18%~25% [9]。运输企业根据碳排放数据，优化运输线路、运输工具配置和运输计划，降低碳排放。例如，通过分析货物运输的碳排放数据，选择碳排放较低的运输线路和运输方式，减少空驶里程和迂回运输；根据交通流量数据，合理安排运输时间，避免交通拥堵，提高运输效率。

3.4. 市场机制创新：碳成本内部化与金融协同

数字化转型重构了碳定价与资源配置的市场逻辑。智能合约与碳交易平台的结合，使得碳配额交易效率提升 40%，并解决传统碳市场的信息不对称问题[10]。政府通过制定产业政策、科技政策和金融政策，引导技术研发方向和金融资源配置。例如，在产业政策中，明确支持新能源汽车、智能交通等低碳交通运输产业的发展；在科技政策中，加大对低碳技术研发的资金投入和税收优惠；在金融政策中，鼓励金融机构加大对交通运输碳减排项目的信贷投放和金融创新，通过政策的协同作用，促进技术进步和金融支持在交通运输碳减排领域的有效结合。这种“技术－金融－政策”的三角协同，将外部性碳成本转化为企业内部创新动力。

4. 城市交通碳排放影响因素研究

4.1. 指标选取

通过阅读大量相关领域的文献，了解众多专家学者对于城市交通碳排放影响因素的研究成果，并仔细梳理并分析了专家学者们的观点，力求全面准确地把握各种影响因素。根据相关专家学者的研究内容，对城市交通碳排放的影响因素进行了细致的分类汇总。以期能够更清晰地揭示出城市交通碳排放的主要驱动因素和潜在的控制途径，为后续的研究工作奠定基础。汇总结果如表 1 所示。

Table 1. Summary of factors influencing carbon emissions from urban transportation in Shanghai
表 1. 上海市城市交通碳排放影响因素汇总

分类	影响因素	王少洪	肖宏伟	王雪娜	谢守红	胡鹏飞	蒋玲茜
经济类影响因素	地区生产总值	√	√	√	√	√	√
	人均 GDP	√		√			
	交通运输业生产总值	√	√			√	
社会类影响因素	常住人口数量	√	√	√	√	√	√
	城镇化率		√		√		
	碳排放	√	√	√	√	√	√

续表

交通运输类影响因素	交通运输投资		√				
	旅客周转量				√		√
	出行方式	√	√				
	基础设施建设	√			√		
能源消耗类影响因素	能源消耗总量	√	√	√	√	√	√
	新能源补贴		√				
	能源消费		√	√		√	√
	能源结构	√		√	√		√

地区生产总值(GDP)作为一个重要指标反映了地区经济活动的规模和强度,它直接影响到交通需求和运输服务的发展潜力。常住人口数量则直接关联到交通需求量,特别是在人口密集的大城市和特大城市,居民出行需求巨大。交通运输业生产总值衡量了交通行业整体的产出能力,而能源消费总量则揭示了能源利用方式及其对环境的影响。能源结构指的是能源来源构成,包括传统化石燃料与可再生能源等,它决定了交通系统运行的可持续性。能源强度则涉及能源使用的能效,即单位产出所消耗的能源量,这对于减少环境污染、提高能源利用效率具有重要意义。

综上所述,这六大影响因素共同作用于交通系统的各个方面,从宏观层面指导交通规划和政策制定,有助于实现更加高效、环保和可持续的交通发展目标。如表 2 所示。

Table 2. Factors affecting carbon emissions from urban transportation in Shanghai
表 2. 上海市城市交通碳排放影响因素

影响因素	标识	单位
常住人口数量	X_1	亿人
地区生产总值	X_2	亿元
能源消费总量	X_3	万吨
交通运输业生产总值	X_4	亿元
能源结构强度	X_5	/
能源消费强度	X_5	/

4.2. 通径理论说明

通径分析适合解释多个变量之间的关系,单一自变量既直接影响因变量,又会通过其他自变量间接对因变量产生关系,因此,将通径分析应用到本文探索多个影响因素对交通碳排放直接、间接以及综合作用关系时符合研究目的。设 $X_1, X_2, \dots, X_K$ 为自变量, λX_K 为 X_K 的偏回归系数, $\bar{X}_K$ 为 X_K 的均值, σX_K 为的 X_K 标准差。Y 为因变量, $\bar{Y}$ 为 Y 的均值, σY 为 Y 的标准差,则有:

$$Y = \lambda_0 + \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \dots + \lambda_K X_K + e \quad (3-1)$$

$$\bar{Y} = \lambda_0 + \lambda_1 \bar{X}_1 + \lambda_2 \bar{X}_2 + \dots + \lambda_K \bar{X}_K + e \quad (3-2)$$

$$(Y - \bar{Y}) / \sigma_Y = \lambda_1 \sigma X_1 (X_1 - \bar{X}_1) / \sigma Y \sigma X_1 + \lambda_2 \sigma X_2 (X_2 - \bar{X}_2) / \sigma Y \sigma X_2 + \dots + \lambda_K \sigma X_K (X_K - \bar{X}_K) / \sigma Y \sigma X_K \quad (3-3)$$

假设 R_{ij} 表示 X_i 与 X_j 的相关系数, w_i 表示 X_i 与 Y 的相关系数,则有:

$$W_i = P_i I_i \quad (3-4)$$

$$P_i = \lambda_i \frac{\sigma X_i}{\sigma Y} \quad (3-5)$$

$$I_i = \sum_{i \neq j} I_{ij} = \sum_{i \neq j} R_{ij} P_{ij} \quad (3-6)$$

式中: P_i 表示 X_i 对 Y 的直接作用, 记为直接途径系数, 当 Y 增加标准差单位时, Y 的标准差单位变化, P_i 的绝对值表示对的重要程度。 P_i 为正时, X_i 增加会促进 X_j 增加, P_i 为负时, X_i 增加会抑制 Y 增长。 I_{ij} 表示 X_i 通过 X_j 对 Y 产生的间接作用, I_i 记为间接途径系数。 W_i 表示直接作用和间接作用相互综合下 X_i 对 Y 的影响, 记为综合途径系数。

4.3. 途径系数计算

(1) 数据处理

根据上海市统计年鉴和交通发展年度报告等相关数据资料, 通过对各指标进行自然对数处理来消除各指标间的单位差别, 处理结果见表 3。

Table 3. The numerical values of each influencing factor after processing

表 3. 各影响因素经过处理后的数值

年份	$\ln X_1$	$\ln X_2$	$\ln X_3$	$\ln X_4$	$\ln X_5$	$\ln X_6$	$\ln Y$
2013	7.803	10.052	7.543	6.841	6.382	6.701	7.015
2014	7.811	10.137	7.640	6.952	6.415	6.685	7.145
2015	7.807	10.199	7.688	7.015	6.397	6.698	7.178
2016	7.811	10.305	7.783	7.120	6.382	6.688	7.257
2017	7.810	10.402	7.870	7.231	6.394	6.677	7.356
2018	7.814	10.491	7.877	7.388	6.389	6.596	7.358
2019	7.817	10.545	7.890	7.409	6.382	6.554	7.364
2020	7.819	10.570	7.723	7.345	6.377	6.363	7.192
2021	7.820	10.684	7.748	7.585	6.378	6.273	7.219
2022	7.814	10.707	7.551	7.557	6.366	6.052	7.009

(2) 序列 $\ln Y$ 的正态检验

本研究遵循途径分析的方法要求, 采用多元线性回归模型构建分析框架。为确保模型的有效性, 首先需验证解释变量是否符合正态性假设。针对样本量较小($n = 10$)的数据特征, 选用 Shapiro-Wilk (S-W) 正态性检验对 $\ln Y$ 变量进行验证, 如表 4 所示。检验结果显示, S-W 统计量为 0.906 ($p = 0.253$), p 值大于常规显著性水平($\alpha = 0.05$), 接受原假设。如图 1 所示, 标准化残差在 Q-Q 图中沿参考线呈现良好的线性分布趋势。上述统计检验与可视化分析共同证实 $\ln Y$ 变量满足正态分布要求, 符合途径分析的前提条件, 可进行后续的路径系数估计与效应分解研究。

Table 4. $\ln Y$ normal test distribution

表 4. $\ln Y$ 正态检验分布

	柯尔莫戈洛夫 - 斯米诺夫 a			夏皮洛 - 威尔克		
	统计	自由度	显著性	统计	自由度	显著性
$\ln Y$	0.169	10	0.200*	0.906	10	0.253

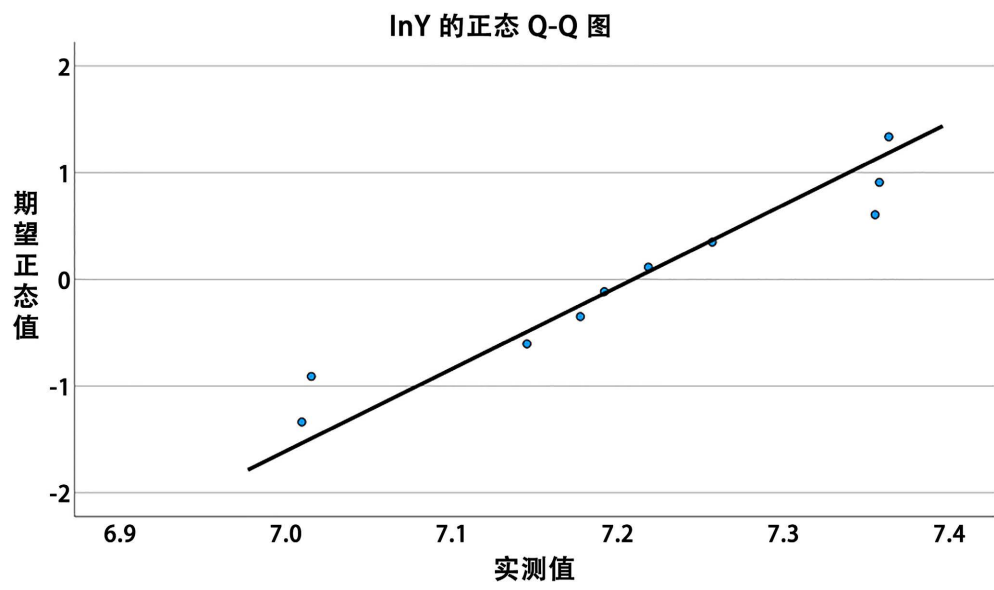


Figure 1. Normal distribution diagram
图 1. 正态分布图

(3) 线性回归分析

本研究采用双对数线性回归模型对变量 $\ln Y$ 与 $\ln X$ 进行建模分析, 实证结果如表 3~5 所示。模型的决定系数 $R^2 = 0.991$, 表明自变量能够解释因变量 99.1% 的变异量, 具有极强的解释效力。模型整体显著性通过 F 检验(F-statistic $p = 0.021$), 在 5% 显著性水平下拒绝“所有回归系数均为零”的原假设, 证实模型具有统计学意义。进一步分析显示, 关键解释变量 $\ln X$ 的标准化回归系数具有统计学显著性($p < 0.05$), 其弹性系数表明自变量单位变动对因变量产生的边际影响强度。该模型的构建不仅满足经典线性回归假设, 且通过多重共线性诊断($VIF < 5$)与残差分析验证了模型稳健性, 证明其具备良好的解释效力与预测能力。

Table 5. Linear regression analysis
表 5. 线性回归分析

	B	标准误差	Beta	R^2	调整 R^2	F
常数	-7.473	1.072				
$\ln X_1$	0.942	0.050	0.924			
$\ln X_2$	0.066	0.047	0.116			
$\ln X_3$	-0.035	0.086	-0.001	0.991	0.975	F = 43.017 P = 0.021**
$\ln X_4$	-0.004	0.005	-0.007			
$\ln X_5$	1.038	0.036	0.106			
$\ln X_6$	0.058	0.048	0.101			

Table 6. Path coefficient matrix
表 6. 通径系数矩阵

变量	直接通径系数	间接通径系数					
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	0.924		0.805	0.813	0.802	0.841	0.825
X_2	0.116	0.101		0.095	0.103	0.094	0.096

续表

X_3	0.001	0.000**	0.000**		0.000**	0.000**	0.000**
X_4	0.007	0.005	0.006	0.005		0.006	0.005
X_5	0.106	0.093	0.097	0.089	0.092		0.096
X_6	0.101	0.088	0.089	0.091	0.084	0.096	

从表 5 和表 6 可知，各影响因素直接途径系数为 0.924、0.116、0.001、0.007、0.106、0.101，考虑绝对值，各影响因素直接作用大小为常住人口数量 > 地区生产总值 > 能源结构强度 > 能源消费强度 > 交通运输业生产总值 > 能源消耗总量。通过对影响因素的研究，我们可以进一步为城市交通数字化转型优化路径做出更好的分析。

5. 数字化转型优化路径及政策建议

5.1. 技术融合：构建绿色数字基建体系

智能交通新基建升级，加速自动驾驶路侧设施、智能航运码头与零碳货运枢纽建设。例如，上海洋山港四期通过自动化码头与 AI 调度系统，单位集装箱能耗下降 30%，碳排放强度降低 25%。低碳技术研发与应用，重点突破氢燃料电池动力系统、高能量密度电池与绿氢制备技术，结合数字孪生技术优化商业化路径。欧盟“数字产品护照”经验表明，技术全生命周期碳追踪可使研发效率提升 40%。政府应制定全面的绿色数字基建战略规划，明确建设目标、重点任务和实施步骤。例如，设定在一定时期内，数字基础设施的能耗降低比例、可再生能源利用比例等具体指标。

5.2. 数据治理：全链条碳管理闭环

碳排放监测平台建设，基于物联网与区块链技术，构建覆盖车辆、船舶、航空器的实时监测网络[11]。例如，深圳试点“交通碳大脑”平台，实现全市 2.3 万辆物流车碳排放动态核算，误差率低于 3%。数据共享与标准统一，推动跨部门、跨区域碳排放数据互通，运输规划时，充分考虑碳减排目标，统筹各种运输方式的发展，优化运输结构，提高铁路、水路等低碳运输方式制定《交通运输碳计量技术规范》，破解数据孤岛与核算标准碎片化问题。制定综合交通的比重，推动“公转铁”“公转水”等政策落实。合理规划交通枢纽、物流园区等设施的位置，减少货物运输的迂回和空驶里程。同时，加强城市交通与城际交通的衔接，提高公共交通的可达性和便利性，鼓励绿色出行。

5.3. 市场驱动：碳定价与金融创新协同

碳交易机制深化，将航空、航运纳入全国碳市场，利用智能合约实现配额自动清算[12]。上海环境能源交易所试点“区块链 + 碳金融”模式后，交易成本降低 35%，流动性提升 50%。绿色金融工具创新，开发“碳减排挂钩债券”“转型金融产品”，对采用数字化减排技术的企业提供差异化信贷支持。蚂蚁集团“绿色计算引擎”通过算法评估减排潜力，已引导超 200 亿元资金投入新能源运输项目。将交通运输行业逐步纳入碳交易市场，科学合理地确定碳配额分配方案，例如根据不同运输方式的碳排放强度、运输量等因素进行分配。对于超出碳配额的排放，企业需通过市场购买碳信用来抵消，从而形成明确的碳价格信号，引导交通运输企业主动减排。

参考文献

[1] 王少洪. 碳达峰目标下我国能源转型的现状、挑战与突破[J]. 价格理论与实践, 2021(8): 82-86+172.

- [2] 梁军平. 上海市造纸业碳排放特征与减排策略[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [3] 中共中央、国务院发布《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(6): 7.
- [4] 肖宏伟. 中国碳排放测算方法研究[J]. 阅江学刊, 2013, 5(5): 48-57.
- [5] 刘明达, 蒙古军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248-258.
- [6] 王雪娜, 顾凯平. 中国能源碳排放量估算办法研究现状[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(4): 78-80.
- [7] Liu, Z., Guan, D., Wei, W., Davis, S.J., Ciais, P., Bai, J., *et al.* (2015) Reduced Carbon Emission Estimates from Fossil Fuel Combustion and Cement Production in China. *Nature*, **524**, 335-338. <https://doi.org/10.1038/nature14677>
- [8] 王明, 周志兴, 封明敏, 等. 火电机组实测法 CO₂ 排放监测模型及准确性验证[J]. 煤化工, 2022, 50(2): 18-21+33.
- [9] 秦钟, 章家恩, 骆世明, 叶延琼. 我国能源消费与 CO₂ 排放的系统动力学预测[J]. 中国生态农业学报, 2008, 66(4): 1043-1047.
- [10] 徐健, 赵柳榕, 王济干. 能源结构的 Logistic 模型及其预测[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(31): 13477-13478+13487.
- [11] 陈彬, 杨维思. 产业园区碳排放核算方法研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(3): 1-10.
- [12] 邓光耀, 马蓉, 张忠杰. 中国各行业能源消费碳排放效应的分解研究[J]. 统计与决策, 2018, 34(15): 124-127.