

技术异质性下交通运输绿色全要素生产率的区域差异与空间格局研究

冯梦雅, 沈 烨, 仲苗青

江苏大学京江学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2026年4月26日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月28日

摘 要

文章基于技术异质性视角, 采用2014~2023年中国30个省级行政区面板数据, 运用Super-SBM、Meta-Frontier模型与Dagum基尼系数分解, 测算并分析交通运输绿色全要素生产率(GTFP)的区域差异与空间格局。结果显示, 全国交通运输GTFP整体偏低、区域差异明显, 呈西部 > 中部 > 东部梯度分布格局; 区域总差异以组内差距为主, 东部内部差距最大; 技术异质性是区域差异的核心驱动因素。最后, 从管理优化、技术协同与区域治理等方面提出精准对策, 为交通运输绿色转型提供决策支持。

关键词

技术异质性, 交通运输, 绿色全要素生产率, 区域差异, 管理工程, 协同治理

Research on Regional Differences and Spatial Patterns of Green Total Factor Productivity in Transportation under Technological Heterogeneity

Mengya Feng, Ye Shen, Miaoqing Zhong

Jiangsu University Jingjiang College, Zhenjiang Jiangsu

Received: April 26, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

Based on the perspective of technological heterogeneity, this paper uses panel data from 30 provincial-

文章引用: 冯梦雅, 沈烨, 仲苗青. 技术异质性下交通运输绿色全要素生产率的区域差异与空间格局研究[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(3): 713-720. DOI: 10.12677/mse.2026.153069

level administrative regions in China from 2014 to 2023, applies Super-SBM, Meta-Frontier models, and Dagum Gini coefficient decomposition to measure and analyze the regional differences and spatial patterns of green total factor productivity (GTFP) in transportation. The results show that the overall GTFP of China's transportation sector is relatively low, with significant regional differences, showing a gradient pattern of west > central > east. The total regional differences are mainly dominated by intra-group gaps, with the largest gap within the eastern region. Technological heterogeneity is the core driving factor of regional differences. Finally, precise countermeasures are proposed from the aspects of management optimization, technology coordination, and regional governance, providing decision support for the green transformation of transportation.

Keywords

Technological Heterogeneity, Transportation, Green Total Factor Productivity, Regional Difference, Management Engineering, Collaborative Governance

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

交通运输业是国民经济的基础性、先导性与战略性产业，也是能源消耗与碳排放的重点领域。推动交通运输绿色低碳转型、提升绿色全要素生产率(GTFP)，已成为实现“双碳”目标与高质量发展的关键抓手。我国东、中、西部地区在经济水平、基础设施、技术供给与管理模式上存在明显差异，交通运输业呈现显著的技术异质性特征，直接影响绿色发展效率的空间分布与区域差距。

绿色全要素生产率将能源消耗与环境约束纳入生产率核算框架，能够全面反映行业绿色发展水平。现有文献多采用 DEA 类模型测算交通运输 GTFP，但普遍将所有区域置于同一生产前沿，忽略了技术异质性带来的测度偏差。同时，针对区域差异的研究多以描述性分析为主，缺乏对差异来源的量化分解与技术驱动机制的深度解析。

基于此，本文以技术异质性为核心视角，首先，采用 Super-SBM-Meta-Frontier 模型测算交通运输 GTFP 与技术差距比率；其次，运用 Dagum 基尼系数分解法拆解区域差异的结构与贡献，系统刻画空间格局特征并揭示技术异质性的驱动作用；最后，提出差异化政策建议，为交通运输绿色协同发展提供理论依据与决策参考。

2. 文献综述

Chung 等人(1997) [1]提出方向性距离函数，将非期望产出纳入效率分析框架，为绿色全要素生产率研究提供了经典方法。Tone (2001) [2]构建了 SBM-DEA 模型，有效解决非径向、非角度效率度量问题，为后续绿色生产率测算提供重要支撑。Romer (1990) [3]在内生增长理论中指出，区域技术创新、知识积累与吸收能力差异是形成技术异质性的关键原因，也是导致区域发展差距的重要因素。

与此同时，交通运输绿色全要素生产率相关研究持续丰富。李健等(2026) [4]采用 SBM 超效率模型测算省域交通碳排放生产率，证实效率整体波动上升，存在显著的东中西部区域梯度差异。汪克亮等(2015) [5]立足技术异质性视角，运用共同前沿方法发现区域绿色技术落差突出，技术进步是生产率提升核心动力。丁黎黎等(2020) [6]从技术进步偏向剖析，要素配置区域分化催生技术异质性并影响生产

效率。陈明华等(2024) [7]评估重大战略区域绿色绩效,指出发展失衡明显,技术鸿沟与溢出不足加剧区域差距。

交通运输行业的发展实践与技术条件形成了绿色效率的重要约束,Dong等学者(2020) [8]发现,交通运输行业的现实基础与技术禀赋约束,深刻影响绿色效率提升。张红柳等(2024) [8]发现,数字物流可赋能流通业绿色全要素生产率,对东中部地区促进效果显著优于西部。刘战豫等(2018) [9]研究表明,受市场与技术积累差异影响,沿海物流业绿色生产率整体高于内陆地区。孔令章等(2023) [10]证实,高铁基建的空间溢出效应,对核心与边缘城市绿色效率的驱动机制存在明显异质性。李佳佳等(2025) [11]指出,多元环境规制可推动交通企业绿色转型,作用效果随行业、企业规模呈现差异化特征。彭天铎等(2022) [12]认为,优化能源结构、推广低碳技术,是交通行业绿色提质的重要路径。

区域差异与动态演进的相关研究不断拓展。Dagum (1997) [13]提出的基尼系数分解方法被广泛用于差距来源研究,为区域不均衡测度提供了有效工具。现有文献围绕交通运输绿色全要素生产率的测算方法、区域差异、影响因素等方面展开研究,为理解行业绿色发展水平与空间格局提供了理论与方法基础。相关成果在绿色生产率测算、技术异质性应用、空间差异分析等方面形成了较为丰富的结论,为本文研究提供了重要参考。

但既有研究仍存在进一步拓展的空间,将技术异质性贯穿于交通运输绿色全要素生产率的分析框架仍有待完善,且技术异质性作用于绿色效率的传导机制与动态演进规律仍有待深化。依托现有研究基础,本文以技术异质性为视角,构建相应指标体系,采用Meta-SBM-ML模型、Dagum基尼系数,对中国交通运输绿色全要素生产率的区域差异展开实证检验,提出促进区域交通绿色协调发展的对策建议,为交通高质量发展和“双碳”目标实现提供参考。

3. 理论机制

技术异质性形成机制:东、中、西部在数字基础设施、研发投入、管理水平、政策执行力度上存在差异,形成不同生产技术前沿。东部地区要素投入充足但技术转化效率偏低,中部地区稳步追赶,西部地区直接采用先进绿色技术,呈现西部技术领先、中部居中、东部滞后的异质格局。

技术异质性对GTFP的影响技术水平决定能源利用效率、低碳减排能力与生产组织效率。区域技术越接近全国前沿,GTFP越高;区域内部技术分化越显著,内部效率差距越大。

区域差异的空间演化:交通运输GTFP区域差异由组内差距与组间差距共同构成。技术异质性导致区域内部技术应用参差不齐,组内差距成为主导因素;随着技术溢出与政策协同,区域整体差距呈收窄趋势。

4. 研究设计

4.1. 样本与数据来源

选取我国30个省级行政区(不含西藏、港澳台地区)2014~2023年面板数据,共300个观测值。数据来源于《中国统计年鉴》《中国交通运输统计年鉴》《中国能源统计年鉴》及EPS数据库。少量缺失数据采用线性插值法补充。

4.2. 指标体系构建

遵循“投入-期望产出-非期望产出”的绿色全要素生产率测度逻辑,结合交通运输业的行业特征,构建包含3类投入、2类期望产出、1类非期望产出的交通运输GTFP测度指标体系,具体指标选取与含义如表1所示。

Table 1. Indicator system for measuring green total factor productivity (GTFP) in transportation**表 1.** 交通运输绿色全要素生产率(GTFP)测度指标体系

指标类型	指标	指标含义
投入指标	劳动投入	交通运输、仓储和邮政业从业人员数(万人)
	资本投入	固定资产投资额(亿元), 经 GDP 平减指数平减, 采用永续盘存法测算资本存量, 折旧率 5%
	能源投入	交通运输业终端能源消费量(万吨标准煤)
期望产出	客运量	客运量(万人)
	货运量	货运量(万吨)
非期望产出	碳排放量	采用 IPCC 简化法估算: 碳排放量 = 能源消费量 × 2.6 (行业平均碳排放系数)

4.3. 测度模型

为实现技术异质性下交通运输 GTFP 的精准测度与区域差异分析, 本文构建“效率测度 - 技术异质性量化 - 差异分解”的分析框架, 采用三类模型展开实证研究:

1) 含非期望产出的 Super-SBM 模型

为解决传统 DEA 模型的效率高估与非期望产出处理问题, 本文采用 Super-SBM 模型, 该模型为非径向、非导向模型, 可有效纳入能源消耗、碳排放等非期望产出, 精准测算绿色全要素生产率。模型设定可变规模报酬(VRS)与非期望产出弱可处置性, 适配交通运输“减排与产出协同”特征。

2) Meta-Frontier 共同前沿模型

为克服传统模型忽略区域技术异质性的缺陷, 本文采用 Meta-Frontier 共同前沿模型, 将 30 个省级行政区划分为东部、中部、西部三大技术群组, 东部: 北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南。中部: 山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南。西部: 内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆。

分别构建群组前沿(群组内部最优技术)与共同前沿(全国最优技术), 并通过技术差距比率(TGR)量化区域技术异质性, 公式为:

$$TGR = \text{群组前沿 GTFP} / \text{共同前沿 GTFP}$$

$TGR \in (0, 1]$, 越接近 1 表示技术水平越接近全国前沿, 技术异质性越弱。

3) Dagum 基尼系数分解法

为揭示交通运输 GTFP 的区域差异来源, 本文采用 Dagum 基尼系数分解法, 将总体区域差异分解为组内差距、组间差距、超变密度三部分, 量化各部分对总体差异的贡献率, 明确区域差异的核心驱动因素, 刻画 GTFP 的空间格局特征。

5. 实证结果与分析

5.1. 交通运输 GTFP 测度与描述性分析

1) 整体水平

如表 2 所示, 样本期内, 交通运输绿色全要素生产率(GTFP)均值为 0.5005, 整体处于中等偏低水平, 提升空间较大; 标准差 0.2057, 极值跨度 0.2307~1.1407, 省际差异显著。技术差距比率(TGR)均值为 0.5501, 表明行业整体技术水平约为全国前沿的 55%, 技术追赶潜力充足; 标准差仅 0.0169, 区域技术差距相对收敛, 但极值差异明显, 仍存在技术短板省份。

Table 2. Descriptive statistics of core variables**表 2.** 核心变量描述性统计结果

变量	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
绿色全要素生产率(GTFP)	300	0.5005	0.2057	0.2307	1.1407
技术差距比率(TGR)	300	0.5501	0.0169	0.1154	1.0000

2) 区域异质性

如表 3 所示,我国交通运输 GTFP 呈现西部 > 中部 > 东部的梯度格局。西部地区均值 0.5557,绿色发展效率相对领先,但内部离散程度最高,省际发展不均衡问题突出;中部地区均值 0.5094,效率居中且内部差异最小,发展较为均衡;东部地区均值 0.4378,为三大区域最低,受行业基数大、绿色转型压力较强影响,整体效率有待提升。

Table 3. Descriptive statistics of GTFP by region (Super-SBM)**表 3.** 分区域 GTFP 描述性统计(Super-SBM)

区域	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
东部	108	0.4378	0.1996	0.2307	1.1407
中部	78	0.5094	0.1605	0.2660	1.0125
西部	110	0.5557	0.2241	0.2389	1.1138
全国	296	0.5005	0.2057	0.2307	1.1407

3) 技术差距格局

如表 4 所示,三大区域技术差距呈西部最优、中部次之、东部最低的明显梯度。西部地区 TGR 均值高达 0.9980,共同前沿与群组前沿 GTFP 基本持平,接近全国技术前沿;中部地区 TGR 为 0.4251,与全国前沿存在中等差距,具备一定追赶空间;东部地区 TGR 仅 0.3493,群组前沿效率较高但技术转化不足,与全国前沿差距最大,提升潜力最为突出。

Table 4. Technology gap ratio (TGR) by region (Meta-Frontier)**表 4.** 分区域技术差距比率(Meta-Frontier)

区域	样本量	共同前沿 GTFP	群组前沿 GTFP	TGR 均值	技术水平评价
东部	110	0.2147	0.6253	0.3493	技术差距大,提升空间大
中部	110	0.2564	0.6047	0.4251	技术差距中等,追赶空间适中
西部	80	0.3126	0.3140	0.9980	技术差距极小,接近全国前沿
全国	300	0.2561	0.5347	0.5501	-

5.2. 时间演化特征

如图 1 所示,2014~2023 年全国 GTFP 年度均值呈现先平稳→2020 年下降→2021~2023 年回升的态势;年度标准差介于 0.1765~0.2374,整体小幅收窄,区域差距逐步缩小。

5.3. 区域差异的 Dagum 基尼系数分解

1) 总体差异与差异来源分析

如表 5 所示, 2014~2023 年我国交通运输 GTFP 总基尼系数由 0.3083 降至 0.1555, 呈波动下降态势, 表明区域整体差距持续收敛。从来源分解看, 组内差距为总差异的绝对主导, 贡献度常年维持在 76% 以上, 2018~2022 年更是超过 93%, 最高达 98.9%; 组间差距贡献度整体偏低且大幅波动, 2019~2022 年不足 10%, 2023 年小幅回升至 22.4%; 超变密度保持相对稳定, 对总差异影响有限。这说明, 我国交通运输绿色发展的区域失衡主要源于区域内部省际分化, 而非三大区域间的差距。

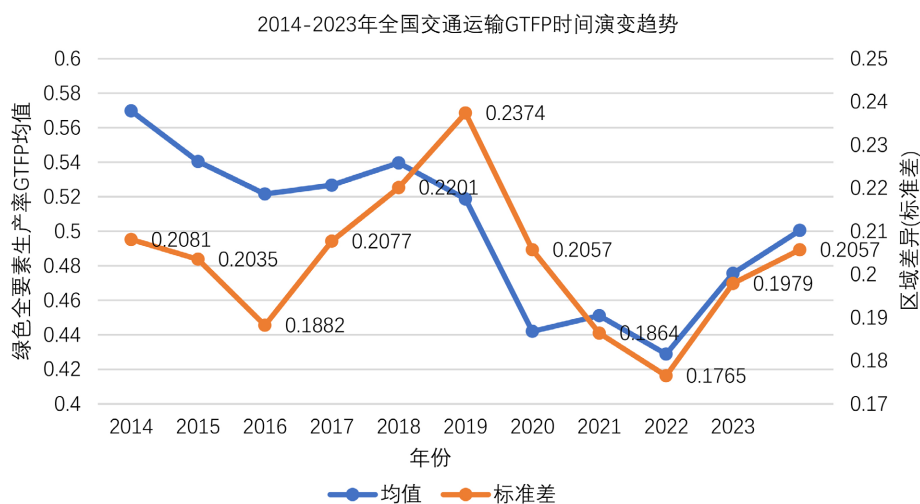


Figure 1. The evolution trend of time-based GTFP in China's transportation sector from 2014 to 2023
图 1. 2014~2023 年全国交通运输 GTFP 时间演变趋势

Table 5. Decomposition of regional differences in transportation GTFP from 2014 to 2023
表 5. 2014~2023 年交通运输 GTFP 区域差距分解

年份	总基尼系数	组内差距	组间差距	超变密度	组内贡献%	组间贡献%
2014	0.3083	0.1255	0.0333	0.1495	79.0%	21.0%
2015	0.2718	0.0982	0.0249	0.1487	79.7%	20.3%
2016	0.2563	0.0917	0.0154	0.1492	85.6%	14.4%
2017	0.3098	0.1197	0.0363	0.1538	76.7%	23.3%
2018	0.3203	0.1595	0.0072	0.1536	95.7%	4.3%
2019	0.2820	0.1307	0.0015	0.1498	98.9%	1.1%
2020	0.2462	0.0977	0.0020	0.1465	98.0%	2.0%
2021	0.1991	0.0598	0.0039	0.1354	93.9%	6.1%
2022	0.2011	0.0676	0.0013	0.1322	98.1%	1.9%
2023	0.1555	0.0297	0.0086	0.1172	77.6%	22.4%

2) 分区域内部差异

如表 6 所示, 三大区域交通运输绿色全要素生产率的内部发展不均衡特征显著, 且差异程度呈现明显梯度。东部地区内部差距最大, 基尼系数 0.14~0.35, 省际发展分化显著; 中部地区内部差距中等, 基尼系数 0.12~0.29, 发展相对均衡; 西部地区内部差距较大, 基尼系数 0.15~0.34, 技术趋同未带来完全均

衡。整体表明，我国交通运输 GTFP 区域差距主要来源于区域内部而非区域间，东部与西部地区内部失衡是制约整体协同发展的关键，未来缩小区域差距应重点聚焦区域内部低效省份的精准扶持与技术补齐。

Table 6. Intra-regional Gini coefficients and gap levels of three major regions

表 6. 三大区域内部基尼系数与差距等级

区域	基尼系数(Gini)	内部差距大小
东部	0.14~0.35	内部差距最大
中部	0.12~0.29	内部差距中等
西部	0.15~0.34	内部差距较大

5.4. 技术异质性对区域差异的驱动分析

1) 技术水平格局：TGR 梯度为西部 > 中部 > 东部，西部接近全国技术前沿，东部技术转化效率偏低。

2) 差异驱动机制：

a) 东部 TGR 低、内部技术应用分化，拉大组内差距；

b) 西部 TGR 高，但要素配置、管理水平不均，内部仍有差距；

c) 中部技术水平与均衡发展匹配度高，内部差距较小。

3) 核心结论：技术异质性是 GTFP 区域差异的重要动因，区域间技术壁垒、转化效率与追赶速度差异，共同导致发展失衡。

6. 研究结论及成因分解与政策建议

6.1. 研究结论及成因分解

1) **整体水平与区域格局：**我国交通运输 GTFP 整体处于中等偏低水平，区域分化显著，呈现西部 > 中部 > 东部的反常识梯度格局，与传统经济发展梯度相背离。东部因交通规模过载、绿色约束趋紧、边际效率递减，导致绿色效率偏低；西部依托政策支持与前沿技术直接应用，后发优势凸显，绿色效率相对领先；中部要素配置均衡、发展平稳，效率居于中间水平。

2) **技术异质性特征：**区域技术差距格局与 GTFP 高度耦合，西部接近全国技术前沿，中部技术差距中等，东部技术转化效率偏低、与全国前沿差距最大，技术异质性特征十分突出。

3) **区域差异来源：**交通运输 GTFP 区域总差异以组内差距为主导，组间差距贡献较小，其中东部地区内部发展失衡最为显著。东部内部技术应用、治理强度与转型进度分化明显，是拉高组内差距的核心原因。

4) **核心驱动机制：**技术异质性通过作用于技术应用水平、转化效率与要素配置结构，成为驱动交通运输 GTFP 区域差异形成与空间格局演化的关键因素。

6.2. 政策建议

1) 实施区域差异化精准施策，破解效率梯度失衡

a) 东部：针对其 TGR 低、技术转化效率低但经济实力强的特点，设立“跨区域绿色交通技术转移转化基金”，引导社会资本参与存量设施低碳改造，严控粗放式投入，提升技术落地效率；

b) 西部：依托其 TGR 高、接近全国技术前沿的优势，建立“区域内最佳实践案例分享与对口帮扶机制”，推动高效率省份向低效率省份输出管理经验与技术标准，缓解内部发展不均；

c) 中部: 发挥其技术差距适中、内部均衡性较好的特点, 重点补齐智慧物流、多式联运等技术短板, 强化技术承接与扩散能力。

2) 强化技术协同与成果转化, 缩小区域技术差距

搭建全国交通运输绿色技术共享平台, 推动东部研发资源向中西部流动; 开展“技术转化管理能力提升专项行动”, 重点解决东部“有技术、难落地”问题; 在中西部推行“技术适配性评估与定制化导入”机制, 避免技术供需错配。

3) 聚焦区域内部短板省份, 缩小组内发展差距

将政策重心由区域间协调转向区域内均衡, 东部: 建立省内绿色交通效率排名与通报制度, 对低效省份实施“一对一”技术帮扶。西部: 推行“省际结对 + 第三方评估”模式, 定期发布内部效率监测报告。中部: 巩固均衡发展态势, 探索跨区域技术协作示范区建设。

4) 完善绿色发展长效机制, 强化技术驱动作用

健全交通运输能耗与碳排放核算体系, 将绿色效率纳入考核; 开发交通运输绿色转型“管理工程工具包”(含能耗核算、技术选型、效益评估模块); 设立专项研发资金, 重点支持低碳技术集成应用与管理流程再造。

基金项目

大学生创新训练计划项目“技术异质性视角下交通运输绿色全要素生产率的区域差异及动态演进”(202513986004)。

参考文献

- [1] Chung, Y.H., Färe, R. and Grosskopf, S. (1997) Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach. *Journal of Environmental Management*, **51**, 229-240. <https://doi.org/10.1006/jema.1997.0146>
- [2] Tone, K. (2001) A Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, **130**, 498-509. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(99\)00407-5](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(99)00407-5)
- [3] Romer, P.M. (1990) Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy*, **98**, S71-S102. <https://doi.org/10.1086/261725>
- [4] 李健, 刘一璇. 省域交通运输业碳排放生产率时空演变分析[J]. *环境科学*, 2026, 47(3): 1498-1512.
- [5] 汪克亮, 孟祥瑞, 杨力, 等. 生产技术异质性与区域绿色全要素生产率增长——基于共同前沿与 2000-2012 年中国省际面板数据的分析[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2015, 17(1): 23-31.
- [6] 丁黎黎, 杨颖, 郑慧, 等. 中国省际绿色技术进步偏向异质性及影响因素研究——基于一种新的 Malmquist-Luenberger 多维分解指数[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(9): 84-92.
- [7] 陈明华, 史楠, 张边秀, 等. 国家重大战略区域绿色低碳发展绩效时空分异与演进趋势[J]. *资源科学*, 2024, 46(11): 2178-2193.
- [8] 张红柳, 康琳赛, 王明吉. “双碳”目标下数字物流发展对流通业绿色全要素生产率的影响效应分析[J]. *商业经济研究*, 2024(22): 90-93.
- [9] 刘战豫, 孙夏令. 中国物流业绿色全要素生产率的时空演化及动因分析[J]. *软科学*, 2018, 32(4): 77-81+114.
- [10] 孔令章, 李金叶. 高铁开通、时空收敛效应与城市绿色经济效率——基于核心-边缘的异质性视角[J]. *软科学*, 2023, 37(11): 107-113+121.
- [11] 李佳佳, 李思源. 异质性环境规制对交通运输企业绿色高质量发展的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2025, 35(4): 122-134.
- [12] 彭天铎, 袁志逸, 任磊, 等. 中国碳中和目标下交通部门低碳发展路径研究[J]. *汽车工程学报*, 2022, 12(4): 351-359.
- [13] Dagum, C. (1997) A New Approach to the Decomposition of the Gini Income Inequality Ratio. *Empirical Economics*, **22**, 515-531. <https://doi.org/10.1007/bf01205777>