

长安大学

大学生创新创业训练计划项目 创新训练总结报告

项目名称：	我国省级交通运输碳排放效率测度及影响因素的组态分析
项目级别：	国家级
项目编号：	S202310710088
项目负责人：	刘颖喆
所属学院：	人文学院
指导教师：	王灿友

长安大学教务处制

2024 年 5 月

我国省级交通运输碳排放效率测度及影响因素的组态分析

摘 要：中国当前正处在以减碳为关键的战略方向、促进减污与降碳的协同增效、推动中国经济社会发展向全面绿色转型、完成中国生态与环境保护质量提升从量变向质变的关键时期,其中交通运输业已成为当前促进中国经济社会发展的关键领域,同时也是中国当前限制碳排放总量目标中的关键减排领域。因此开展提升交通运输行业碳排放效率的研究正是大势所趋,本文利用三阶段 SBM-DEA 模型从人力、能源、资本投入与产出——行业增加值、二氧化碳排放量的角度对中国 30 个省、自治区、直辖市的碳排放效率进行测度;通过设置交通运输强度、交通运输结构、能源消耗强度、能源消耗结构、行业规模、第三产业比重六类影响因素,从组态视角按照 fsQCA 方法揭示影响省级交通运输碳排放效率的核心条件及因素间的互动机制,以此进一步提出提升交通运输碳排放效率的有效路径。研究发现:我国省级交通运输碳排放效率整体呈现“东部大于中、西部”的显著差异性特征;SFA 回归分析表明外部环境和随机干扰是影响交通运输碳排放效率的重要因素;任何单一条件均不构成交通运输高水平碳排放效率的必要条件,但是降低能源消耗强度对于产生交通运输高水平碳排放效率发挥着较为普适作用;交通运输高水平碳排放效率是多个条件变量复杂作用的结果,高水平配置效率的驱动路径有 3 条:能源强度驱动型、交通运输结构-行业规模驱动型、交通运输强度-行业规模驱动型。研究结论有助于深化对交通运输碳排放效率提升背后多重因素间复杂互动本质的理性认识,并为地方政府因地制宜调整交通运输行业与结构规模、合理交通运输资源与能源强度提供借鉴与参考。

关键词：交通运输碳排放效率 三阶段 SBM-DEA 模型 组态分析

Configuration analysis of carbon emission efficiency of provincial transportation and its influencing factors in China

ABSTRACT: China is currently in a critical period characterized by a strategic direction focused on carbon reduction, promoting the synergistic enhancement of pollution reduction and carbon reduction, driving a comprehensive green transformation in China's economic and social development, and completing the transition from quantitative to qualitative improvement in the quality of China's ecology and environmental protection. Among these, the transportation industry has become a key field in promoting the economic and social development of China, and it is also a key area for reducing carbon emissions within China's current total carbon emission control targets. Therefore, conducting research to improve the carbon emission efficiency of the transportation industry is in line with the trend of the times. This paper uses a three-stage SBM-DEA model to measure the carbon emission efficiency of 30 provinces, autonomous regions, and municipalities in China from the perspectives of labor, energy, and capital input and output - industry value added, carbon dioxide emissions. By setting six types of influencing factors - transportation intensity, transportation structure, energy consumption intensity, energy consumption structure, industry scale, and the proportion of the tertiary industry - the paper reveals the core conditions and interactive mechanisms of factors affecting provincial transportation carbon emission efficiency from a configurational perspective, following the fsQCA method, and thus further proposes effective paths to improve transportation carbon emission efficiency. The study found that the overall carbon emission efficiency of provincial transportation in China shows significant differences characterized by 'the east being greater than the central and western regions'. SFA regression analysis indicates that external environment and random disturbances are important factors affecting transportation carbon emission efficiency. No single condition constitutes a necessary condition for high-level transportation carbon emission efficiency, but reducing energy consumption intensity plays a more universal role in generating high-level transportation carbon emission efficiency. High-level transportation carbon emission efficiency is the result of the complex interaction of

multiple condition variables, and there are three driving paths for high-level configuration efficiency: energy intensity-driven, transportation structure - industry scale-driven, and transportation intensity - industry scale-driven. The research conclusions help to deepen the rational understanding of the complex interactions among multiple factors behind the improvement of transportation carbon emission efficiency and provide references and insights for local governments to adjust the transportation industry and structural scale according to local conditions, and to use transportation resources and energy intensity rationally.

Keywords: carbon emission efficiency of transportation; three-stage SBM-DEA model; configuration analysis

目录

1.绪论.....	1
1.1 项目选题原则与来源.....	1
1.2 项目研究背景与意义.....	1
1.3 项目研究内容.....	2
2.文献综述.....	3
2.1 国内外研究综述.....	3
2.2 项目研究创新点.....	5
3.研究模型与数据说明.....	5
3.1 研究模型设计.....	5
3.1.1 三阶段 SBM-DEA 模型.....	5
3.1.2 模糊集定性比较分析方法 (fsQCA)	7
3.2 变量设计与数据来源说明.....	7
3.2.1 结果变量的投入与产出指标.....	7
3.2.2 环境变量.....	10
3.2.3 条件变量.....	11
4.交通运输碳排放效率测度过程及结果.....	13
4.1 第一阶段 SBM 分析.....	13
4.2 第二阶段 SFA 回归分析.....	14
4.3 第三阶段 SBM 效率调整结果与分析.....	16
5.交通运输碳排放效率影响因素与组态分析.....	17
5.1 数据校准.....	17
5.2 单个条件必要性分析.....	17
5.3 实证结果及分析.....	18
6.结论与建议.....	21
6.1 研究结论.....	21
6.1.1 各省交通运输碳排放效率呈现空间上不均衡、受环境及多个条件变量共同影响的特点.....	22
6.1.2 不同省份适用于不同的增强交通运输碳排放效率的发展路径.....	22
6.1.3 高水平交通运输强度与行业规模的联动作用助力碳排放效率提升.....	23
6.1.4 优化交通运输结构的辅助作用不可忽视.....	23
6.1.5 提升能源消耗强度与能源消耗结构指明新发展方向.....	23
6.2 政策建议.....	24
6.2.1 坚持东西部协调发展，多要素共同发力打好减碳组合拳.....	24
6.2.2 因地制宜探索“本土化”的减碳新路径.....	24
6.2.3 完善交通基础设施网络推动交通运输规模化发展.....	25
6.2.4 发展多样化绿色运输方式.....	25
6.2.5 借力科技加速能源结构转型并降低交通运输能耗.....	25
6.3 研究局限性.....	26
7.参考文献.....	27

1. 绪论

1.1 项目选题原则与来源

选题过程基本围绕选题新颖性、专业性、实践性三者开展。选题主要依靠学校特色，聚焦交通运输特色以及国家碳达峰、碳中和基本目标，学习了解研究各文献期刊中主要研究对象、结论及基本模型。本文选题积极发挥我校交通运输领域的相关教学研究基础优势及小组成员专业优势，将交通运输行业健康发展与公共事业管理领域相联结，充分体现该选题的基本学科性以及专业性特征，充分发挥选题的人文社科领域的研究意义。

本文选题参考众多提高碳排放效率相关文献及并结合全国范围内省（自治区、直辖市）特色交通运输基本发展情况，综合考虑全国范围内交通运输对节能减排的重要意义。首先，选题过程覆盖大量文献资料，充分了解国内外研究基本情况，现今国内外学者对交通运输碳排放的研究主要集中在其空间效率、演变趋势、影响因素及节能减排措施等。以往研究主要基于 IPAT 等式、STIRPAT 和分解模型研究交通运输碳排放的影响因素，但对于影响因素间的组态分析尚未涉及，何以实现影响因素间的最佳组合以达到提高交通运输方面碳排放效率的基本目标并应用于政府宏观调控实现真正意义上的节能减排也值得进一步探索。其次，在专业领域，充分结合相关政策文件，充分意识到对于我国而言：一方面，工业化、城市化等发展过程交织进行，影响交通运输碳排放的因素纷繁复杂、相互作用。另一方面，省域交通运输发展存在明显差异，全国范围内交通运输发展情况日新月异，提高碳排放效率探索之路任重而道远，尤其是现今在公共领域我国亟待应对的社会性问题。

1.2 项目研究背景与意义

经过工业革命以来长期粗放式的发展模式，当下环境与气候变化问题已经成为全人类共同面临的重要问题之一。中国作为碳排放大国，在气候变化问题上面临着巨大的国际压力，已陷入经济发展需求和环境约束的双重约束之中。基于这一背景，十九大报告指出，建设生态文明是中华民族永续发展的千年大计，必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念。且承诺到 2030 年我国单位国内生产总值二氧化碳排放较 2005 年下降 60%~65%。党的二十大报告进一步指出，要积极稳妥推进碳达峰碳中和，立足我国能源资源禀赋，坚持先立后破，有计划分步骤实施碳达峰行动。完善能源消耗总量和强度调控，重点控制化石能源消费，逐步转向碳排放总量和强度“双控”制度。完善碳排放统计核算制度，健全碳排放权市场交易制度。提升生态系统碳汇能力，积极参与应对气候变化全球治理。

约束性减排目标 and 政策导向使得我国减排压力日益增大。而交通运输行业作为主要的化石能源消耗行业 and 主要的碳排放来源,在全球范围内碳排放量占排放总量的 1/4。据统计,目前交通运输排放占我国碳排放总量约 10.4%,特别是公路运输,占全国交通运输碳排放总量 85%以上,是交通碳排放绝对的主体 and 减排重点。无疑,交通运输行业已是应对气候变化的重点领域。

但作为国民经济发展的先导性和基础性行业,交通运输行业在 2030 年前仍将保持快速发展态势,交通运输行业碳排放总量控制将是我国 2030 年碳排放达峰的重要甚至决定性影响因素。综合来看,未来一段时期,由于中国国民经济和交通运输仍将保持快速增长的态势,但交通发展的技术水平和能源结构还未发生根本性转变,故交通运输领域的碳排放总量还将持续增加。减排压力巨大,形势严峻。

因此,准确了解中国交通运输碳排放效率的基本现状,加快研究中国交通运输碳排放效率的测度及其影响因素,并以此识别出进一步增强交通运输碳排放效率的发展路径,提出相关政策建议,支撑制定具有针对性的低碳交通政策措施,将对我国有效缓解二重约束冲突以及双碳目标的实现具有重要的理论和现实意义。在理论层面,本次研究以影响因素探究为基础,进而从组态视角揭示影响省级交通运输碳排放效率的核心条件及其复杂互动机制,将为后期交通运输因素探究提供新视角。在现实层面,探索交通运输碳排放从降低总的能源消耗与化石能源消耗两方面,进一步保障我国的能源安全。并在国际碳排放问题上,我国作为发展中国家充分注重交通运输等行业绿色低碳发展,积极助力国际范围内全面减排。

1.3 项目研究内容

本研究通过聚焦交通运输触发的二氧化碳排放量,在进行我国省级层面交通运输碳排放效率的测度的基础上,提出相关影响因素并进行因素之间组态分析,进而识别影响交通运输碳排放效率的不同路径。主要内容如下:

(1) 运用三阶段 SBM-DEA 模型,设定多项投入指标 and 期望、非期望产出指标,对收集到的具有可比性的数据进行碳排放效率测算;

(2) 用文献梳理方法研读大量文献,设定可能引发碳排放效率变动的影响因素。本研究共选取 6 个条件变量:交通运输强度(用交通运输行业的综合换算周转量与各地区 GDP 比值表示)、交通运输结构(用公路运输换算周转量占综合换算周转量的比重表示)、能源强度(用交通运输业能源消耗量与实际地区生产总值的比值表示)、能源消耗结构(电力和天然气消费总量与交通运输行业能源消费总量的比值)、行业规模(交通运输行业增加值与 GDP 的比值)、第三产业占比(用地区第三产业产值所占地区 GDP 比重表示)。

(3) 在设计影响因素的基础上,运用 fsQCA 方法从组态视角揭示影响省级

交通运输碳排放效率的核心条件及其复杂互动机制，探索性地识别出了增强省级交通运输碳排放效率的发展路径，并比较这些路径的前因条件和组态差异。在此基础上总结研究结论、提出政策建议。

2. 文献综述

2.1 国内外研究综述

碳排放效率的提升是有效缓解经济和环境二者冲突的关键。并且交通运输业是我国石油消耗最多和碳排放量增长最快的行业之一，交通运输行业的碳排放效率的测度和影响因素亟需关注。

其中，在交通运输碳排放效率的测度上，研究的发展过程可大致分为两个阶段：第一阶段为利用单要素指标设计来测度交通运输碳排放效率，许多学者采取交通运输综合换算周转量、交通运输碳排放量等单要素指标，如 Sun^[1]认为把单位 GDP 的 CO_2 排放量作为碳排放强度，是测量区域碳排放效率的最佳标准；Zhang 和 Qu^[2]等认为评价碳排放绩效的标准是工业化累计人均碳排量和单位 GDP 排放量；卢建锋^[3]等定义换算周转量与二氧化碳排放量之比作为交通运输业碳排放效率，在此基础上，利用分解模型探究了区域交通碳排放效率的影响因素。而单要素指标虽清晰简明易测量，但难以展现交通运输碳排放效率与其他生产要素间的互动关系以及各要素间的替代作用与效果差异，从而体现交通运输碳排放效率的多维特征。

故第二阶段是从全要素角度对碳排放效率进行测度。部分学者采用传统单阶段 DEA (Data Envelopment Analysis)模型对国家、省际综合交通的碳排放效率进行研究，如兰梓睿^[4]等基于数据包络分析法（DEA）测度了中国各省交通运输碳排放全要素效率；王群伟^[5]等利用 DEA 模型中的 Malmquist 指数测度了 1996-2007 年中国各省市 CO_2 的排放绩效并进行了收敛性分析。但传统单阶段 DEA 模型一方面没有充分考虑投入产出的松弛性问题，不能准确度量存在非期望产出时的效率值，难以准确评价决策单元（Decision Making Unit, DMU）的效率；另一方面其无法剔除外生环境和随机干扰的影响，因此，有研究引入了三阶段 DEA 模型，例如，DU^[6]等采用三阶段 EBM(Epsilon Based Measure)模型，讨论能源结构和贸易开发程度等外生环境因素对“一带一路”国家交通碳排放效率的影响；袁长伟^[7]等选取资本、劳动力、能源以及碳排放和运输业产值等指标，结合三阶段 SBM 模型测度各省份的交通碳排放效率；蒋自然^[8]等选取类似的投入产出指标，对比长江经济带各省份的交通碳排放效率值。为剔除外生环境因素和随机统计误差的影响，同时，反映外生环境因素对投入冗余的影响方向，SBM 模型需借助

SFA 回归。因此本研究在第二阶段引入 SFA 方法进行测度。

而就交通运输业碳排放效率分析而言,张诗青^[9]等人采用 ESDA 方法对交通运输碳排放时空分布格局进行研究,同时考虑了空间联系作用,并构建 GWR 模型对碳排放影响因素进行时空差异分析,选取了城镇化水平、能源利用效率、行业发展规模作为影响碳排放的因素,其中城镇化率、交通运输结构为主要推动因素,能源强度则起到关键抑制作用;吕雁琴^[10]等通过时空地理加权回归模型(GTWR)考察各驱动因素对交通运输碳排放效率的影响,得出政府干预对交通运输碳排放效率的影响最大,其次是能源结构、人均 GDP 和能源利用效率,相比而言,人口规模和科技水平的影响程度相对较小的研究结论;吴小明^[11]等人分别利用 LMDI 和 Refined Laspeyres 指数分解法和宏观 VAR 计量模型,从内部和外部两个角度对碳排放效率影响因素进行研究,选取了交通运输业能源强度、交通运输线路里程、总能源价格、城市化率作为影响碳排放的因素;王鹏^[12]等人运用拉氏因素分解模型讨论效率和结构两个内部因素对运输业能耗强度的影响,然后将有理论影响的外部因素作为解释变量代入分位数回归模型,通过实证分析检验它们的影响是否显著选取了科技水平、能源价格水平、能源消耗结构作为影响碳排放的因素;薛俊宁和吴佩林^[13]等构建面板模型分析了经济规模、产业结构、能源消费结构、技术进步、对外开放等因素对中国碳排放率的影响程度及空间效应;仲云云、仲伟周^[14]等利用 Tobit 模型探讨了中国全要素碳排放效率的驱动因素;Xu^[15]等运用分位数计量经济回归模型,探讨驱动交通运输行业碳排放的因素,研究结果显示主要影响因素包括人口规模、人均 GDP、交通能源强度、城镇化水平、货运周转量和客运周转量;但他们大多忽略了各省域之间的空间效应的相互依赖性,降低预测的科学性和准确性。

结合 2019 年我国省级交通运输行业的能耗、交通活动水平等相关数据现状,在碳排放效率测度方面,本文运用能够解决传统单阶段 SBM 模型无法解决的投入要素冗余问题,并且能够避免径向和不同角度造成的测度偏差问题的三阶段 SBM-DEA 模型。第一阶段,依据 SBM 模型,投入变量和期望产出、非期望产出,得到各省份交通运输碳排放效率值;第二阶段,以投入松弛量为被解释变量,以外部环境因素为解释变量建立 SFA 模型,对第一阶段的投入进行环境因素以及随机误差方面的调整;第三阶段,运用第二阶段调整后的投入和原始产出,重新用 SBM 模型测度各个省份交通运输碳排放的效率。同时笔者设定人力投入、资本投入、能源投入投入指标和二氧化碳排放量、交通运输行业增加值产出指标,对收集到的具有可比性的数据进行相对有效性测算,更全面、科学的测度碳排放效率。在碳排放效率影响因素分析方面,本研究运用模糊集定性比较分析方法(fsQCA),揭示交通运输强度、交通运输结构、能源消耗强度、能源消耗结构、行业规模、第三产业占比此六种因素对省级交通运输碳排放效率的联动效应,探

索性地识别出增强省级交通运输碳排放效率的发展路径，并比较这些路径的前因条件和组态差异。

2.2 项目研究创新点

已有研究对增强交通运输碳排放效率这一主题进行了初期有益探索，但是现有研究仍存在尚待完善之处：现有对于省级交通运输碳排放效率研究多是单向度的，偏好探讨多个影响要素对省级交通运输碳排放效率的净效应。然而，省级交通运输碳排放的复杂性较高，增强碳排放效率过程存在多重因素联合作用和多方因素组合协同互动。

本研究通过文献综述探讨识别出交通运输碳排放效率的影响因素，运用模糊集定性比较分析方法（fsQCA），揭示多种因素对省级交通运输碳排放效率的联动效应，探索性地识别出增强省级交通运输碳排放效率的发展路径，并比较这些路径的前因条件和组态差异。这样既能避免了基于回归思想的量化方法仅仅对线性关系或净效应做出阐释的弊端，又可以回应以案例分析为代表的质性方法面临样本代表性和结果推广效度的质疑。

3. 研究模型与数据说明

3.1 研究模型设计

3.1.1 三阶段 SBM-DEA 模型

为分析省级交通运输碳排放效率差异，同时提高对效率测度准确性，本研究采用三阶段 SBM-DEA 模型，将交通效率碳排放效率测度分为 3 个阶段，对传统三阶段 DEA 模型进行了改进。

第一阶段，采用非期望产出的超效率 SBM 模型替代传统 DEA 模型，使用原始投入变量与期望、非期望产出变量数据进行初始效率测度。

SBM（slack-based measure）是由 Tone 提出的一种数据包络模型，能够解决传统 DEA 模型无法解决的投入要素冗余问题，并且能够避免径向和不同角度造成的测度偏差问题。模型如下：

$$\min \rho = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\bar{x} / x_{ik})}{\frac{1}{r_1 + r_2} \left(\sum_{s=1}^{r_1} \bar{y}^d / y_{sk}^d + \sum_{q=1}^{r_2} \bar{y}^u / y_{qk}^u \right)}$$

$$\begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \lambda_j; \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{sj}^d \lambda_j; \bar{y}^d \geq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{qj}^d \lambda_j; \\ \bar{x} \geq x_k; \bar{y}^d \leq y_k^d; \bar{y}^u \geq y_k^u; \lambda_j \geq 0; \\ i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; \\ s = 1, 2, \dots, r_1, q = 1, 2, \dots, r_2 \end{cases}$$

式中：ρ为各省份交通运输碳排放效率，n 为决策单元 DMU 的数量，m、r₁、r₂ 分别为每个 DMU 的投入、期望产出和非期望产出；x、y^d、y^u 分别对应为 DMU 的投入矩阵、期望产出矩阵和非期望产出矩阵的元素。

第二阶段，为剔除外生环境和随机干扰等因素的影响，以可以反应初始低效率的投入松弛量为被解释变量，以外部环境变量为解释变量建立 SFA 模型对第一阶段的投入变量进行随机误差方面的调整。

SFA 即随机前沿方法（Stochastic Frontier Approach），是利用随机前沿生产函数进行效率估计的方法，是一种参数方法。它滤除传统 DEA 模型中外部环境与随机误差对效率的影响，使得所计算出来的效率值能更真实地反映省级交通运输碳排放的情况。SFA 模型通过对误差项的分解对决策单元的技术效率做出估计，误差项分为两部分，一项表示随机误差，另一项表示技术无效性（Technical Inefficiency）。模型形式如下：

$$y_i = \beta X_i + (v_i - u_i)$$

式中，y_i 为第 i 决策单元的产出（或产出的对数）；X_i 为第 i 决策单元的 I × 1 阶投入数量向量；β 为未知参数变量；v_i 为随机变量，假设其服从独立同一分布 N（0，σ²），且独立于 u_i；u_i 为非负随机变量，用以说明生产的技术无效性，通常假设其服从于独立同一分布 | N（0，σ²） |；N 为决策单元数，I 为第 i 决策单元投入数量的种类。

第三阶段，运用调整后的新投入变量与产出变量再次带入原非期望产出的超效率 SBM 模型测算各决策单元的效率，此时的效率已经剔除环境因素和随机因素的影响，是相对真实准确的。

3.1.2 模糊集定性比较分析方法（fsQCA）

fsQCA 即模糊集定性比较方法，这是一种案例导向型的研究方法，其基于集合论思想和组态思维，将定性分析与定量分析有效联结，基本思想就是借助架构理论和布尔代数运算，从集合的角度考察前因条件及条件组合与结果的关系，从而解释现象背后的复杂因果关系。fsQCA 其有效克服传统相关分析中的内生性、传统检验假设中的抽样偏差和数据转化过程的信息流失问题。通过集合关系而不是相关关系来推断条件和结果之间的因果关系，能够识别引发高水平交通运输碳排放效率的不同因果路径。因此，本文以 2019 年中国 30 个省、自治区、直辖市（考虑数据的可获得性，剔除西藏，港澳台地区）的交通运输碳排放效率作为研究对象，采取 fsQCA 对影响交通运输碳排放效率的因素进行组态分析。

3.2 变量设计与数据来源说明

3.2.1 结果变量的投入与产出指标

对于我国交通运输碳排放效率测度部分，本文以 2019 年中国 30 个省、自治区、直辖市为样本进行研究。考虑数据的可获得性，剔除西藏及港澳台地区，而在年份的选择上由于交通运输业相关数据受疫情管控影响较大，故不考虑选用 2020-2022 年。结合目前国内外学界对于此课题的研究与本研究需求，设置如表 1 所示结果变量。

就生产过程中的投入而言，除了交通运输行业所消耗的各种能源投入外，还涉及到人力投入和资本投入，即社会中所有从事交通运输业劳动的人和为生产过程提供保障条件的社会固定资产投资，因此本文从人力、能源、资本 3 个方面选择投入指标。设置人力投入（用交通运输、仓储和邮政业从业人员数表示）、资本投入（用交通运输、仓储和邮政业固定资产投资表示）、能源投入（用交通运输、仓储和邮政业能源消耗总量表示）此三个投入指标。

而在产出方面，交通运输业的发展带来地区生产总值增长，促进国民经济发展水平提升的同时也必然伴随着大量温室气体的排放，对环境治理带来负面影响。因此本文选择地区交通运输行业增加值（用交通运输、仓储和邮政业增加值表示）作为期望产出指标，二氧化碳排放量（用交通运输、仓储和邮政业碳排放总量表示）为非期望产出指标，以此对交通运输碳排放效率进行有效、精准测度。

数据来源包括《中国统计年鉴》、《中国交通年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国环境年鉴》、国家统计局数据库等多个渠道。其中，需要说明的是：

（1）由于交通运输行业数据的缺失，且仓储和邮政业所占的份额较少，因

此交通运输行业相关指标数据皆由交通运输、仓储和邮政业所替代。

(2) 投入指标——资本投入，交通运输行业固定资产投资额以 2007 年为基期，利用单豪杰的永续盘存法（PIA）将其换算成相应的价值^[16]。

(3) 投入指标——能源投入，交通运输行业能源消耗总量指将原煤、汽油、煤油、柴油、燃料油、润滑油、石蜡、热力、电力等能源消耗纳入计算，各能源消耗量按标准煤折算系数（参考国家统计局发布的各种能源折标准煤参考系数）统一折合成标准煤，以此加总来计算交通运输行业的能源消耗总量。

(4) 非期望产出指标——二氧化碳排放量的计算公式如下：

$$CT = \sum_{i=1}^7 FC_i \times ALC_i \times C_i \times R_i \times \frac{44}{12} + EC \times EF$$

式中：CT 为交通运输行业各能源消耗所产生的碳排放总量，FC 为六种化石燃料消耗量，ALC 为能源的平均低热值，C 为含碳量，R 表示氧化率，EC 代表电力的消耗量，EF 为电力碳排放因子。各能源的详情参数值请参照《中国能源统计年鉴》和国家发改委所发表的省级温室气体清单编制指南。

表 1 结果变量测度方法及数据来源

结果	测度方法（单位）	数据来源
投入指标——人力投入	交通运输、仓储和邮政业从业人员数（人）	国家统计局网站
投入指标——资本投入	交通运输、仓储和邮政业固定资产投资（亿元）	
投入指标——能源投入	交通运输、仓储和邮政业能源消耗总量（万吨标煤）	
非期望产出指标——二氧化碳排放量	交通运输、仓储和邮政业碳排放总量（万吨）	《中国能源统计年鉴》
期望产出指标——交通运输产业增加值	交通运输、仓储和邮政业增加值（亿元）	《中国统计年鉴》

根据国家统计局网站、《中国能源统计年鉴》、《中国统计年鉴》等渠道收集到的原始投入-产出指标数值与经过第二阶段建立 SFA 模型对投入变量进行随机误差方面的调整后的投入-产出指标数值汇总分别如图 1、图 2 所示。

省份	人力投入（人）	资本投入（亿元）	能源投入 （万吨标准煤）	期望产出（亿元）	非期望产出（万吨）
北 京	589525	1063.168	1424.420108	1025.33	2799.128036
天 津	149341	628.065	485.1731364	787.73	894.6077911
河 北	274703	2670.380	1098.11363	2916.01	1997.540039
山 西	210564	654.932	975.7504288	1006.82	1857.921776
内蒙古	199034	886.955	921.0889851	1202.71	1877.482388
辽 宁	329225	384.678	1889.064098	1313.36	3867.66205
吉 林	163199	1057.733	565.3995821	574.4	1122.842807
黑龙江	257628	1031.936	901.0737079	533	1914.162934
上 海	504331	938.800	2527.054404	1650.44	5281.103831
江 苏	483382	3014.493	2439.355634	3157.21	4874.786423
浙 江	312307	4163.750	1434.195867	1962.13	2803.356372
安 徽	237028	1963.789	1091.113199	1973.87	2196.637917
福 建	228697	2594.192	1309.401835	1484.58	2657.466171
江 西	183204	921.996	932.176305	1083.72	1873.769958
山 东	446500	4970.011	2229.725539	3636.06	4468.453598
河 南	411917	3304.469	1608.601506	2970.41	3165.51197
湖 北	309869	3445.680	2075.156609	2233.45	4204.448519
湖 南	259488	2392.057	1736.307112	1556.52	3490.591951
广 东	825844	4098.152	3555.745663	3466.42	7170.938798
广 西	190555	2728.090	1016.417349	902.04	2026.501425
海 南	72898	230.979	297.585154	246.93	605.8924921
重 庆	214978	2295.467	936.055472	977.14	1893.603558
四 川	319899	5644.456	1576.223587	1468.52	3273.6355
贵 州	131662	2286.391	831.333764	709.88	1654.208031
云 南	162998	4896.608	1337.878324	1113.14	2739.954337
陕 西	271497	2167.570	951.172211	1059.86	1724.534341
甘 肃	131580	961.548	504.1399786	438.39	932.7453432
青 海	51946	383.733	227.224124	123.18	464.203085
宁 夏	38387	181.714	176.2146165	178.21	353.3332434
新 疆	166577	1117.170	1053.627143	953.72	2124.356053

图 1 原始结果变量数值

省份	人力投入（人）	资本投入（亿元）	能源投入 （万吨标准煤）	期望产出（亿元）	非期望产出（万吨）
北 京	593418.8832	1925.081	1424.420126	1025.33	2799.128036
天 津	363690.6988	2788.497	1595.726987	787.73	894.6077911
河 北	564723.0761	3493.561	2058.057302	2916.01	1997.540039
山 西	494362.4561	1716.099	1996.03219	1006.82	1857.921776
内蒙古	426789.244	1880.977	1687.327462	1202.71	1877.482388
辽 宁	592617.5985	2014.480	2993.680017	1313.36	3867.66205
吉 林	447957.8655	2064.397	1576.531824	574.4	1122.842807
黑龙江	556562.3438	2468.550	2109.300729	533	1914.162934
上 海	628754.4201	1557.076	2849.554706	1650.44	5281.103831
江 苏	582745.5971	3325.157	2570.821462	3157.21	4874.786423
浙 江	450857.2644	4808.093	1793.778087	1962.13	2803.356372
安 徽	496041.661	2332.247	1799.936319	1973.87	2196.637917
福 建	387342.9732	2962.055	1552.608735	1484.58	2657.466171
江 西	449041.8832	1603.101	1767.334755	1083.72	1873.769958
山 东	679859.5948	5582.772	2930.811851	3636.06	4468.453598
河 南	679189.3108	3439.426	2277.928733	2970.41	3165.51197
湖 北	513453.6231	3934.051	2630.285273	2233.45	4204.448519
湖 南	514622.2597	2947.053	2496.872646	1556.52	3490.591951
广 东	987996.4937	5160.306	4182.029056	3466.42	7170.938798
广 西	479639.7762	3031.918	1815.684556	902.04	2026.501425
海 南	330269.9702	1015.196	1134.773441	246.93	605.8924921
重 庆	423902.3818	3369.870	1701.386858	977.14	1893.603558
四 川	572530.3987	5937.323	2249.125982	1468.52	3273.6355
贵 州	412668.0306	2313.223	1509.234037	709.88	1654.208031
云 南	437297.8543	4896.648	1982.939338	1113.14	2739.954337
陕 西	496387.5993	2767.664	1624.10518	1059.86	1724.534341
甘 肃	441328.8548	1264.632	1375.214482	438.39	932.7453432
青 海	319189.1909	1030.944	1054.640387	123.18	464.203085
宁 夏	297019.0103	1115.530	1059.807579	178.21	353.3332434
新 疆	419691.5199	1302.551	1681.224817	953.72	2124.356053

图 2 调整投入后的结果变量数值

3.2.2 环境变量

环境指标选取原则为对交通运输碳排放有影响,但无法主观可控。通过梳理以往碳排放效率相关研究,同时考虑交通运输行业的自身特性,综合已有相关研究,本文选取人口密度、城镇化率以及人均 GDP 作为环境变量,以剔除不同省份人口及经济发展水平的环境因素对交通运输碳排放效率测度结果的干扰与影响。

人口密度。人口密度是单位土地面积上的人口数量。人口密度作为衡量城市人口分布和土地利用状况的重要参数,对城市的发展起着重要的影响。由于人口密度具有较强的空间异质性,因此人口密度对碳排放的影响呈现出两极分化:在城市群的西北部地区,人口密度对碳排放有负向驱动,人口的聚集使得能源利用和交通出行方式发生改变,能够有效地提升能源资源的有效配置和集约利用,促进能源消耗强度的优化,从而提升交通运输碳排放效率;而在城市群的东南部地区,包括上海、浙江以及江苏等部分地区,人口密度对碳排放有正向驱动,因为这些地区就业机会多,吸引大量人才,人口密度高,将导致出行和基础设施需求增加,进而二氧化碳排放量增加。因此,如果不剔除人口密度对碳排放的影响,交通运输碳排放效率测度的准确性会受到影响。

城镇化率。城镇化率是指一个国家或地区城市人口占总人口的比例。它是衡量一个国家或地区城市化程度的重要指标,反映着城市化进程的发展水平。城镇化率的增长意味着城市人口持续增加,产生虹吸效应,不可避免的对城市中资源大量消耗,城市面积不断扩大,城市交通网络的日益复杂,同时,人口增加会带动汽车保有量的增加,使城市交通压力骤增,导致交通拥堵,物流运输效率低下,怠速行驶和频繁的刹车加速,造成燃油资源浪费,最终影响交通运输碳排放效率。

人均 GDP。人均国内生产总值是人们了解和把握一个国家或地区的宏观经济运行状况的有效工具,即“人均 GDP”,常作为发展经济学中衡量经济发展状况的指标,是最重要的宏观经济指标之一。不同的经济水平下,人类的环保意识和改善环境的效果不同。当经济水平较高时,人类就会借助于科学技术来优化能源消费结构,减少碳的排放,进而改善自身的生存环境;当经济水平较低时,人类为获取经济利益可能会采取破坏性发展的手段。聚焦于交通运输行业,不同经济水平下,人类生产生活行为对于交通运输碳排放效率会产生不同的影响。因此,对几交通运输碳排放效率的测度应剔除以上三项指标的差异化影响,排除环境的干扰从而提升测度的精准度。

3.2.3 条件变量

在我国交通运输碳排放效率影响因素组态分析阶段，本文选用交通运输强度、交通运输结构、能源消耗强度、能源消耗结构、行业规模、第三产业比值作为条件变量，以此探究提高交通运输碳排放效率的发展路径。具体测度方法、数据来源如表 2 所示。

表 2 条件测度方法及数据来源

条件	测度方法（单位）	数据来源
交通运输强度	交通运输行业的综合换算周转量与各地区 GDP 比值 （亿吨公里/亿元）	《中国统计年鉴》
交通运输结构	公路运输换算周转量占综合换算周转量的比重（%）	
能源消耗强度	单位交通产业增加值的能源消耗（交通运输行业能源消耗量与实际地区生产总值的比值）（万吨标准煤/亿元）	《中国能源统计年鉴》
能源消耗结构	电力和天然气消耗总量与交通运输行业能源消耗总量的比值（%）	《中国统计年鉴》
行业规模	交通运输行业增加值与 GDP 的比值（%）	
第三产业占比	地区第三产业产值所占地区 GDP 比重（%）	

交通运输强度以交通运输行业综合换算周转量所占地区 GDP 比重来表示。交通运输行业发展程度越高，相应受到当地政府的产业支持越多，促进其效率更有效的提升。

交通运输结构是指公路在铁路、公路、水路三种运输方式中客货运输周转量所占比例。从国民经济整体考察运输业的运输能力与运输需求的适应程度，各种运输方式都有自己的技术经济特点，但传统公路运输方式不仅面临交通拥堵问题，还产生大量的污染和环境问题。相比之下，铁路与水运等运输方式具有更高的运输效率和更低的环境影响。

能源消耗强度以能源消耗总量同交通运输产值的比值来表示，能源消耗强度的高低同交通运输行业技术水平高低息息相关，受创新能力及效率提升的重要影响。

能源消耗结构指以电力、天然气为代表的新能源消耗量与交通运输行业能源消耗总量的比值，体现了交通运输业能源消耗结构构成，新能源与传统能源的消耗比例关系。能源结构调整是为了应对能源压力和安全风险。传统能源主要依赖于化石燃料，如煤炭、石油和天然气，这些能源资源的开采和利用带来了严重的

环境污染和气候变化问题。而且，全球对这些有限资源的依赖程度越来越高，面临着日益紧张的供应压力和价格上涨的风险。因此，通过开发和利用清洁、可再生的能源资源，可以减少对传统能源的依赖，降低能源供应压力和安全风险。

而行业规模与第三产业占比不仅可以体现交通运输行业的发展规模，也可以一定程度反映不同省份的经济发展水平差异。

其中关键指标的数据计算方法如下：

(1) 交通运输结构以公路运输换算周转量占综合换算周转量的比重表示，而换算周转量=货物周转量+（旅客周转量*客货换算系数），综合换算周转量即各种运输方式的换算周转量之和，各运输方式的客货换算系数如表 3 所示。而影响因素中交通运输强度即为综合换算周转量与地区生产总值的比值。

表 3 各运输方式的客货换算系数

运输方式	铁路	公路	水路
换算系数	1	0.1	0.33

(2) 能源消耗强度与能源消耗结构中交通运输行业能源消耗总量计算方法：将原煤、汽油、煤油、柴油、燃料油、润滑油、石蜡、热力、电力等能源消耗纳入计算，各能源消耗量按标准煤折算系数（参考国家统计局发布的各种能源折标准煤参考系数）统一折合成标准煤，以此加总来计算交通运输行业的能源消耗总量。而电力和天然气消耗总量的算法相似，故此处不再赘述。

通过《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国统计年鉴》等渠道收集到我国各省以上六项影响因素具体数据汇总如图 3 所示。

省份	交通运输强度 (亿吨公里/亿元)	交通运输结构 (%)	能源强度 (万吨标准煤/亿元)	能源结构	行业规模	第三产业 结构
北京	0.036	22.733	0.040	0.126	0.0289876	0.835
天津	0.204	21.092	0.034	0.244	0.0558504	0.635
河北	0.418	54.850	0.031	0.272	0.0830665	0.513
山西	0.336	47.341	0.057	0.212	0.0591319	0.514
内蒙古	0.285	40.003	0.054	0.243	0.0698741	0.496
辽宁	0.386	28.004	0.076	0.097	0.0527254	0.5
吉林	0.179	61.020	0.048	0.195	0.0489817	0.538
黑龙江	0.141	42.172	0.066	0.098	0.0391547	0.501
上海	0.798	2.791	0.066	0.035	0.0432558	0.727
江苏	0.109	30.366	0.024	0.141	0.0316889	0.513
浙江	0.211	16.090	0.023	0.071	0.0314687	0.5
安徽	0.299	29.733	0.029	0.116	0.053184	0.508
福建	0.205	11.271	0.031	0.063	0.0350178	0.453
江西	0.187	66.272	0.038	0.068	0.0437734	0.475
山东	0.156	61.489	0.031	0.107	0.0511634	0.5
河南	0.181	54.638	0.030	0.127	0.0547448	0.5
湖北	0.152	33.072	0.045	0.087	0.0487352	0.5
湖南	0.092	37.320	0.044	0.130	0.0391556	0.532
广东	0.265	9.377	0.033	0.084	0.0321945	0.555
广西	0.212	33.389	0.048	0.114	0.0424746	0.507
海南	0.322	2.818	0.056	0.067	0.0465122	0.6
重庆	0.122	33.925	0.040	0.138	0.0413941	0.532
四川	0.068	49.282	0.034	0.120	0.0315026	0.524
贵州	0.098	36.343	0.050	0.107	0.042332	0.503
云南	0.076	58.913	0.058	0.039	0.0479311	0.526
陕西	0.156	43.615	0.037	0.331	0.0410907	0.458
甘肃	0.337	34.114	0.058	0.238	0.0502839	0.551
青海	0.162	27.273	0.077	0.200	0.0415314	0.507
宁夏	0.186	63.454	0.047	0.237	0.0475419	0.503
新疆	0.166	35.930	0.077	0.161	0.0701414	0.516

图 3 条件变量数据

4. 交通运输碳排放效率测度过程及结果

4.1 第一阶段 SBM 分析

仅考虑原始投入、产出数据，本文采用非期望产出的 SBM 模型代替传统 DEA 模型，利用 MATLAB 软件对中国 30 个省市（不包括港、澳、台、西藏）的交通运输碳排放效率进行第一阶段测算，结果如表 4 所示（调整前数据）。

从表 4 调整前数据可以看出，辽宁省、河北省、内蒙古自治区的交通运输碳排放效率值最高，分别为 1.3159、1.2174 与 0.8473；而青海省的效率值最低，仅为 0.1707，与此同时广西省、四川省、贵州省、云南省、甘肃省的效率值也低于我国各省的平均水平，效率值分别为：0.2679、0.2529、0.2744、0.2853、0.2623，五个省份效率值无较大差异。总体来看，各地区交通运输碳排放效率参差不齐，主要分布在 0.2-0.9 的区间内，受地区经济发展及地域分布等多因素共同影响，整体呈现东南沿海地区交通运输碳排放效率总体较高，西部地区交通运

输碳排放效率普遍偏低的特点。

表 4 调整前后的交通运输碳排放效率

调整前				调整后			
省份	效率值	省份	效率值	省份	效率值	省份	效率值
北 京	0.3196	河 南	0.6216	北 京	0.3591	河 南	0.8734
天 津	0.8565	湖 北	0.4243	天 津	0.3077	湖 北	0.5366
河 北	1.2174	湖 南	0.3708	河 北	1.2174	湖 南	0.4103
山 西	0.8302	广 东	0.384	山 西	0.3686	广 东	0.5169
内蒙古	0.8473	广 西	0.2679	内蒙古	0.4724	广 西	0.265
辽 宁	1.3159	海 南	0.3946	辽 宁	0.3662	海 南	0.1445
吉 林	0.3048	重 庆	0.3051	吉 林	0.2111	重 庆	0.3021
黑龙江	0.2114	四 川	0.2529	黑龙江	0.1477	四 川	0.3104
上 海	0.6202	贵 州	0.2744	上 海	1.0388	贵 州	0.2544
江 苏	0.5377	云 南	0.2853	江 苏	1.0528	云 南	0.2845
浙 江	0.407	陕 西	0.3193	浙 江	0.5564	陕 西	0.3445
安 徽	0.6672	甘 肃	0.2636	安 徽	0.7414	甘 肃	0.2073
福 建	0.398	青 海	0.1707	福 建	0.5139	青 海	0.071
江 西	0.5999	宁 夏	0.431	江 西	0.4378	宁 夏	0.1071
山 东	0.5599	新 疆	0.4115	山 东	1.0017	新 疆	0.4253

4. 2 第二阶段 SFA 回归分析

由于第一阶段并未剔除环境因素、随机干扰等因素影响，因而并不能真实地反映各省份交通运输碳排放效率的真实情况。而且，从表 4 调整前的数据可以看出，包括陕西、北京在内的北方省份与以海南、广东为代表的南方省份的效率值趋同，无法合理呈现省际碳排放效率的差异，即无法准确捕捉不同省份的碳排放效率的差异性，需要进行第二阶段的调整与数据处理。借助 Frontier 4.1 软件，将第一阶段得出各个地区投入变量的松弛变量作为被解释变量，将人口密度、城镇化率、经济发展水平三类环境因素作为解释变量，进行 SFA 回归分析，结果如表 5 所示。

其中投入变量对应的 γ 值最低为 0.98，说明环境变量的选择较为合理，且管理无效率对三种投入均有重要影响。此外，对于被解释变量 X1（交通运输、仓储和邮政业从业人数）松弛值，三个环境要素的 LR 单边检验通过了 5%（对应值为 7.045）的显著性检验，对于被解释变量 X2（交通运输、仓储和邮政业固定

资产投资)与X3(交通运输业能源消耗总量)松弛值,三类环境因素的LR单边检验通过了1%(对应值为10.501)的显著性检验。因此可以拒绝不存在管理无效率项假设,表明剥离人口密度、城镇化率、经济发展水平三个环境变量是合理且必要的^[17]。

表5 基于SFA的第二阶段估计结果

	交通运输、仓储和邮政业从业人数松弛值	交通运输、仓储和邮政业固定资产投资松弛值	交通运输业能源消耗总量松弛值
常数	-166134.40 (-41218.86) ***	4103.68 (331.64) ***	977.34 (977.03) ***
人口密度	-38210.11 (-10944.45) ***	218.50 (2.96) **	-60.83 (-60.82) ***
城镇化率	6218.44 (4046.69) ***	-9742.23 (-459.37) ***	-3123.00 (-3122.61) ***
经济发展水平	2651.63 (15.04) ***	22.00 (40.46) ***	16.28 (7.72) ***
σ^2	20912135000.00	2350411.40	398759.26
γ	0.98	1.00	1.00
LR 单边检验	7.86	12.48	15.71

注:“***”、“**”、“*”分别代表在1%、5%、10%水平下显著。

投入松弛变量是指通过改善管理水平可能减少的投入量,在回归模型中,当回归系数为负时,表示增加环境变量值有利于减少投入松弛量,即有利于减少各投入变量的浪费或降低负产出,提高能源利用效率;反之,当回归系数为正时,则表示增加环境变量将会增加投入松弛量,从而导致各投入变量的浪费或减少产出,不利于能源利用效率的提升^[18]。下面依次分析3个环境变量对松弛变量的影响:

人口密度。人口密度对交通运输、仓储和邮政业从业人数和交通运输业能源消耗总量的松弛变量回归系数均为负值且在1%水平下显著,但对交通运输、仓储和邮政业固定资产投资的松弛变量回归系数为正值。其表明人口密度的提高,能够促进、优化交通运输、仓储和邮政业从业人员的配置,提高交通运输业的劳动生产率,相应减少从业人员与能源消耗的冗余,同时人口密度较高的省份可能投入更多的固定资产投资,造成资金的过剩。

城镇化率。结果表明,交通运输、仓储和邮政业从业人数的松弛变量回归系数为正值,但对交通运输、仓储和邮政业固定资产投资和交通运输业能源消耗总量的松弛变量回归系数为负。反映出我国城镇化率较高的省份,对于交通运输的需求等多,交通运输行业发展更加迅速,对所投入的资本与能源利用率较高,能够减少交通运输业能源消耗、与固定资产投资的冗余,而伴随人口流动的城市化,

交通运输业的从业人口不断增加，易导致从业人数过剩的问题。

经济发展水平。计算结果表明，经济发展水平对三个投入变量的松弛值回归系数均为正值且在 1% 水平下显著。回归系数为正表明增大环境变量会导致增大相应的投入松弛，从而导致增大投入或者减小产出。说明经济发展水平的提升会造成交通运输、仓储和邮政业从业人数、固定资产投资、能源消耗总量的冗余增加。

4.3 第三阶段 SBM 效率调整结果与分析

根据第二阶段 SFA 模型回归结果，可以计算投入变量。将调整后投入量和原有产出数据代入第一阶段构造的 SBM 模型中进行再次测度，由此得到的交通运输碳排放效率值即为剔除了环境因素和随机因素影响后的效率值，能更加真实地反映利用效率，结果如表 4 所示（调整后数据）。

结果显示，在剔除环境因素和随机干扰后，仅有极少部分地区，如北京市、广西壮族自治区重庆市等省份调整前后先后交通运输碳排放效率值基本保持稳定；而大部分省份交通运输碳排放效率值产生了一定变化，天津、山西、辽宁等省份的交通运输碳排放效率下降幅度较大，上海、江苏、山东等省份的交通运输碳排放效率上升幅度较大。说明 SBM 模型未能排除外部环境和随机干扰的影响，造成了部分省份的效率值出现了偏差。以上海为例，作为我国沿海发达城市，人口密度大，经济发展速度极快，相关产业发展早已成熟且呈现饱和的特征，如交通运输领域相关固定资产投资较多，造成资金的过剩，城市发展吸引较多外来务工人员，交通运输相关领域就业饱和且呈过剩态势等。故此，在剔除剥离人口密度、城镇化率、经济发展水平三个环境变量影响后，其交通运输碳排放效率值变化较大。

由表 4 调整后数据进行对比可知，河北省、上海市、江苏省、山东省、河南省交通运输碳排放效率值处于全国前列，且与我国其他省份间存在较大差距，表明这些地区交通运输结构、能源消耗结构、行业规模等方面均处于较佳状态。河北省交通运输碳排放效率值最高，达到 1.2174，其余四省数值较接近，分别为：1.0388、1.0528、1.0017、0.8734。其中，进行数据调整前后对比可得，河北省数值并无明显差距，其意味着河北省受环境及随机扰动的影响小；而上海市、江苏省、山东省、河南省数值受干扰因素影响较大，其中前三省份前后效率值几乎呈现二倍增长关系。与此相反，青海省、宁夏回族自治区、海南省、黑龙江省交通运输碳排放效率值相对较低，青海省效率值低至 0.071，其余三省份数值均较低且较接近，分别为：0.1071、0.1445、0.1477。其中，进行数据调整前后对比可得，此四省交通运输碳排放效率数据有略微波动，说明此类省份本身交通运输结构、能源消耗结构、行业规模等主要客观因素存在较大问题，地区交通运输

碳排放未创造出应有的效益，应当根据具体情况通过相关路径做出有效调整。

5. 交通运输碳排放效率影响因素与组态分析

5.1 数据校准

使用 fsQCA 正式分析之前，需要将案例的所有元素和结果校准为集合隶属度，这是一个将变量值转换为集合隶属度分数的过程。参考已有研究的校准标准以及案例实际情况，本文将案例样本描述性统计数据的 90%分位值、50%分位值与 10%分位值作为校准的完全隶属点、交叉点、完全不隶属点。表 5 展示了各变量的锚点。此外，由于在 fsQCA 分析中，隶属度分数为 0.5 的案例将会自动删去，本文以隶属度分数 0.501 替换 0.5。各变量校准点结果如表 6 所示。

表 6 数据校准结果

	数据校准		
	完全隶属	交叉点	完全不隶属
交通运输强度	0.342	0.183	0.090
交通运输结构	61.067	35.022	11.081
能源消耗强度	0.067	0.044	0.030
能源消耗结构	0.243	0.123	0.067
行业规模	0.060	0.045	0.032
第三产业占比	0.595	0.515	0.480
交通运输碳排放效率	1.005	0.367	0.147

5.2 单个条件必要性分析

在进行条件组合分析之前，需要对单个条件进行必要性分析，以识别是否存在某个特定条件导致结果发生。当某一条件在结果发生时始终存在，那么该条件就成为该结果的必要条件。一致性是必要条件分析的重要标准，它衡量结果的发生取决于一个或多个条件存在的程度。当某一条件的一致性大于 0.9 时，该条件为结果发生的必要条件。从表 7 可以看出，各条件的一致性均小于 0.9，说明它们均无法构成解释高水平和非高水平交通运输碳排放效率的必要条件。

表 7 必要条件分析

前因条件	高水平交通运输碳排放效率		非高水平交通运输碳排放效率	
	一致性	覆盖率	一致性	覆盖率
交通运输强度	0.676	0.653	0.577	0.597
~交通运输强度	0.583	0.562	0.665	0.688
交通运输结构	0.656	0.610	0.671	0.669
~交通运输结构	0.644	0.646	0.608	0.655
能源消耗强度	0.466	0.475	0.714	0.779
~能源消耗强度	0.783	0.719	0.519	0.510
能源消耗结构	0.567	0.562	0.649	0.689
~能源消耗结构	0.686	0.656	0.587	0.592
行业规模	0.735	0.703	0.556	0.570
~行业规模	0.550	0.536	0.711	0.742
第三产业占比	0.561	0.592	0.633	0.717
~第三产业占比	0.732	0.651	0.640	0.610

注:符号~表示逻辑运算中的“非”，即条件缺失。

5.3 实证结果及分析

参考有关研究，在进行组态分析时需要建立真值表，并且设置相关的参数。本研究设置案例的频数阈值为 1，原始一致性阈值为 0.8，将 PRI 一致性倒序排列，PRI 一致性小于 0.7 的组合将其结果真值调整为 0，即 PRI 的阈值设为 0.7，完成真值表的构建。得出组态分析的复杂解、中间解和简单解三种情况，一般中间解和简单解是找寻路径中核心条件主要参考因素，将两者得出的组态路径结果结合起来，绘制有关路径组态的要素图，得到如表 8 所示的高水平配置效率组态结果。

对于高水平交通运输碳排放效率组态而言，无论是单个解还是总体解的一致性，均要高于可接受的最低标准 0.75，其中总体解的一致性为 0.899，表明在所有的满足高水平交通运输碳排放效率的组态中有 88.9% 的省份交通运输碳排放效率较高。总体解的覆盖度为 0.566，表明有 56.6% 的高水平交通运输碳排放效率案例可以被四种组态所解释。这四种组态可以被视为各政府及交通运输部门研究高水平交通运输碳排放效率的充分条件组合。

在四种组态路径中，路径 S3a 与 S3b 具有相同的核心条件（交通运输强度、行业规模、能源强度），但在辅助条件上却有所差异，本文将这两种路径归为一

种路径进行分析，因此本研究识别出了增强省级交通运输碳排放效率的三条发展路径：能源强度驱动型、交通运输结构-行业规模驱动型、交通运输强度-行业规模驱动型。

表 8 组态分析结果

组态 条件	S1	S2	S3a	S3b
a 交通运输强度（亿吨公里/亿元）	●		●	●
b 交通运输结构（%）	⊗	●	⊗	●
c 能源消耗强度（万吨标准煤/亿元）	⊗	⊗	⊗	⊗
d 能源消耗结构（%）	⊗	⊗	⊗	
e 行业规模（%）		●	●	●
f 第三产业占比（%）	⊗	⊗		⊗
代表省份	浙江、福建、 安徽	江西，山东	广东，安徽	河北，江西
原始覆盖度	0.238	0.349	0.223	0.291
唯一覆盖度	0.054	0.132	0.039	0.075
一致性	0.950	0.894	0.934	0.950
总体解覆盖度	0.566			
总体解一致性	0.899			

注：●作为核心条件存在；⊗为核心条件缺失；●作为边缘条件存在；⊗作为边缘条件缺失；空白表示条件可存在亦可缺席。

（1）能源强度驱动型。组态 S1 路径中，非高能源强度、非高能源结构、非高第三产业占比作为核心条件，高交通运输强度、非高交通运输结构作为辅助条件。在仅有交通运输强度作为辅助性优势条件存在的情况下可将提效重心放在能源消耗效率的提升和能源使用结构的改善上来。典型省份包括浙江、福建、安徽等。以浙江省为例，作为东部沿海经济发达省份其传统自然资源条件相比于内地省份更低，因此在能源使用的选择上也更加灵活，基于此浙江可以重点关注能源使用结构的改善，利用科技优势提高传统能源资源使用效率的同时加快能源使用结构的合理配置和转型升级。作为我国重要的制造业基地，浙江省货物运输量对碳排放效率同样有着重要的影响。随着浙江省经济的发展，货物运输量逐年增加，

加大了交通运输强度的负担，增加了碳排放，近年来浙江省政府积极推进交通基础设施建设和交通管理，“十三五”期间，浙江综合交通投资高达 1.36 万亿元，并在交通运输部支持下合聚全省之力，先试先行，取得一系列指标性硬核成果提高了道路运输效率和货运车辆利用率，降低了运输成本，从而减少了碳排放。

（2）交通运输结构-行业规模驱动型。组态 S2 是以非高能源强度、非高能结构、和非高第三产业占比为核心条件，高交通运输结构、高行业规模为辅助条件的交通运输结构-行业规模驱动型模式。代表性省份有江西、山东等。以山东为例，山东省的交通运输主要包括公路、铁路、航空和水运。其中，公路交通是主要运输方式。但由于公路交通高能耗和高排放特点，导致碳排放效率相对较低。相比之下，铁路、航空和水运等交通方式在碳排放方面相对较少，具有更高的碳排放效率。因此，山东省近年来持续优化交通运输结构，从节能降碳、污染防治、生态保护等方面着力，构建交通运输发展格局。如工业大市邹平依托“公转铁”项目，融资 60 亿元、解决 3000 亩用地难问题，成功实现了以铁路运输代替传统的公路运输，改变既有交通运输结构后每年就能减少全域汽运废气排放 400 万吨，降低企业运输成本 30 亿元，可以说是经济环境双赢。就全省来看，近年来建成全国首座高速公路加氢站、首个碳中和收费站、首个实现自我中和“零碳服务区”，光伏发电技术在交通领域加快推广应用，山东交通勇当绿色低碳高质量发展“排头兵”。此外，山东省注重突出交通运输行业企业创新主体地位，以企业为核心配置创新资源，推进行业朝绿色低碳高质量发展迈进。山东高速集团承担“氢能高速”建设任务，开展高速公路服务区加氢站规划研究，试点先行，青银高速已建成 2 座高速公路加氢站。可见，减少公路交通的比重，增加低碳交通方式的比重，同时鼓励、支持、引导新兴交通运输行业企业以及第三产业发展可以提高交通运输的碳排放效率。

（3）交通运输强度-行业规模驱动型。组态 S3a 和 S3b 两条路径由高交通运输强度、高行业规模和非高能源强度为核心条件，典型省份包括广东、安徽、河北、江西。对于组态 S3a 而言，在交通运输结构、能源消耗结构、能源强度条件限制下，合理的交通运输强度和适宜交通运输行业规模有力推动着交通运输碳排放效率的提高。安徽为该路径下的代表性案例，能源结构对其影响力度较小，能源消耗强度则发挥着关键性核心作用，这主要是因为安徽拥有“两淮”富饶的煤炭资源，这样的资源条件决定了安徽在能源消耗结构上对煤炭存在较大的依赖，而煤炭的碳排放系数较高，加重了碳排放。现阶段风能、电能等新能源在交通领域短期内还难以普及，故该因素拉动了交通碳排放。在推动高质量发展的大环境下，面对依赖于资源禀赋条件而形成的以煤炭资源为主，电力、天然气等低污染能源使用则相对少的自然背景条件，安徽省积极尝试从能源消耗强度层面寻找突

破口——深入实施五大发展行动计划，将低碳发展作为新常态下经济提质增效的重要路径，大力培育发展新兴产业、深入推动产业融合发展、加快发展现代服务业。同时实施能源消耗总量和强度双控制，形成以低碳能源满足新增能源需求的能源发展格局。实际上交通运输强度与行业规模条件的双向推动在很大程度上破除了部分环境客观禀赋条件对交通运输碳排放效率的制约——交通运输强度的增加意味着交通网络越来越健全、交通运输设施的质量和数量也在不断提高，这些改善则有助于促进交通运输车辆的效能和效率，从而减少能源的消耗和碳排放；交通运输行业规模的增加从某种层面意味着交通运输业务量的扩大，这实际上有利于促使交通运输企业及相关机构更加重视绿色交通的发展，致力于推动低碳交通方式的应用和创新。与 S3a 不同的是，高交通运输结构作为组态 S3b 的边缘条件，具有推动性作用。典型代表案例包括河北、江西。比如，河北省作为我国的一个发达省份公路交通是主要的交通运输方式之一，但由于公路运输的碳排放量较高，其碳排放效率相对较低。为了提高交通运输碳排放效率，河北省政府鼓励推进多式连用发展，优化调整运输结构。《河北省推进运输结构调整实施方案（2018-2020 年）》制发以来，河北以推动货物公路运输转铁路运输为重点，加快道路货运结构调整，强化柴油货车污染防治，加快推广应用新能源汽车，推动运输清洁化、绿色化，坚决打赢打好机动车污染防治攻坚战，全省铁路货运量 2019 年完成 2.7 亿吨，比 2017 年增长 58.8%，提前完成国家“2020 年底前全省铁路货运量比 2017 年增长 40%以上”的目标，公路货运量由 2017 年 90.7%下降到 85.7%，对交通运输碳排放效率的提高效果同样较为明显。

6. 结论与建议

6.1 研究结论

研究交通运输碳排放效率对中国交通运输业的高质量发展具有重要意义，本文通过三阶段 SBM-DEA 模型计算 2019 年我国 30 个省域的交通运输碳排放效率，并利用 fsQCA 方法对交通运输碳排放效率的六个影响因素进行组态分析，得到进一步增强交通运输碳排放效率的三条发展路径：能源强度驱动型、交通运输结构-行业规模驱动型、交通运输强度-行业规模驱动型，得出如下结论：

6.1.1 各省交通运输碳排放效率呈现空间上不均衡、受环境及多个条件变量共同影响的特点

(1) 交通运输碳排放效率在空间上呈现不均衡的特点，即我国各省域交通运输碳排放效率存在较大差异，整体呈现东部大于中、西部的格局。交通运输碳排放效率排名前五的省份依次为河北、江苏、上海、山东和河南，这些省份的节能减排经验值得在全国范围内推广；而排名后五位的省份依次为青海、宁夏、海南、黑龙江和甘肃，其中除了个别省份先天的环境条件不适宜发展交通运输业外，其他省份要根据自身的情况提高交通运输业碳排放效率。根据测算的 30 个省市（不包括港、澳、台、西藏）的交通运输碳排放效率得到全国交通运输业碳排放效率的平均值为 0.4615，平均综合效率水平较低，具有较大提高空间，且各省情况差异较大，要尽量缩小排放效率的差距。

(2) 我国省域交通运输碳排放效率具有受环境影响的特点，剔除环境因素和随机扰动对于效率测算的影响是有必要的。从具体环境因素带来的影响来说，人口密度的提升会减少交通运输业人力投入和能源投入的松弛量，增加固定资产投资的松弛量；城镇化进程会使交通运输业固定资产投资与能源消耗的投入冗余减少，也可能造成人力投入的过剩；经济发展水平的提高则使得各项投入的投入冗余增加。从空间角度来看，在三阶段 SBM-DEA 测算效率过程中，第二阶段剔除环境因素和外部干扰后，上海、天津、江苏、山东等东部地区效率值发生显著变化，而云南、新疆等西部欠发达地区效率值呈现较低水平的稳定态势，说明环境因素对东部地区的影响远大于西部地区。

(3) 交通运输碳排放效率受到多个条件变量的共同影响，不存在影响配置效率的单个必要条件。高水平交通运输碳排放效率存在：能源强度驱动型、交通运输结构-行业规模驱动型、交通运输强度-行业规模驱动型等三种发展路径，并存在一定的共性。组态路径 S1、S2 强调能源消耗强度、能源消耗结构和第三产业占比的核心作用；路径 S3a 和 S3b 则强调交通运输强度、能源消耗强度、行业规模的核心条件作用，即说明了高水平的交通运输业的发展程度与发展规模对提升交通运输碳排放效率的重要作用。

6.1.2 不同省份适用于不同的增强交通运输碳排放效率的发展路径

根据我国省份各异的客观地理交通运输条件、交通运输业发展情况与交通运输政策导向等背景条件，不同省份所对应的高水平交通运输碳排放效率发展路径是不尽相同的，不可盲目借鉴、生搬硬套，应因地制宜地在上述三条发展路径：能源强度驱动型、交通运输结构-行业规模驱动型、交通运输强度-行业规模驱动

型中寻找与本地区交通运输发展相契合的路径、发展方法与思路，如浙江、福建为组态路径 S1 能源强度驱动型的代表省份；江西、山东则适用于组态路径 S2 交通运输结构-行业规模驱动型。

6.1.3 高水平交通运输强度与行业规模的联动作用助力碳排放效率提升

在组态 S3a 与 S3b 中交通运输强度与交通运输行业规模均作为核心条件存在，对以广东、安徽、江西、河北为代表省份的交通运输碳排放效率的提升起了重要作用。这一组态结果表明在非高能源消耗强度即交通运输业技术水平有待提高的约束条件下，地方政府可以着眼于提升和扩大交通运输业的发展程度与发展规模，不断加大交通运输业对地区经济增长的贡献，从而能够获得更多政府的产业发展支持，以该发展思路提升地区交通运输碳排放效率。

6.1.4 优化交通运输结构的辅助作用不可忽视

在组态 S2 与 S3b 中，高水平交通运输结构都作为辅助条件存在。从组态间的关系来看，组态 S1 中的交通运输强度与组态 S2 中交通运输结构和行业规模具有明显的替代性关系。尤其对于清洁能源开发利用率有限的地区而言，除了提升和扩大交通运输业的发展程度与发展规模外，还可以将发展重点放在优化交通运输结构上，即降低具有高能耗和高排放特点从而导致交通运输碳排放效率低下的公路运输方式的占比，转而支持在碳排放方面相对较少的铁路、水路等交通方式的发展，充分利用地区地理优势调整、优化交通运输结构，从而实现整体交通运输业的低碳发展，提升交通运输碳排放效率。

6.1.5 提升能源消耗强度与能源消耗结构指明新发展方向

能源消耗强度与能源消耗结构在组态 S1 与组态 S2 中均作为核心条件缺失，表明我国约 56.6% 的高水平交通运输碳排放效率案例都基本不具备高水平的能源消耗强度与能源消耗结构条件，我国虽然高度重视新能源产业的发展，但清洁能源的生产制造还处于初级阶段，以煤炭为主的能源结构尚未得到本质上的扭转，即我国绝大部分地区对于清洁能源的开发使用以及对新能源技术的创新性利用、智能化应用水平均较低，具有很大的提升空间。而清洁能源的使用不会产生二氧化碳，或者产生的二氧化碳可以被自然吸收，不会导致大气中二氧化碳浓度的升高；相比传统能源，清洁能源的使用可以减少大量的二氧化碳排放，从而降低大气中的二氧化碳浓度；并且与传统能源车辆相比，天然气汽车以及气电混合动力、油电混合动力汽车的碳排放更低，而纯电动汽车在行驶中可实现零排放；与此同

时，高科技智能化交通产品也能直观地提升运输通行效率。因此，从提升能源消耗强度与能源消耗结构的角度来增强交通运输碳排放效率是符合新发展理念、新时代绿色低碳要求的重要的发展路径。

6.2 政策建议

根据上述研究结论，为提升未来我国交通运输碳排放效率本文提出以下政策建议：

6.2.1 坚持东西部协调发展，多要素共同发力打好减碳组合拳

（1）我国省域交通运输碳排放效率水平差异较大，以山东、上海、江苏、广东为代表的东部地区排放效率高，基本均能达到 0.5 以上；但以宁夏、青海为代表的西部地区排放效率较低，甚至不足 0.11，交通运输碳排放效率地域差异十分显著，因此中、西部地区的碳排放效率有广阔的提升空间，应将其作为重点监测区域，加大对中、西部地区发展的支持力度，推动区域经济发展，优化产业结构和高耗能行业改革，注重发展战略性新兴产业和高新技术产业，加快低端传统制造业的转型升级，缩小区域差异，实现交通运输领域高效碳排放的协调发展。从全局层面进行调控把握，正确处理好国家、地方政府、人民之间的利益关系，对西部地区低碳发展有利的产业给予税收政策的优惠，同时鼓励区域间进行广泛交流合作，实现技术共享，实现科技成果收益最大化。

（2）坚持多层次多角度多方面协同增进交通运输碳排放效率。由于交通运输碳排放效率受到多个影响因素的共同影响，且影响因素间存在复杂的互动机制，不存在实现高水平交通运输碳排放效率的单个必要条件，若仅着眼于单一变量的调整优化，无法实现交通运输业的整体、均衡、绿色、低碳发展。因此要求地方政府综合规划利用地区交通运输强度、交通运输结构、能源消耗强度、能源消耗结构、行业规模等影响因素，结合区域特点，有重点、针对性地制定交通运输碳排放政策，并辅之以多样化的配套措施，打好组合拳，实现多条件的联动作用、多要素共同发力，提高交通运输碳排放效率。

6.2.2 因地制宜探索“本土化”的减碳新路径

地方政府应精准识别本省的高水平交通运输碳排放效率驱动类型，考虑区域客观地理环境基础、产业结构、区域划分、人口密度、经济发展水平等宏观、微观背景条件，上下一体、统筹兼顾，因地制宜地制定差别化的特色交通运输政策，走有区别的交通发展路线，以满足不同地区的交通运输业发展需求、克服特定的

发展约束条件，实现全国各区域碳排放效率的有效提高。如针对人口密集地区，可以进一步鼓励发展完善公共交通系统，包括轨道交通、公交系统和共享出行服务，提供更多的便捷、环保的交通选择，减少私人汽车使用，减少汽车尾气排放；对于交通拥堵严重的城市，可以考虑实行交通拥堵收费政策，引导人们选择公共交通或者共享出行服务，减少单车通行，降低碳排放。

6.2.3 完善交通基础设施网络推动交通运输规模化发展

继续按照综合交通运输体系发展战略规划要求，进一步完善铁路、公路、水运、民航、邮政快递等基础设施网络，坚持生态优先，促进资源节约集约循环利用，将绿色理念贯穿于交通运输基础设施规划、建设、运营和维护全过程，构建以铁路为主干，以公路为基础，水运、民航比较优势充分发挥的国家综合立体交通网，补齐发展短板，发挥比较优势，实现相互衔接、畅通成网，加强综合交通枢纽及其集疏运配套设施建设，实现客运“零距离换乘”和货运“无缝衔接”。推动以公共交通为导向的城市发展模式，加快城市轨道交通、公交专用道、快速公交系统等大容量公共交通基础设施建设，加强自行车专用道和行人步道等城市慢行系统建设，推进各种运输方式协调发展，凸显整体优势和集约效能，切实提升综合交通运输整体效率。

6.2.4 发展多样化绿色运输方式

提高铁路水路在综合运输中的承运比重，相应减少公路承运占比。完善干线铁路集疏运体系，加快港口集疏运铁路和大型工矿企业、物流园区铁路专用线建设。加快发展以铁路、水路为骨干的多式联运，大力推进铁水联运，持续推进大宗货物和中长途货物运输“公转铁”“公转水”，大力发展高铁快递。推动城市绿色货运配送示范工程创建，鼓励共同配送、集中配送、夜间配送等运输组织模式发展。加快专业化、规模化内河港口和航道建设，加快形成江海直达、江海联运有机衔接的江海运输物流体系。全面加快推进集疏港铁路项目建设进度，加快推进沿海及内河港口大宗货物主要采用铁路、水路、封闭式皮带廊道、新能源和清洁能源汽车等绿色运输方式。积极推进多式联运“一单制”，加快培育一批具有全球影响力的多式联运龙头企业。

6.2.5 借力科技加速能源结构转型并降低交通运输能耗

(1) 强化对清洁能源的开发使用，限制资源依赖型城市的煤炭等传统能源的开采，适当提高煤炭价格。如煤矿大省山西，因长期过度依赖煤炭行业使得山

西省能源利用效率难以大幅提升。因此，应鼓励当地企业向上海、北京等发达地区的企业学习借鉴，积极探索、开发提高煤炭资源利用率的技术，降低煤炭消费比重，实施煤炭减量替代，避免能源浪费；当地政府应引导煤炭资源相关企业朝提高技术含量方向发展，进一步延伸产业链条，提高产品附加值，从根本上解决交通运输领域过度依赖传统能源的问题。同时积极发展新能源和清洁能源运输工具，依托交通强国建设试点，有序开展纯电动、氢燃料电池、可再生合成燃料车辆、船舶的试点，推动新能源车辆的应用，探索甲醇、氢、氨等新型动力船舶的应用；积极推广可持续航空燃料的应用，加强交通电气化替代；推进铁路电气化改造，深入推进机场运行电动化，进船舶靠港使用岸电，不断提高岸电使用率，推进高速公路服务区快充网络建设，鼓励开展换电模式应用。

（2）推广智能化交通配套产品，推动互联网、人工智能等新兴技术与交通运输业态融合发展，从而在运输强度一定的情况下尽可能提高通行运输效率。相关交通管理部门可以进一步着手推动智能化交通配套产品、智能监控设备的应用。加大城市交通拥堵治理，优化完善城市交通信号控制系统和交通出行诱导系统，科学合理、智能灵活调整信号配时，因地制宜设置自动化潮汐车道，推进停车电子化收费，推广智能化停车服务，推行停车“先离场后付费”服务，综合治理城市道路交通拥堵点段，优化学校、医院、商业区等重点区域交通组织，缓解城市交通拥堵。基于交通量调整红绿灯变化时间，通过信息指示牌向司机提供实时道路信息，减少交通拥堵，提高城市交通通行效率；另外推动普及道路交通信息通信系统、电子不停车收费等智能化产品的应用，提高城际道路车辆通行效率，减少车辆能耗和碳排放量。

（3）从交通运输工具本身出发，针对制造商、用户等主体，通过行政、经济等手段进行调控干预，提高交通工具能源利用效率。一方面可以通过制定更加严格的燃油消耗量限值标准，倒逼交通工具制造商加快应用低碳技术，不断进行技术创新和产品的迭代升级，进一步加大对创新型企业的扶持力度，推动提高各类交通运输工具本身能源利用效率；另一方面相关部门定期开展节能驾驶培训，提高驾驶员对节能驾驶技巧的理解和掌握，建立节能驾驶奖励制度对节能表现优秀的驾驶员给予表彰奖励，同时通过车载设备或第三方平台对驾驶员的驾驶行为进行监督并及时给予反馈和指导；同时通过合理利用税费杠杆，对高排放的交通工具征收更高税费，引导消费者选择更加环保、节能、高效的交通工具。

6.3 研究局限性

受制于时间和精力以及多方面因素限制，本课题研究仍存在许多不足：

（1）本项目以交通运输碳排放效率的发展路径为基础，提供交通运输碳排放效率组态分析新视角，提供交通运输碳排放管理政策新途径。而本研究在年份

的选择上，由于交通运输业相关数据受疫情管控影响较大，故不考虑选用2020-2022年，且因2024中国统计年鉴预计2024年9月发布，即2023年相关数据当下难以获取，故本研究选取2019年中国30个省、自治区、直辖市的交通运输碳排放效率为研究对象，考虑我国近年交通运输行业发展较快，能源结构以及国家政策的不断调整变化，可能存在本研究的测量数据、研究结论与现今社会指标存在偏差，代表性不强的情况。故此，本项目根据研究结果所提出的交通运输业相关管理政策的导向性建议本身需要进一步考证并调整。

(2) 由于时间限制，目前所选取的条件变量研究所得发展路径未达到完全理想状态。整理统计的条件变量数据投入软件运行后，所得出的路径结果未全面反映提升交通运输碳排放效率的可能路径。

(3) 本研究中如结果变量的投入-产出指标、环境变量、条件变量等指标多参照交通运输碳排放研究领域专业文献进行选取，在保证可行性的同时缺乏一定的创新性。

7. 参考文献

- [1]. Sun J W.The decrease of CO₂ Emission Intensity is Decarbonization at National and Global Levels[J].Energy Policy, 2005,33(8):975-978.
- [2]. Zhang Z Q,Qu J S,Zheng J J.A Quantitative Comparison and Analysis on the Assessment Indicators of Greenhouse Gases Emission[J].Journal of Geographical Sciences,2008,18(4):4.
- [3]. 卢建锋,傅惠,王小霞.区域交通运输业碳排放效率影响因素研究[J].交通运输系统工程与信息,2016,16(02):25-30.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2016.02.005.
- [4]. 兰梓睿,张宏武.中国交通运输业碳排放效率的省际差异研究[J].物流技术,2014,33(07):132-135.
- [5]. 王群伟,周德群,周鹏.中国全要素二氧化碳排放绩效的区域差异——考虑非期望产出共同前沿函数的研究[J].财贸经济,2010(09):112-117.DOI:10.19795/j.cnki.cn11-1166/f.2010.09.017.
- [6]. DU Q, LU C, ZOU P X W, et al. Estimating transportation carbon efficiency (TCE) across the “Belt and Road” initiative countries: An integrated approach of modified three-stage epsilon-based measurement model[J].Environmental Impact Assessment Review, 2021, 90:106634.
- [7]. 袁长伟,赵潇,孙璐.中国交通运输碳排放效率测度及收敛性研究[J].环境科学与技术,2019,42(12):222-229.DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.12.034.

- [8]. 蒋自然,金环环,王成金,等.长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985—2016 年) [J].环境科学,2020, 41(6): 2972-2980. [JIANG Z R, JIN H H, WANG C J, et al. Measurement of traffic carbon emissions an pattern of efficie ncy in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)[J]. Environmental Scie nce, 2020, 41(6):2972-2980.]
- [9]. 张诗青,王建伟,郑文龙.中国交通运输碳排放及影响因素时空差异分析[J].环境科学学报,2017,37(12):4787-4797.DOI:10.13671/j.hjkxxb.2017.0242.
- [10]. 吕雁琴,范天正,张晋宁.中国交通运输碳排放效率的时空异质性及影响因素研究[J].生态经济,2023,39(03):13-22.
- [11]. 吕小明,张宗益.我国交通运输业能源强度影响因素研究[J].管理工程学报,2012,26(04):90-99.DOI:10.13587/j.cnki.jieem.2012.04.014.
- [12]. 王鹏.交通运输业能源消耗强度变化及影响因素分析[J].现代管理科学,2015(06):85-87.
- [13]. 薛俊宁,吴佩林,李岩,高健.我国碳排放强度的影响因素分析——基于1998-2013年的面板数据[J].价格理论与实践,2014(11):43-45.DOI:10.19851/j.cnki.cn11-1010/f.2014.11.014.
- [14]. 仲云云,仲伟周.中国区域全要素碳排放绩效及影响因素研究[J].商业经济与管理,2012(01):85-96.DOI:10.14134/j.cnki.cn33-1336/f.2012.01.001.
- [15]. Xu B, Lin B. Investigating the differences in CO2 emissions in the transport sector across Chinese provinces: evidence from a quantile regression model. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 175: 109–122
- [16]. 张少华, 蒋伟杰. 能源效率测度方法: 演变、争议与未来[J]. 数量经济技术经济研究, 2016 (7) : 3-24.
- [17]. 郭四代,全梦,郭杰等.基于三阶段DEA模型的省际真实环境效率测度与影响因素分析[J].中国人口·资源与环境,2018,28(03):106-116.
- [18]. 郑思雨,周苏洋,邱玥等.基于改进三阶段数据包络分析法的省域全要素能效评价方法[J].中国电机工程学报,2023,43(14):5329-5342.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.213214.