



长江经济带交通基础设施碳解锁策略研究

陈赟*, 石晓雅, 陈先俊

长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114

摘要: 交通基础设施碳解锁是事关我国可持续发展的关键问题之一。因此, 本文选用2012—2021年长江经济带9个省市数据为研究对象, 旨在揭示区域交通基础设施在经济发展过程中的减排规律。运用模糊集定性比较分析方法(fsQCA), 本文探析了多因素协同联动对交通基础设施碳解锁的影响机制。研究发现:(1) 单个因素均不是影响长江经济带碳排放强度的必要条件。(2) 存在4条实现长江经济带碳排放强度降低、推动交通基础设施碳解锁的组态, 即制度引导策略、经济驱动策略、制度-技术二元协同策略, 以及经济-技术二元协同策略。(3) 绿色技术创新在控制碳排放强度过程中的作用突出。研究结果为长江经济带交通基础设施碳解锁策略组态提供理论支撑, 从而助力“双碳”目标实现, 推动区域和全国的可持续发展。

关键词: 长江经济带; 交通基础设施; 碳解锁; 模糊集定性比较分析

中图分类号: F512.7; X322

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(XXXX)XX-0001-11

引言

党的十九大报告中提出“交通强国”的概念以及建设指导。随后, 中共中央、国务院发布《交通强国建设纲要》, 交通运输部等多个部门联合发布实施《加快建设交通强国五年行动计划(2023—2027年)》, 明确交通运输进入加快建设交通强国的新阶

段^[1]。交通基础设施作为交通运输的重要组成部分, 是国民经济集聚基础性和先导性特征的产业, 长期保持着发展态势, 然而高耗能与高污染问题在发展过程中日益凸显^[2]。面对“碳锁定”的严峻挑战, 碳排放作为经济社会生产活动中不可避免的副产物, 其存在具有内在的必然性。在此背景下, 推动交通基础设施低碳化转型, 向发展低碳经济迈进的核心要义便在于

收稿日期: 2024-05-08; **修回日期:** 2024-07-23

基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201419)

作者简介: *陈赟(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为工程项目管理、交通基础设施管理工程。E-mail:cheny@csust.edu.cn (通信作者)

石晓雅(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为交通基础设施管理工程。E-mail:sxiaoya2022@163.com

陈先俊(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通基础设施管理工程。

引用格式: 陈赟, 石晓雅, 陈先俊. 长江经济带交通基础设施碳解锁策略研究[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20240054.

Chen Yun, Shi Xiaoya, Chen Xianjun. Study on Carbon Unlocking Strategies for Transportation Infrastructure in the Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Engineering Studies, DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20240054.

实施“碳解锁”行动——有效打破碳依赖的束缚，实现经济体系与生态环境之间的和谐共生。因此，加强交通基础设施碳减排的研究，推动交通运输可持续发展，对促进区域绿色低碳经济发展、助力“双碳”（2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”）目标实现具有重要意义。

目前，国内外学者针对碳排放影响因素的研究多从单一线性关系视角展开，Talbi^[3]通过对突尼斯交通运输业的分析发现，提高能源利用效率和燃速可以在不增加碳排放的前提下提高经济发展水平。Boldrini等^[4]对北欧的碳排放量进行测算及评估，发现道路基础设施的投资额对其碳排放具有重要影响。丁烈云^[5]强调了法律法规在碳减排政策实施中的重要作用，实现“双碳”目标需要通过设立绿色低碳相关法律等方式提供制度保障。Nurdiawati等^[6]对先进的生物燃料、绿色氢气和碳捕获与储存等脱碳技术与碳排放之间的直接影响进行了分析，发现脱碳技术存在相互依存的态势。刘志华等^[7]构建了空间计量模型证明经济发展水平、对外开放程度及环境规制是影响碳排放公平性的关键因素。Yang等^[8]通过分析中国碳排放量的关键驱动因素得出能源强度是抑制碳排放的最大驱动力。Chen等^[9]基于空间杜宾模型研究发现，中国省域CO₂排放量受绿色技术创新的影响呈现倒“U”形曲线变化。Lin和Ma^[10]认为绿色技术创新是推动绿色低碳经济发展的有效途径，其在2010年后对碳排放影响显著。

现有研究从实现步骤、路径框架与破解技术等方面对碳解锁路径进行设计，Brown^[11]指出碳解锁对基础设施转型有重要意义，可以通过调整碳税、完善法律法规以及实施财政激励政策的途径来实现。Dong等^[12]运用系统广义矩估计模型探究智慧交通对碳解锁的作用机制，提出发展智慧交通可有效推动碳解锁进程。李宏伟等^[13]指出碳解锁的实现需要多元主体参与，其中政府应扮演好政策的制定者、推动者、监管者与协调者。尹星等^[14]构建了政府与企业间的碳减排博弈模型，指出政府方应从宏观调控的角度，统筹区域发展的碳解锁路径。徐盈之等^[15]基于技术进步和制度创新视角对我国的碳解锁路径分析后指出，技术与制度的优化可以直接产生一定的碳解锁效应。

蔡海亚等^[16]基于碳投入与碳产出视角，说明技术创新、产业结构的优化和能源效率的提升对碳解锁存在促进作用。吴玉萍^[17]以河南为例探究碳解锁路径，指出碳解锁策略应从技术、制度、产业，及城镇居民消费四个层面入手。Chen等^[18]指出实现初步的碳锁定破解需要技术层面的推动，要实现全面的碳解锁则需要“技术-经济-制度”三维协同作用。

综上所述，关于碳解锁的研究多是探究单一因素与结果间的影响关系，研究的结论主要停留在各个因素是促进还是抑制碳解锁的实现。鲜有学者从组态视角探究影响因素的不同组合与结果间的演化关联^[19]。基于此，本文以长江经济带9个省（市）（上海、重庆、四川、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南）为研究案例，梳理绿色技术创新、研发投入度、政府补贴、科技支持力度、污染治理力度和环境规制六大条件要素构建影响因素指标体系，运用模糊集定性比较分析方法（fsQCA）探究多因素对长江经济带碳排放强度的联动效应，形成长江经济带交通基础设施碳解锁策略研究。最后，为更好应对交通基础设施行业覆盖广泛的特质、碳解锁过程中错综复杂的挑战以及全生命周期内实现碳解锁的迫切需求，进行组态策略分析，并基于分析结果，提出具体的对策与建议，旨在促进长江经济带交通基础设施行业的绿色转型与碳解锁进程，为交通基础设施可持续发展提供理论支撑。

1 交通基础设施碳解锁研究设计

1.1 研究方法

定性比较分析法(qualitative comparative analysis)是Charles Ragin基于组态视角来研究复杂社会现象的数据分析方法，根据数据对象的分类包括清晰集定性比较分析方法(csQCA)、模糊集定性比较分析方法(fsQCA)、多值集定性比较分析方法(mvQCA)^[20-22]。fsQCA相对于其他方法而言，具有定量和定性分析的双重优势，能够处理数据变化趋势等问题^[19,23]。由于交通基础设施碳解锁策略的作用机制具有殊途同归的特点，并且本文变量为连续变量，

选择fsQCA方法对多个复杂条件与交通基础设施碳解锁之间的关联进行探讨更贴合研究主题。

1.2 指标体系

1.2.1 条件变量选取 参考并借鉴前人研究, 本文在“企业-政府”双主体视角下从技术、经济、制度三个维度共考察绿色技术创新^[24-25]、研发投入度^[26]、政府补贴^[27-28]、科技支持力度^[29]、污染治理力度^[30]和环境规制^[31]六个条件变量。其中绿色技术创新、研发投入度以及政府补贴是从企业视角出发, 选取针对交通基础设施上市企业的数据。科技支持力度、污染治理力度以及环境规制则是从政府视角出发, 以省市为整体进行考量。关于科技支持力度、污染治理力度和环境规制的数据选取, 数据库中并没有公开的针对交通基础设施行业或企业的统计, 且交通基础设施行业在这三个方面并不是一个独立的系统, 是作为为社会和公众提供服务的公共设施, 同时也服务于其他行业, 其发展与上下游产业的发展联系紧密, 故选取省(市)整体的数据。

绿色技术创新 (green technology innovation, GTI)。创新驱动与绿色转型是实现交通基础设施建设阶段和运营阶段碳减排的必由之路, 而发明专利是绿色技术创新的重要途径^[24-25]。本文采用各省(市)交通基础设施上市企业的绿色发明专利申请量来衡量技术发展水平, 该值越大, 说明该地区绿色技术创新水平越高。

研发投入度 (R&D investment, RDI)。研发投入是衡量一个企业自主创新规模与能力的重要指标^[26]。足够的研发投入可以保障技术创新活动的持续进行, 加快绿色技术的研发与应用, 从而为交通基础设施碳解锁提供更多技术支持。本文选取各省(市)交通基础设施上市企业研发投入金额作为衡量标准。

政府补贴 (government subsidies, GS)。地方政府通过财政补贴的方式激励企业进行低碳投资和技术创新等活动, 以此促进交通基础设施企业转型低碳发展^[27-28]。本文选取各省(市)交通基础设施上市企业收到的政府补贴衡量政府对企业发展的支持度。

科技支持力度 (science and technology support, STS)。政府支持创新发展的分配及其变化对推动交

通基础设施企业技术进步和产业升级有重要意义^[29]。本文选取各省市地方财政预算中的科学技术支出占一般公共预算支出的比值计算。

污染治理力度 (pollution control effort, PCE)。污染治理力度指地方政府通过环保支出的手段对损害公共环境的行为进行规制, 是减少交通基础设施碳排放的重要措施之一^[30]。本研究选取各省(市)环境污染治理投资额占地区生产总值的比值计算。

环境规制 (environmental regulation, ER)。自2010年“低碳”首次被写入国务院工作报告以来, 中央、地方政府出台了一系列减排降碳的政策, 致力于引导区域低碳发展, 为“双碳”目标实现打下良好基础^[31]。本文选择环境规制作为政府视角制度维度的条件变量, 在国家法律法规数据库中检索以绿色、低碳为关键词的政策, 选取各省(市)政策文件中环保政策词频累计数衡量。

1.2.2 结果变量选取 考察CO₂排放变化的驱动因素, 对于制定双碳目标下的减排政策与行动方案至关重要^[32]。因此, 选取2012—2021年长江经济带9个省(市)碳排放强度 (carbon emission intensity, CEI) 作为衡量交通基础设施碳解锁效果的结果变量。考虑到针对交通基础设施的碳排放统计工作的复杂性以及交通基础设施与社会整体发展的相关性, 碳排放强度根据二氧化碳排放量与地区生产总值的比值计算。

1.3 研究区域与数据来源

长江经济带横跨我国东、中、西三大地区, 是我国经济发展的中心, 也是区域高质量发展的重要载体。故选取长江经济带9个省(市) (考虑到数据的可获得性, 不包括云南省和贵州省) 为研究对象, 数据均来源于2012—2021年万得数据库、国家法律法规数据库、国家统计局官方网站、《中国统计年鉴》和各省(市)统计年鉴。变量赋值说明和数据来源见表1。

1.4 数据校准

在对数据组态分析之前, 需要对原始数据进行处理, 即校准^[21]。本文采用直接赋值法, 设定3个锚点值: 样本数据95%分位值设置为完全隶属点, 50%

表1 变量赋值说明和数据来源

Table 1 Description of variable assignments and data sources

变量	赋值说明 (单位)	数据来源
条件变量 绿色技术创新 (GTI)	2012—2021年各省市交通基础设施上市企业绿色发明专利申请量 (项)	万得数据库 (https://www.wind.com.cn)
研发投入度 (RDI)	2012—2021年各省市交通基础设施上市企业研发低碳技术投入金额 (万元)	万得数据库 (https://www.wind.com.cn)
政府补贴 (GS)	2012年—2021年各省市交通基础设施上市企业收到政府补贴 (万元)	万得数据库 (https://www.wind.com.cn)
科技支持力度 (STS)	2012—2021年各省市地方财政预算中科学技术支出占一般预算支出的比重 (%)	《中国统计年鉴》 (https://www.yearbookchina.com)
污染治理力度 (PCE)	2012—2021年各省市环境污染治理投资额占地区生产总值的比重 (%)	《中国统计年鉴》 (https://www.yearbookchina.com)
环境规制 (ER)	2012—2021年各省市政策文件中环保政策词频数和和 (个)	国家法律法规数据库 (https://flk.npc.gov.cn)
结果变量 碳排放强度 (CEI)	2012—2021年CO ₂ 排放量占地区生产总值的比重 (吨/万元)	国家统计局 (http://www.stats.gov.cn)

分位值设置为交叉点, 5%分位值设置为完全不隶属点, 实现原始数据到模糊集隶属分数的转换^[33]。各条件变量和结果变量的校准信息如表2所示。

表2 变量校准锚点

Table 2 Variable calibration anchors

条件变量	完全隶属	交叉点	完全不隶属
绿色技术创新 (GTI)	12.55	0.00	0.00
研发投入度 (RDI)	5718.78	137.82	0.00
政府补贴 (GS)	55368.99	2140.68	31.46
科技支持力度 (STS)	5.21	2.84	1.14
污染治理力度 (PCE)	7.51	6.46	5.56
环境规制 (ER)	20.10	2.00	0.00
碳排放强度 (CEI)	1.60	1.02	0.66

2 交通基础设施碳解锁策略设计

2.1 单一条件必要性分析

应用fsQCA3.0软件测算各条件变量的一致性 (C_{con}) 与覆盖率 (C_{cov}), 以探究单一条件变量是否足以被视为导致结果变量产生的必要条件^[34]。在单一条件 (设为 X) 对于结果 (设为 Y) 的必要性分析中, 一致性用于衡量前因条件与结果之间的关系强

度, 其一般形式如式 (1) 所示; 覆盖率是衡量前因条件对结果解释程度的指标, 具体计算公式如式 (2) 所示。

$$C_{con} = \frac{\sum [\min(X_i, Y_i)]}{\sum(Y_i)} (Y_i \leq X_i) \quad (1)$$

$$C_{cov} = \frac{\sum [\min(X_i, Y_i)]}{\sum(X_i)} (Y_i \leq X_i) \quad (2)$$

式中, X_i 表示单一条件 X 在各个案例中的隶属度 (即满足 X 的程度, 取值范围 [0,1]); Y_i 表示结果 Y 在各个案例中的隶属度 (即满足 Y 的程度, 取值范围 [0,1])。

分析结果如表3所示, 条件变量对于碳排放强度的一致性均低于0.9。根据必要性条件判定准则可知, 不存在单一因素构成高与非高碳排放强度的必要条件。因此, 有必要进一步分析条件变量的联结协同关系对碳排放强度的作用机制。

2.2 条件组态充分性分析

为揭示多重因素的不同组合形式对长江经济带碳排放强度的影响机制, 构建长江经济带交通基础设施碳解锁策略, 对条件组态进行充分性分析。

首先, 构建真值表并设定相关参数。由于本研究

表3 条件变量的必要性检验

Table 3 Necessity tests for conditional variables

条件变量	结果变量CEI		结果变量~CEI	
	一致性	覆盖率	一致性	覆盖率
	C_{con}	C_{cov}	C_{con}	C_{cov}
绿色技术创新(GTI)	0.7342	0.5811	0.8455	0.7315
绿色技术创新(~GTI)	0.6607	0.7965	0.5157	0.6796
研发投入度(RDI)	0.4295	0.4945	0.6091	0.7665
研发投入度(~RDI)	0.7972	0.6511	0.5983	0.5341
政府补贴(GS)	0.4581	0.5224	0.6268	0.7812
政府补贴(~GS)	0.8081	0.6646	0.6168	0.5544
科技支持力度(STS)	0.5679	0.5470	0.6449	0.6790
科技支持力度(~STS)	0.6667	0.6321	0.5698	0.5904
污染治理力度(PCE)	0.4547	0.4351	0.8253	0.8633
污染治理力度(~PCE)	0.8572	0.8178	0.4600	0.4797
环境规制(ER)	0.3749	0.4155	0.6938	0.8435
环境规制(~ER)	0.8560	0.7189	0.5174	0.4750

注：“~”在逻辑运算中表示“非”。

案例数为90属于中等规模, 将案例频数阈值、一致性阈值和子集关系一致性阈值分别设定为1.0、0.8和0.8^[35-37]。其次, 进行fsQCA标准化分析得出复杂程度不同的3种解: 复杂解、中间解和简单解^[19]。其中不纳入逻辑余项的解为复杂解, 仅纳入符合理论、经验预期的逻辑余项并且复杂程度适中的解为中间解(最优解), 纳入全部逻辑余项但不检验其科学性的解为简单解^[38]。将同时出现在中间解和简单解的条件变量视为核心条件, 说明该变量对结果的产生有显著影响; 将仅出现在中间解的条件变量视为边缘条件, 说明该变量对结果的产生起辅助作用^[21,39]。最后, 进一步整理结果, 得到长江经济带非高碳排放强度组态构型, 并计算每种组态的一致性、原始覆盖率、唯一覆盖率、总体覆盖率和总体一致性。其中, 原始覆盖率衡量的是某一特定条件组态对结果集合的覆盖程度, 即该条件组态能解释的结果集合中案例的比例; 唯一覆盖率是在考虑其他解的情况下, 某一条件组态独有的对结果集合的覆盖程度; 总体覆盖率是指所有条件组态共同对结果集合的覆盖程度, 是衡量整个解决方案对结果解释能力的指标; 总体一致性是衡量所有条件组态与结果集合之间一致性程度的指标, 反映

了条件组态作为结果充分条件的可靠程度。

如表4所示, 推动长江经济带交通基础设施碳解锁策略的组态有4条: H1、H2、H3、H4。其中, 各组态的一致性分别为0.9510、0.9815、0.9825、0.9919。总体一致性为0.9664, 表明在所有满足该4条组态构型的省市中有96.64%的地区呈现出较低的碳排放强度。总体覆盖率为0.6117, 意味着该4条组态构型可以解释长江经济带61.17%地区的碳排放强度。

表4 长江经济带碳排放强度的组态结果

Table 4 Grouping results of carbon emission intensity in the Yangtze River Economic Belt

条件变量	碳排放强度(~CEI)			
	H1	H2	H3	H4
绿色技术创新(GTI)	●	●	●	●
研发投入度(RDI)			●	●
政府补贴(GS)		●		●
科技支持力度(STS)	⊗		●	●
污染治理力度(PCE)	●	●	⊗	●
环境规制(ER)	●	●	●	
一致性	0.9510	0.9815	0.9825	0.9919
原始覆盖率	0.3551	0.4513	0.1791	0.3666
唯一覆盖率	0.0687	0.0283	0.0219	0.0623
总体覆盖率	0.6117			
总体一致性	0.9664			

注: 表示●核心条件存在; ●表示边缘条件存在; ⊗表示核心条件缺失; ⊙表示边缘条件缺失; 空白表示该条件存在与否不影响结果变量的产生。

H1: 表明当环境规制作为核心条件存在, 绿色技术创新和污染治理力度作为边缘条件存在, 即使科技支持力度作为核心条件缺失, 也能够实现非高碳排放强度。环境规制代表着地方政府对减排降碳的重视程度, 绿色低碳制度的合理引导与落实在为行业与企业的发展指明方向的同时, 也可以有效规范企业与个人的社会行为。从政府视角出发, 利用好促进绿色低碳的相关政策工具, 引导交通基础设施企业应用、发展绿色技术实现减排降碳, 并对环境污染积极治理, 为交通基础设施行业创造良好的制度环境。因此, 将组态H1命名为制度引导策略。

H2: 表明政府补贴、污染治理力度作为核心条

件存在，绿色技术创新、环境规制作为边缘条件存在，能够实现非高碳排放强度。政府针对企业的低碳补贴与对环境污染的治理支出是在双碳目标深化推进的背景下给予企业和社会的经济支持，会显著促进企业社会责任水平的提升^[40]。将经济维度的手段作为核心驱动力量，辅以绿色专利的产出与法律制度的完善，驱动长江经济带非高碳排放强度的产出。因此，将组态H2命名为经济驱动策略。

H3：表明当研发投入度和环境规制作为核心条件存在，绿色技术创新和科技支持力度作为边缘条件存在，即使污染治理力度作为边缘条件缺失，也能够实现非高碳排放强度。随着经济全球化进程的持续推进，仅依靠学习和模仿无法确保可持续发展，自主创新对于维持企业自身竞争优势显得尤为重要^[41]。交通基础设施企业应当专注于自身领域，通过研发投入产出新技术、新应用，不断钻研提升专业能力水平。与此同时，政府着力于法律法规与政策制度的实施，再加上一定的科学技术财政支持，即使没有发放低碳补贴和治理环境污染，也能推动长江经济带交通基础设施碳解锁实现。因此，将组态H3命名为制度-技术二元协同策略。

H4：表明政府补贴和污染治理力度作为核心条件存在，绿色技术创新、研发投入度和科技支持力度作为边缘条件存在，能够实现非高碳排放强度。政府以紧抓环境污染治理力度为前提为行业发展清扫生态阻碍，继而落实低碳补贴、科技支持力度这类经济支持为企业提供发展动力，促使企业加大研发投入与技术产出。联合“企业-政府”利益双主体从经济与技术两个维度引导低碳发展与转型。因此，将组态H4命名为经济-技术二元协同策略。

此外，非高碳排放强度产生的4条组态中均出现绿色技术创新这一条件变量，说明绿色技术创新对长江经济带碳排放强度降低起推动作用。企业处于低碳发展进程中拥有一定的技术创新水平，在面对行业风向的变动以及市场变化的挑战时，将更快发现问题并作出合理的战略调整措施。因此，绿色技术创新对碳排放强度降低具有重要影响。

2.3 稳健性分析

参考现有研究的检验方法，本文使用调整一致性阈值和更换校准锚点两种方法予以稳健性分析^[20,42]。

方法一：将案例原始一致性阈值从0.8提高至0.9，得到的长江经济带交通基础设施碳解锁策略的组态与调整前的4条组态一致。方法二：将案例原始数据校准的锚点值从95%、50%、5%调整至75%、50%、25%，校准后进行必要性分析可知不存在单一因素构成高与非高碳排放强度的必要条件。随后在条件组态充分性分析中仍将案例频数阈值、一致性（RAW）阈值和子集关系一致性（PRI）阈值分别设定为1.0、0.8和0.8，得到两条组态：h1、h2。由表5可知h1、h2与原四条组态中的H1、H4一致，即调整模糊隶属度后得到的组态集合为原组态集合的子集。两种检验方法均认为本研究结论具有稳健性。

表5 更换校准锚点的稳健性检验

Table 5 Robustness tests for replacing calibration anchors

条件变量	碳排放强度(~CEI)	
	h1	h2
绿色技术创新(GTI)	●	●
研发投入度(RDI)		●
政府补贴(GS)		●
科技支持力度(STS)	⊗	●
污染治理力度(PCE)	●	●
环境规制(ER)	●	
一致性	0.9320	0.9856
原始覆盖率	0.2826	0.3599
唯一覆盖率	0.1894	0.2668
总体覆盖率	0.5493	
总体一致性	0.9624	

注：表示●核心条件存在；●表示边缘条件存在；⊗表示核心条件缺失；空白表示该条件存在与否不影响结果变量的产生。

3 结果与讨论

3.1 研究结果

本文从组态视角出发，探讨2012—2021年长江经济带9个省（市）中绿色技术创新、研发投入度、

政府补贴、科技支持力度、污染治理力度和环境规制六个前因变量对碳排放强度的影响, 挖掘多因素推动长江经济带交通基础设施碳解锁的作用机制, 得出如下结论。

(1) 单个因素均不是影响长江经济带碳排放强度的必要条件, 实现长江经济带碳排放强度的控制需要各条件共同作用。

(2) 各前因条件通过协同联动作用产生了4条降低碳排放强度的组态, 这4条组态结果体现了实现长江经济带交通基础设施碳解锁的多元策略和复杂机制。即制度引导策略、经济驱动策略、制度-技术二元协同策略, 以及经济-技术二元协同策略。

(3) 绿色技术创新在控制长江经济带碳排放强度的过程中起突出作用, 表明技术层面的推动对长江经济带交通基础设施碳解锁至关重要。

3.2 建议与讨论

近年来, “低碳化” 已经成为长江经济带区域政策和规划的必要指向与发展趋势, 而交通基础设施作为区域发展的必要条件, 推动交通基础设施减排降碳是实现双碳目标不可忽略的问题。在此现实背景下, 结合研究结果, 未来降低碳排放强度、实现交通基础设施碳解锁可以从以下四点给予考虑。

一是绿色技术引领。绿色技术创新对长江经济带碳排放的控制作用显著, 而双碳目标的实现是长期减碳脱碳, 逐步解除“碳锁定”的复杂过程。因此, 仅依靠学习和模仿来解决交通基础设施的绿色难题是远远不够的。交通基础设施企业及其上游企业应加大研发投入, 从绿色材料、专利技术以及管理模式等维度突破创新, 构建良性循环的绿色技术创新体系。

二是经济手段支撑。在“低碳化”进程中, 政府

需要利用好经济手段, 保证交通基础设施企业的低碳补贴收入, 为企业提供发展支持, 并增加科学技术支出与环境保护支出为交通基础设施的发展营造良好的社会环境和自然环境, 推动行业的低碳发展。

三是低碳制度引导。政府应依照实际条件和综合考虑, 利用政策工具制定碳排放标准、补贴机制及实施措施, 用制度合理引导交通基础设施企业, 提高交通基础设施碳解锁的驱动力。

四是企业与政府之间应相互联动, 共同促进交通基础设施低碳高质量发展。企业与政府关于低碳行为的影响是双向多路径的。企业应该时刻关注政府官方消息与文件, 从而积极调整自身发展战略。政府也应向企业以及行业传递信号, 引导其全面绿色转型。

4 结语

本文聚焦于长江经济带交通基础设施碳解锁策略研究。运用模糊集定性比较分析方法(fsQCA), 探索绿色技术创新、研发投入度、政府补贴、科技支持力度、污染治理力度和环境规制六个因素间如何协同作用, 共同影响交通基础设施的碳解锁进程。研究发现: 长江经济带交通基础设施的碳解锁是一个多维度的复杂过程, 其成效并非单一因素所能直接决定, 而是需要多条件的共同作用与相互促进, 其中绿色技术创新是推动交通基础设施绿色低碳转型的关键所在。研究结果揭示了影响长江经济带交通基础设施碳解锁的多因素协同机制, 同时也为政策制定者、行业从业者和学术研究者提供了理论支持, 推动形成更加科学合理的交通基础设施发展规划与碳解锁策略体系, 为实现经济社会的可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1] 交通运输经济运行加快恢复增长实现良好开局[J]. 交通财会, 2023(5): 57.
The economic operation of transportation has been accelerated, and growth has been restored to achieve a good start[J]. Finance & Accounting for Communications, 2023(5): 57.
- [2] 沈坤荣, 史梦昱. 以交通强国建设为中国式现代化提供强大支撑[J]. 政治经济学评论, 2023, 14(6): 22-41.
Shen K R, Shi M Y. Providing strong support for Chinese path to modernization by building a country with great transportation strength[J].

- China Review of Political Economy, 2023, 14(6): 22-41.
- [3] Talbi B. CO₂ emissions reduction in road transport sector in Tunisia[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 232-238.
- [4] Boldrini N O N, Diniz C G D L, Zanchetta I T. Evaluation of energy consumption and emissions of carbon dioxide of road transport of Brazil(2016—2026)[J]. Desenvolvimento E Meio Ambiente, 2020, 54: 205-226.
- [5] 丁烈云. 尽快完善碳达峰、碳中和立法推动我国绿色低碳健康发展[J]. 中国勘察设计, 2021(3): 18-19.
Ding L Y. Improve legislation on carbon peaking and carbon neutrality as soon as possible to promote China's green, low-carbon and healthy development[J]. China Engineering Consulting, 2021(3): 18-19.
- [6] Nurdawati A, Urban F. Decarbonising the refinery sector: a socio-technical analysis of advanced biofuels, green hydrogen and carbon capture and storage developments in Sweden[J]. Energy Research & Social Science, 2022, 84: 102358.
- [7] 刘志华, 徐军委. "双碳"目标下中国省域碳排放公平性及其影响因素[J]. 地理科学, 2023, 43(1): 92-100.
Liu Z H, Xu J W. Equity and influence factors of China's provincial carbon emissions under the "Dual Carbon" goal[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(1): 92-100.
- [8] Yang J, Cai W, Ma M D, et al. Driving forces of China's CO₂ emissions from energy consumption based on Kaya-LMDI methods[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 711: 134569.
- [9] Chen H Y, Yi J Z, Chen A B, et al. Green technology innovation and CO₂ emission in China: Evidence from a spatial-temporal analysis and a nonlinear spatial durbin model[J]. Energy Policy, 2023, 172: 113338.
- [10] Lin B Q, Ma R Y. Green technology innovations, urban innovation environment and CO₂ emission reduction in China: Fresh evidence from a partially linear functional-coefficient panel model[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, 176: 121434.
- [11] Brown M A. Could the US become a role model for electricity decarbonization?[J]. One Earth, 2021, 4(4): 466-469.
- [12] Dong K Y, Jia R W, Zhao C Y, et al. Can smart transportation inhibit carbon lock-in? The case of China[J]. Transport Policy, 2023, 142: 59-69.
- [13] 李宏伟, 杨梅锦. 低碳经济中的"碳锁定"问题与"碳解锁"治理体系[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(15): 43-47, 48.
Li H W, Yang M J. The "carbon lock-in" problem and the "carbon unlock" governance system in the low-carbon economy[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2013, 30(15): 43-47, 48.
- [14] 尹星, 张济建. 技术-制度双"解锁"视角下碳减排问题研究[J]. 合肥学院学报(综合版), 2020, 37(2): 34-41.
Yin X, Zhang J J. Research on the carbon reduction from double lock-out perspective of technology-institution[J]. Journal of Hefei University (Comprehensive ED), 2020, 37(2): 34-41.
- [15] 徐盈之, 郭进, 刘仕萌. 低碳经济背景下我国碳锁定与碳解锁路径研究[J]. 软科学, 2015, 29(10): 33-38.
Xu Y Z, Guo J, Liu S M. An empirical study on Chinese carbon lock-in and unlocking path under the background of low-carbon economy [J]. Soft Science, 2015, 29(10): 33-38.
- [16] 蔡海亚, 徐盈之, 双家鹏. 区域碳锁定的时空演变特征与影响机理[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2016, 18(6): 23-31.
Cai H Y, Xu Y Z, Shuang J P. The study of temporal and spatial evolution characteristics and the effect mechanism of regional carbon lock-in[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2016, 18(6): 23-31.
- [17] 吴玉萍. 河南城镇化进程中碳锁定的形成机制及解锁策略研究[J]. 河南师范大学学报(哲学社会科学版), 2016, 43(3): 73-76.
Wu Y P. The study on formation mechanism of carbon-lock and unlocked strategy in the process of urbanization in Henan[J]. Journal of Henan Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2016, 43(3): 73-76.
- [18] Chen Y, Wang D, Zhu W X, et al. Effective conditions for achieving carbon unlocking targets for transport infrastructure development-joint analysis based on PLS-SEM and NCA[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(2): 1170.
- [19] 谭春辉, 王晓宇, 刁斐, 等. 基于fsQCA方法的社会化问答社区用户持续使用意愿影响机理研究[J]. 图书馆学研究, 2023(1): 74-86.
Tan C H, Wang X Y, Diao F, et al. Research on the influence mechanism of users' continuous use intention in the social Q&A community based on the fsQCA method[J]. Research on Library Science, 2023(1): 74-86.
- [20] Fiss P C. Building better causal theories: A fuzzy set approach to typologies in organization research[J]. Academy of Management Journal, 2011, 54(2): 393-420.
- [21] 杜运周, 贾良定. 组态视角与定性比较分析(QCA): 管理学研究的一条新道路[J]. 管理世界, 2017(6): 155-167.
Du Y Z, Jia L D. Configuration perspective and qualitative comparative analysis (QCA): A new approach to management research[J]. Management World, 2017(6): 155-167.

- [22] 李亮亮. 基于QCA的淮安市排水管道缺陷及其修复的组态研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
Li L L. Study on configuration of drainage pipe defects and repair based on QAC in Huai'an City[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
- [23] 李隼, 吴和成. 中国众创空间创新创业效率及其提升路径研究: 基于两阶段混联网络DEA与fsQCA方法[J]. 研究与发展管理, 2022, 34(3): 66-80.
Li J, Wu H C. Innovation and entrepreneurship efficiency and its improvement path in China's crowd innovation spaces: Based on the two-stage parallel-series network DEA and fsQCA[J]. R&D Management, 2022, 34(3): 66-80.
- [24] 董碧滢, 徐盈之, 孙文远. "调结构"视角下绿色技术创新的碳解锁路径研究: 环境规制的调节效应[J]. 研究与发展管理, 2023, 35(4): 34-49.
Dong B Y, Xu Y Z, Sun W Y. Research on the carbon unlocking path of green technology innovation from the perspective of "economic restructuring": Moderating effect of environmental regulation[J]. R&D Management, 2023, 35(4): 34-49.
- [25] 刘军, 曹雅茹, 吴昊天. 产业协同集聚对区域绿色创新的影响[J]. 中国科技论坛, 2020(4): 42-50.
Liu J, Cao Y R, Wu H T. The influence of industrial co-agglomeration on regional green innovation[J]. Forum on Science and Technology in China, 2020(4): 42-50.
- [26] 柯技. 我国大中型工业企业研发能力明显增强[N]. 中国信息报, 2007-08-02(002).
Ke J. The R&D capabilities of China's large and medium-sized industrial enterprises have been significantly enhanced[N]. China Information News, 2007-08-02(002).
- [27] 戴道明, 王忆都. "双碳"目标下多周期供应链碳减排协调决策研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(3): 1-8.
Dai D M Wang Y D. Research on coordinated decision-making of carbon emission reduction in multi-cycle supply chain under double carbon goals[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University(Natural Science Edition), 2023, 40(3): 1-8.
- [28] 孙秀梅, 闫肃. TOE框架下资源型城市低碳转型驱动路径: 基于我国108个资源型城市的fsQCA研究[J]. 科技进步与对策, 2023(23): 72-81.
Sun X M, Yan S. The driving path for low-carbon transformation of resource-dependent cities under the TOE framework: An fsOCA research based on 108 resource-dependent cities in China [J]. China Industrial Economics, 2023(23): 72-81.
- [29] 郑烨, 吴昊, 孟凡蓉. 强度与指向: 政府支持企业创新发展的注意力研究: 基于中央科技政策文本的分析[J]. 技术经济, 2023, 42(4): 12-23.
Zheng Y, Wu H, Meng F R. The attention evolution of the government supports enterprise innovation and development: Based on the analysis of the central science and technology policy texts from 1983 to 2019[J]. Journal of Technology Economics, 2023, 42(4): 12-23.
- [30] 崔惠玉, 王宝珠, 徐颖. 绿色金融创新、金融资源配置与企业污染减排[J]. 中国工业经济, 2023(10): 118-136.
Cui H Y, Wang B Z, Xu Y. Green financial innovation, financial resource allocation and enterprise pollution reduction[J]. China Industrial Economics, 2023(10): 118-136.
- [31] 佟岩, 赵泽与, 李鑫. 地方政府减碳重视度与企业数字化转型——来自高耗能上市公司的经验证据[J]. 财经论丛, 2023(12): 82-91.
Tong Y, Zhao Z Y, Li X. Local governments' emphasis on carbon reduction and enterprise digital transformation: Evidence from high energy-consuming listed companies[J]. Collected Essays on Finance and Economics, 2023(12): 82-91.
- [32] 王火根, 汪钰婷, 肖丽香. 基于IO-SDA法的2020—2060年中国行业CO₂排放预测与分析[J]. 中国环境科学, 2024, 44(3): 1743-1755.
Wang H G, Wang Y T, Xiao L X. Forecast and analysis of China's industrial CO₂ emissions from 2020 to 2060 based on the IO-SDA method[J]. China Environmental Science, 2024, 44(3): 1743-1755.
- [33] Ragin C C. Redesigning Social Inquiry[M]. Chicago: University of Chicago Press, 2008.
- [34] 曲小瑜, 赵子煊. 中国工业绿色全要素生产率特征要素及多元提升路径研究: 基于fsQCA方法[J]. 运筹与管理, 2022, 31(6): 154-160.
Qu X Y, Zhao Z X. Research on characteristic factors and multiple promotion paths of China's industrial green total factor productivity based on fsQCA[J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(6): 154-160.
- [35] 张明, 杜运周. 组织与管理研究中QCA方法的应用: 定位、策略和方向[J]. 管理学报, 2019, 16(9): 1312-1323.
Zhang M, Du Y Z. Qualitative comparative analysis(QCA) in management and organization research: Position, tactics, and directions[J]. Chinese Journal of Management, 2019, 16(9): 1312-1323.
- [36] Hao Z, He G, Wang X, et al. Effect route of entrepreneurial ecosystem on rural industry revitalization: A research based on fuzzy set qualitative comparative analysis[J]. Science of Science and Management of S. & T. 2022, 43(1): 57-75.

- [37] 向熠, 叶言, 缪甜甜, 等. 长江经济带农业全要素生产率提升路径研究——基于 38 市的 DEA 与 fsQCA 分析[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(9): 189-202.
Xiang Y, Ye Y, Miao T T, et al. Research on the path of agricultural total factor productivity improvement in the Yangtze River economic belt: Based on DEA and fsQCA analysis of 38 cities[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(9): 189-202.
- [38] 王依萍, 宋京妮. 组态视角下交通运输绿色全要素生产率提升路径研究[J/OL]. 软科学, 1-11[2023-12-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20231204.1936.012.html>.
Wang Y P, Song J N. Research on the improvement path of green total factor productivity in transportation from the perspective of configuration[J/OL]. Soft Science: 1-11[2023-12-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20231204.1936.012.html>
- [39] 冯朝睿, 陈畅. 中国大数据产业高水平发展的多元路径选择: 基于 TOE 框架的组态分析[J]. 昆明理工大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 57-66.
Feng Z R, Chen C. Diversified path choices for the high-level development of big data industry in China: Configuration analysis based on TOE framework[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Social Sciences), 2021, 21(3): 57-66.
- [40] 李苗. 政府财政补贴对企业社会责任履行的影响研究[J]. 财会通讯, 2023(22): 63-68.
Li M. Research on the impact of government financial subsidies on the implementation of corporate social responsibility[J]. Communication of Finance and Accounting, 2023(22): 63-68.
- [41] 魏奇锋, 郭安妮, 盛毅. 产业集聚视域下多要素驱动区域创新发展的组态效应分析——以成渝地区双城经济圈为例[J/OL]. 软科学: 1-14 [2023-12-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20231128.1742.002.html>.
Wei Q F, Guo A N, Shen Y. The grouping effect of multifactor-driven regional innovation development under the perspective of industrial agglomeration: Taking Chengdu-Chongqing economic circle as an example[J/OL]. Soft Science: 1-14[2023-12-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20231128.1742.002.html>.
- [42] 张明, 蓝海林, 陈伟宏, 等. 殊途同归不同效: 战略变革前因组态及其绩效研究[J]. 管理世界, 2020, 36(9): 168-186.
Zhang M, Lan H L, Chen W H, et al. Research on the antecedent configuration and performance of strategic change[J]. Journal of Management World, 2020, 36(9): 168-186.

Study on Carbon Unlocking Strategies for Transportation Infrastructure in the Yangtze River Economic Belt

Chen Yun*, Shi Xiaoya, Chen Xianjun

Institute of Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410000, China

Abstract: Transportation infrastructure, as the foundation and pilot industry of the national economy, and its carbon unlocking is one of the key issues concerning China's sustainable development, so it is necessary to explore the emission reduction law of regional transportation infrastructure in the process of economic development. The Yangtze River economic belt, which spans the east, middle, and west regions of China, is the center of China's economic development and an important carrier of regional high-quality development. Therefore, nine provinces and cities in the Yangtze River economic belt (Shanghai, Chongqing, Sichuan, Jiangsu, Zhejiang, Anhui, Jiangxi, Hubei and Hunan) are selected as study cases. Existing studies on carbon unlocking have mostly explored the influence relationship between single factors and outcomes, and the conclusions of the studies mainly rest on whether each factor promotes or inhibits the realization of carbon unlocking, while these influencing factors are often interdependent rather than independent. In this paper, data from nine provinces and cities in the Yangtze River economic belt from 2012 to 2021 are used as sample cases, and constructs an index system of influencing factors by combining the six major conditional elements of green technological innovation, R&D investment degree, government subsidy, scientific and technological support strength, pollution control strength, and environmental regulation from the three dimensions of technology, economy, and institution, and applies the method of fuzzy set qualitative comparative analysis (fsQCA) to explore the impact of multifactor on the carbon unlocking of transportation infrastructure. Using fsQCA to analyze the causality and mechanism of multiple influencing factors on the carbon release of transportation infrastructure, and to form a research report on the carbon release strategy of transportation infrastructure in the Yangtze River economic belt. The study found that (1) none of the factors can be regarded as a necessary condition leading to the result that the Yangtze River economic belt does not have a high carbon emission intensity, and the realization of the control of the carbon emission intensity of the Yangtze River economic belt requires the joint action of all the conditions. (2) Each antecedent condition produces four groupings of carbon emission intensity reduction through synergistic linkage, and the results of these four groupings reflect the multiple strategies and complex mechanisms for realizing the carbon unlocking of transportation infrastructure in the Yangtze River economic belt. These are system-guided strategy, economy-driven strategy, system-economy dual synergy strategy, and economy-technology dual synergy strategy. (3) Green technology innovation plays a prominent role in controlling the carbon emission intensity of the Yangtze River Economic Belt, indicating that the promotion of the technological level is crucial to the carbon unlocking of transportation infrastructure in the Yangtze River economic belt. The research results reveal the complex interaction of multiple factors in the emission reduction and carbon reduction of transportation infrastructure in the Yangtze River economic belt and provide theoretical support for grouping carbon-unlocking strategies for transportation infrastructure in the Yangtze River economic belt. Finally, based on the analysis of the grouping strategy, specific countermeasures and suggestions are proposed to promote the carbon unlocking of the transportation infrastructure in the Yangtze River economic zone, thus helping to realize the dual-carbon goal.

Keywords: Yangtze River economic belt; transportation infrastructure; carbon unlocking; fsQCA