工程研究——跨学科视野中的工程
JOURNAL OF ENGINEERING STUDIES http://jes.ucas.ac.cn 工程研究 跨学科视野中的工程
工程管理
DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250088
CSTR: 32282.14.JES.20250088

交通基础设施“碳解锁”水平判定研究

陈赟*，雷昂，孙戈

长沙理工大学 交通学院，长沙 410114

摘要：交通基础设施“碳解锁”是推动交通行业低碳转型的核心，对其水平的判定是实现交通基础设施低碳发展的基础。本文选用2004—2023年中国30个省市数据，从经济、技术和制度三个维度构建交通基础设施“碳解锁”水平测算指标体系，运用熵权法和水平判定标准对我国东、中、西三大区域及省域交通基础设施“碳解锁”水平测算与判定。研究结果表明：（1）区域层面上，研究期内三大区域交通基础设施“碳解锁”水平综合指数均呈现显著上升趋势，但区域间差距呈逐渐扩大趋势，呈现东部＞中部＞西部的格局；（2）省域层面上，各省市间交通基础设施“碳解锁”水平综合指数差异显著，判定结果为高水平发展省市6个、中水平发展省市15个和低水平发展省市9个。建议区域强化自身辐射作用，依据特点发挥自身优势，通过经济、技术、制度多维度协同手段提高交通基础设施“碳解锁”水平。

关键词：交通基础设施；“碳解锁”；“碳解锁”水平；“碳解锁”水平指标；水平判定

中图分类号：F542；X322 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-4969(XXXX)XX-0001-11

引言

交通基础设施作为社会经济发展的重要领域，在服务社会经济的同时消耗了大量能源，长期处于高碳发展模式，进而陷入“碳锁定”状态。在2020年提出的“双碳”目标驱动下，为破解交通基础设施“碳锁定”困境，通过测算与判定不同地区交通基础设施“碳解锁”水平，精准识别各地区在经济、技术和制度维度上的短板与优势，进而制定针对性的“碳解锁”策略，为推进交通基础设施低碳转型提供依据，具有重要的理论与现实意义。

“碳锁定”最早由西班牙学者Unruh[1]明确提出，

收稿日期：2025-07-01； **修回日期：**2025-09-29
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（通讯作者）
雷昂（2001—），男，硕士，研究方向为交通基础设施管理工程。E-mail: 2522802310@qq.com
孙戈（2001—），男，硕士，研究方向为交通基础设施管理工程。E-mail: 1345061864@qq.com
引用格式：陈赟,雷昂,孙戈.交通基础设施“碳解锁”水平判定研究[J].工程研究——跨学科视野中的工程,DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20250088.
CHEN Yun,LEI Ang,SUN Ge.Study on the Judgment of Carbon Unlocking Level of Transportation Infrastructure[J].Journal of Engineering Studies,DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20250088.

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

他认为在经济社会发展过程中，能源消费的递增形成了技术和制度的协同演化，将经济社会锁定在“技术-制度综合体”固定模式中，这也就产生了持续的市场和政策失灵。随后，Unruh[2]在理论层面上提出了三种“碳解锁”路径，分别是末端治理、连续性治理、断绝性治理。之后在此基础上，集中于“技术-制度”视角下深入研究有关碳锁定和“碳解锁”的内容，并且延伸出社会、经济、文化、产业等其他导致碳锁定的因素。

近年来，关于技术创新视角下的“碳解锁”路径研究成为热点。郭进等[3]基于技术进步和制度创新视角，运用投入产出法和PLS结构方程模型对“碳解锁”路径进行探索，研究发现，技术进步和制度创新可以直接产生一定程度的碳解锁效应，尽管其对“碳解锁”的影响非常有限，但可以间接地通过优化能源消耗和产业结构来进一步实现“碳解锁”。尹星等[4]认为“碳解锁”效应产生效应技术和制度的协同作用，通过构建政府与企业间的碳减排博弈模型，为政府制定碳减排政策提供了有效方向。Mattauch等[5]认为政府可以通过对低碳技术企业提供政策补贴、对高碳排放企业征税等手段，促进低碳技术普及和落后技术淘汰，实现技术层面解锁。从制度层面来看，“碳解锁”的实现主要依赖政府政策推动制度层面的变革。Kalkuhl等[6]认为通过预期自愿协议（PVA）的形式，政府作为协调者促进企业与社会上碳排放相关经济体的合作，推动“碳解锁”进程。孙丽文等[7]通过构建博弈模型深入剖析了政府、企业、社会组织等多方在“碳解锁”进程中的博弈关系，分析要实现制度层面的“碳解锁”，需要各方达成共识，协同助力推动低碳转型进程。经济视角上，Chen等[8]认为交通基础设施“碳解锁”实现高水平不能仅依赖技术和制度两个层面，而是需要“技术-经济-制度”三维协同作用。宋德勇等[9]基于脱钩理论和GFI分解法，分析了中国交通碳排放在不同脱钩状态下各因素的效果，研究发现经济和土地城市化是阻碍“碳解锁”的最关键因素。汪中华等[10]通过构建包含能源消耗、制度约束与技术进步的ECM模型，研究发现经济增长长期推动碳超载率，但短期存在回弹效应，需通过经济政策引导低碳转型。

综上所述，国内外学者对有关“碳解锁”的现有研究成果丰富。然而，现有研究大多从行业、国家整体等宏观角度展开，鲜有对交通基础设施领域进行“碳解锁”水平研究。交通基础设施碳锁定既遵循高碳技术与传统制度协同演化的一般形成机理，也有其特殊的产业特性。这种锁定状态的形成源于交通基础设施的技术特性、产业结构与化石燃料能源系统的密切关联。随着交通基础设施建设与运营规模的不断扩大，其空间效应和规模递增效应进一步强化了这种锁定状态，促使产业结构与社会需求呈现持续“高碳偏好”特征。这种长期依赖高碳技术与传统制度的锁定状态，不仅导致高碳排放，更严重阻碍了交通基础设施的低碳转型发展。

基于此，本文选用2004—2023年中国30个省市数据，从经济、技术和制度三个维度构建交通基础设施“碳解锁”水平测算指标体系，运用熵权法和水平判定标准对我国东、中、西三大区域及省域交通基础设施“碳解锁”水平进行测算与判定，有助于构建交通基础设施“碳解锁”有效路径，促进交通基础设施低碳转型和可持续发展，助力实现国家“碳达峰、碳中和”目标。

1 研究设计

1.1 交通基础设施“碳解锁”水平测算指标体系构建

基于“碳解锁”理论中经济、技术、制度的核心维度，结合交通基础设施行业特性，通过文献搜集等方法保留15项指标，确保各维度指标之间独立且能准确反映交通基础设施“碳解锁”水平。本文基于经济、技术、制度三个维度构建了交通基础设施“碳解锁”水平测算指标体系，见表1[11-29]。这些指标选取遵循相对独立、区域可比原则，还考虑了数据的可靠性和来源的权威性。需要说明的是，参考宋德勇等[9]的研究，从业人员规模扩张可能反映出传统高碳运输方式的占比高，交通碳排放与劳动密集型运营模式高度相关，而产业结构升级会降低对劳动力的依赖，因此，交通基础设施“碳解锁”水平与劳动力水平、产业结构呈负相关。

表1 交通基础设施“碳解锁”水平测算指标体系

Table 1 Indicator system for measuring the "Carbon Unlocking" level of transportation infrastructure

维度	指标	指标释义	指标来源	性质
经济	产业结构X_1	第二产业产值/地区产业总值/%	[27,12,17]	负
	交通经济增长效益X_2	交通运输、仓储和邮政业生产总值增加值/亿RMB	[15-16]	正
	人均收入X_3	人均GDP/RMB	[18-19]	正
	政府低碳支出X_4	环境污染治理投资额/亿RMB	[20-21,23]	正
	劳动力水平X_5	交通运输、仓储和邮政业从业人员数取自然对数	[16,19]	负
制度	环境规制强度Y_1	工业污染治理完成投资额/亿RMB	[15,29]	正
	低碳规制水平Y_2	年内政府出台的绿色低碳法规数/个	[20-21,28]	正
	城镇化率Y_3	地区城镇常住人口/地区总人口/%	[17-19]	负
	交通基础设施路网密度Y_4	公路里程（km）/行政区域面积/km^2	[13,24]	负
	地方财政科学技术投入Y_5	地方财政科学技术支出/亿RMB	[11,25]	正
技术	技术市场成交水平Z_1	技术市场成交额/地区生产总值/%	[11,26]	正
	科研技术经费投入Z_2	地区规模以上交通基础设施企业研发支出/亿RMB	[16,20,25]	正
	交通基础设施水平Z_3	公路里程（km）取对数或货运量合计（万t）取对数	[19,24]	负
	绿色专利申请数量Z_4	地区规模以上交通基础设施企业绿色专利申请量/个	[21-22]	正
	生产总值能耗Z_5	交通运输、仓储和邮政业单位生产总值能源消耗量/(t/万RMB)	[11,13-14]	负

1.2 交通基础设施“碳解锁”水平测算模型构建

层次分析法依赖专家主观判断确定权重，易受人为主观导致出现偏差，难以满足30个省市及三大区域客观数据对比的严谨性要求；主成分分析法通过降维提取综合因子，可能模糊经济、技术、制度三维度的原始信息，不利于后续分维度的区域差异分析。熵权法是一种依据各项指标数值的变异程度来确定指标权重的客观赋权法，指标的变异指数越大，说明其在评价对象指标中的重要程度越高，可以消除人为主观赋值带来的结果偏差，提高评价结果的客观性和准确性。通过计算各指标值的权重，测算交通基础设施“碳解锁”水平。因此，在交通基础设施“碳解锁”水平测算指标体系的基础上，本文通过熵权法对我国东、中、西三大区域及省域交通基础设施“碳解锁”水平进行测算，具体步骤如下：

（1）为了减少量纲的影响，对原始数据进行标准化处理

$$x'_{ij}=\frac{X_{ij}-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}},\ X_j\text{为正向指标} \tag{1}$$

$$x'_{ij}=\frac{X_{\max}-X_{ij}}{X_{\max}-X_{\min}},\ X_j\text{为负向指标} \tag{2}$$

式中，x_{ij}、x'_{ij}分别为第i个地区的第j个指标的原始数值和标准化后数值；$x_{\min}$、$x_{\max}$对应各指标的最大值以及最小值。

（2）因为计算原理要求数据不能小于等于0，所以对标准化后数据进行非负平移

$$x^*_{ij}=x'_{ij}+\beta \tag{3}$$

式中，x^*_{ij}为平移后的数值；β为平移幅度，为减少误差，取值0.0001。

（3）测算i地区j指标的数值比重$p(x_{ij})$

$$p(x_{ij})=\frac{x^*_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}x^*_{ij}} \tag{4}$$

（4）测算j指标的熵值e_j

$$e_j=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n}p(x_{ij})\ln p(x_{ij}) \tag{5}$$

（5）测算j指标的变异系数d_j

$$d_j=1-e_j \tag{6}$$

（6）测算j指标的权重w_j

$$w_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{m}d_j} \tag{7}$$

（7）研究期内依据各指标权重对各样本数据分别

进行加权求和，由此测算各地区相应年份交通基础设施“碳解锁”水平综合指数E，这一数值越大，表明相应地区交通基础设施“碳解锁”水平越高。

$$E=\sum_{j=1}^{m}x_{ij}^{*}w_j \tag{8}$$

1.3 交通基础设施“碳解锁”水平判定标准

根据熵权法测算得出的研究期内各省市交通基础设施“碳解锁”水平综合指数显示，各省市间存在显著的差异。考虑到研究期跨度较长且涉及多个省市，为确立合理的水平判定标准，采用了设置综合指数均值范围的方法，并参考了王欢芳等[30]的处理方式，运用了自然断点法进行优化处理。自然断点法是将数据按照自然分组方式进行分割，使得同一组内的数据相似，不同组之间的数据不同，将数据分为最优的类别。根据省区市的交通基础设施“碳解锁”水平综合指数E_i分布频率划分成三类，从高到低判定为高水平发展省市（高于0.208）、中水平发展省市（0.102~0.208之间）和低水平发展省市（低于0.102）三种。

$$\varepsilon=\frac{\sum_{i=1}^{n}E_i}{n} \tag{9}$$

式中，ε为某省市交通基础设施“碳解锁”综合指数均值，具体交通基础设施“碳解锁”水平判定标准见表2。

表2 交通基础设施“碳解锁”水平判定标准表

Table 2 Criteria for determining the "Carbon Unlocking" level of transportation infrastructure

水平程度	ε
高水平发展	$0.208<\varepsilon$
中水平发展	$0.102\leqslant\varepsilon\leqslant0.208$
低水平发展	$\varepsilon<0.102$

1.4 数据来源与区域划分

本文选取2004—2023年中国（未包括西藏、港澳台地区）30个省区市的相关数据进行分析，交通基础设施“碳解锁”水平评价指标体系中的指标原始数据来自《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国生态环境统计年鉴》、国家法律法规数据库、国家统计局以及地方统计局官网等相关统计资料，数据具有可靠性，其中个别缺失的数据采用插值法和类推法进行估算。表3中列出了样本数据来源。

考虑到中国东部、西部和中部在经济发展水平、交通基础设施条件及资源配置、产业结构分布和政府政策导向等方面差异较大，按照国家统计局关于三大地带的划分标准，我国30个省市划分成东部、中部和西部三个区域，如表4所示。

2 实证分析

2.1 交通基础设施“碳解锁”水平测算过程

本文采用熵权法测算交通基础设施“碳解锁”水平。按照熵权法的数据处理方法，为了减少指标数据量纲的影响，先对研究期内30个省市的15项指标数据进行预处理，通过确定整体数据的最小值min、最大值max和极差DV并标准化处理，再进行非负平移。

经过上述处理，根据公式测算每个指标数据的信息熵值e、变异系数d和权重系数w。信息熵值越小，变异系数越大，权重系数越高，指标在综合评价中的重要性就越强。“绿色专利申请数量Z_4”权重系数为0.1761，是表中最高的，说明在衡量交通基础设施“碳解锁”水平时，绿色专利申请数量这个指标非常重要。信息熵值越大，变异系数越小，权重系数越低，重要性越弱。“生产总值能耗Z_5”权重系数为0.0016，是表中最低的，表明其在综合评价中的重要性较弱。具体结果如表5所示。

通过测算得到各维度指标权重系数后，研究期内依据各指标权重系数对各地区非负平移后的指标数据分别进行加权求和，由此测算各地区相应年份交通基础设施“碳解锁”水平综合指数。这一数值越大，表明相应地区交通基础设施“碳解锁”水平越高。

2.2 交通基础设施“碳解锁”水平区域层面分析

各区域交通基础设施“碳解锁”水平测算结果见图1。从时间维度来看，2004—2023年东部、中部和西部交通基础设施“碳解锁”水平综合指数分别由

表3 数据来源与统计说明
Table 3 Data sources and statistical description

数据名称	数据来源	网址
第二产业产值/亿RMB	《中国统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01
地区产业总值/亿RMB	《中国统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01
交通运输、仓储和邮政业生产总值增加值/亿RMB	《中国统计年鉴》、国家统计局	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01；https://data.stats.gov.cn/
人均GDP/RMB	《中国统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01
环境污染治理投资额/亿RMB	《中国生态环境统计年鉴》《广西省统计年鉴》《浙江省统计年鉴》	https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb/；https://gxsj.tjj.gxzf.gov.cn:18090/pub/；https://tjj.zj.gov.cn/col/col1525563/index.html
交通运输、仓储和邮政业从业人员数/个	《中国统计年鉴》、国家统计局	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01；https://data.stats.gov.cn/
工业污染治理完成投资额/亿RMB	国家统计局	https://data.stats.gov.cn/
年内政府出台的绿色低碳法规数/个	国家法律法规数据库	https://flk.npc.gov.cn/index
地区城镇常住人口占比/%	《中国统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01
公路里程/km	《中国统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01
行政区域面积/km^2	《中国统计年鉴》、国家统计局	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01；https://data.stats.gov.cn/
地方财政科学技术支出/亿RMB	《中国统计年鉴》、国家统计局	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01；https://data.stats.gov.cn/
技术市场成交额/亿RMB	《中国统计年鉴》、国家统计局	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01；https://data.stats.gov.cn/
地区规模以上交通基础设施企业研发支出/亿RMB	中国交通运输部	https://www.mot.gov.cn/shuju/index.html
地区规模以上交通基础设施企业绿色专利申请量/个	国家统计局、国家知识产权局	https://data.stats.gov.cn/；https://www.cnipa.gov.cn/
货运量/万t	《中国统计年鉴》、国家统计局、中国交通运输部	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01；https://www.mot.gov.cn/shuju/index.html
交通运输、仓储和邮政业能源消耗量/万t	《中国能源统计年鉴》	https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01

表4 中国三大区域划分
Table 4 Division of China’s three major regions

区域	省市/自治区/直辖市
西部	内蒙古、新疆、广西、贵州、云南、重庆、四川、陕西、青海、甘肃、宁夏
中部	山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南
东部	北京、上海、江苏、河北、天津、浙江、辽宁、山东、福建、广东、海南

0.0846、0.0671 和 0.0723 上升至 0.3493、0.2209 和 0.1574。全国三大区域交通基础设施“碳解锁”综合水平指数均呈现大幅度上升趋势，且各区域间的差距逐渐扩大。按目前形势来看，交通基础设施“碳解锁”水平呈现出东部＞中部＞西部的特征。

从“碳解锁”维度来看，（1）2004—2023 年东部、中部和西部地区经济维度解锁水平指数均呈现上升趋势，东部地区受益于其地理位置和政府政策支持等因素，经济基础雄厚，促成产业结构低碳转型加快。例如新能源汽车产业，因其需要大量资金和政府政策导向，使相关企业更愿意参与有关交通基础设施的绿色低碳项目，从而促进经济维度解锁水平快速提升。在大部分年份，东部地区经济解锁水平都要高于中部和西部，且提升速度也相对较快。近些年中部地

表5 各维度指标信息熵、变异系数及权重系数表

Table 5 Information entropy, coefficient of variation, and weight coefficients for each dimension indicator

维度	指标	信息熵值e	变异系数d	权重系数w
经济	产业结构X_1	0.9801	0.0199	0.0205
	交通经济增长效益X_2	0.9439	0.0561	0.0576
	人均收入X_3	0.9535	0.0465	0.0477
	政府低碳支出X_4	0.9454	0.0546	0.0561
	劳动力水平X_5	0.9825	0.0175	0.018
制度	环境规制强度Y_1	0.9396	0.0604	0.062
	低碳规制水平Y_2	0.8918	0.1082	0.1111
	城镇化率Y_3	0.9815	0.0185	0.019
	交通基础设施路网密度Y_4	0.9882	0.0118	0.0121
	地方财政科学技术投入Y_5	0.8859	0.1141	0.1172
技术	技术市场成交水平Z_1	0.8615	0.1385	0.1423
	科研技术经费投入Z_2	0.8744	0.1256	0.129
	交通基础设施水平Z_3	0.9711	0.0289	0.03
	绿色专利申请数量Z_4	0.8285	0.1715	0.1761
	生产总值能耗Z_5	0.9984	0.0016	0.0016

区政府在低碳支出方面加大力度，在节能减排、资源综合利用等方面采取了一系列措施，经济解锁水平也有明显提升。西部地区经济解锁水平相对较弱，增长速度相对较慢，受地理位置及条件、交通基础设施水平、产业和经济基础等因素的限制，在经济维度上“碳解锁”面临着一定的挑战。不过，因其资源禀赋，国家加大力度给予政策和资金扶持，西部地区经济解锁水平也有望逐步提高。

（2）东部、中部和西部地区在制度层面上解锁水平指数趋势在2013年和2018年这两个时间点均有小幅度波动。中部地区制度解锁水平指数总体波动幅度较小，相对较为稳定，但整体制度解锁水平仍然有待提高，在环境规制和低碳规制的建设方面相对滞后，需要进一步加强政策引导和制度创新，以提高制度层面上的解锁水平。

东部地区制度解锁维度上在某些年份具有较高的水平指数，能够较早地出台与交通基础设施绿色低碳有关的法律法规和政策，对工业污染治理和科学技术的投入较大，因此在制度创新方面占据一定的优势。由于城镇化速度加快，大量的交通基础设施建设和能源消耗加剧碳排放，以及制度的适应性和有效性不够完善，对制度上的解锁有一定的负面影响，导致了东部地区制度解锁水平指数中期具有小幅度波动。西部地区制度解锁水平相对较弱，且波动幅度较大，在制度执行和监管方面存在一定的困难，需要加强制度建设和导向。

（3）在技术解锁水平方面，三大区域均呈现明显的上升趋势。东部地区在技术解锁水平方面一直处于领先地位，增长速度较快，在科研投入、绿色专利申请方面具有较强的实力，能够较快突破交通基础设施领域技术层面的“碳解锁”。中部地区技术解锁水平相对东部地区较低，但增长速度较为明显。西部地区由于科技基础薄弱、人才短缺等，限制了技术方面的研发和突破，增长速度相对较慢。

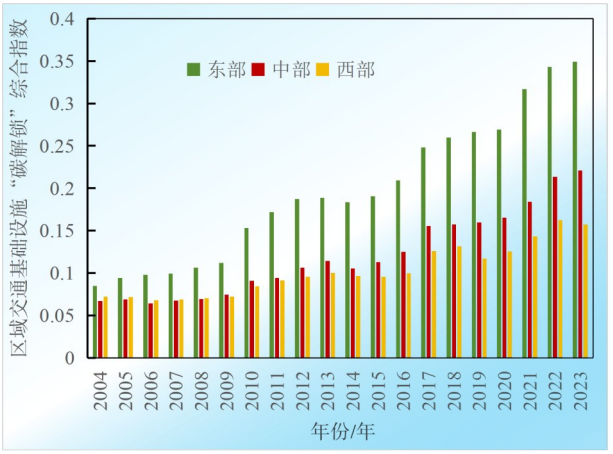


图1 区域交通基础设施“碳解锁”综合指数

Figure 1 Comprehensive index of "Carbon Unlocking" for regional transportation infrastructure

2.3 交通基础设施“碳解锁”水平省域层面分析

各省域交通基础设施“碳解锁”水平测算结果见图2。2010年为“十二五”规划启动年份，2016年为《巴黎协定》生效年份[31]，由于研究期长且篇幅有限，结合国家重大低碳政策节点，从2004年至2023年中仅选取2004年、2010年、2016年和2023年4个年份的数据作为样本来进行分析。从时空格局来看，大部分省市随着时间的推移，交通基础设施“碳解锁”水平综合指数呈现出上升趋势。由于各省市间交通基础设施“碳解锁”水平综合指数差异显著，根据

交通基础设施水平判定标准进行判定，判定结果为交通基础设施“碳解锁”高水平发展省市6个、中水平发展省市15个和低水平发展省市9个，见表6。

表6 交通基础设施“碳解锁”水平判定结果

Table 6 Assessment results of Carbon Unlocking Levels for transportation infrastructure

水平程度	ε	省市
高水平发展	$0.208<\varepsilon$	北京、上海、江苏、浙江、山东、广东
中水平发展	$0.102\leqslant\varepsilon\leqslant0.208$	天津、河北、河南、辽宁、安徽、湖北、湖南、广西、陕西、山西、内蒙古、重庆、四川、福建、江西
低水平发展	$\varepsilon<0.102$	青海、黑龙江、吉林、云南、甘肃、宁夏、贵州、新疆、海南

2.3.1 高水平发展省市 交通基础设施“碳解锁”高水平发展省市包括北京、上海、江苏、浙江、山东、广东6个省市，这些省市交通基础设施“碳解锁”水平综合指数均值均高于0.208。其中广东省尤为突出，2004—2023年“碳解锁”水平综合指数从0.0812大幅上涨至0.6341，位居首位；江苏、北京、浙江、山东和上海等经济发达地区紧随其后，2023年交通基础设施“碳解锁”水平综合指数分别是0.503、0.4293、0.4105、0.4278和0.3803。北京、江苏和广东地区绿色低碳技术突破方面成效显著，得益于大量投入的科研经费和绿色低碳专利申请数量激增，两者协同作用使得这些省市科技成果转化程度高，在技术层面的“碳解锁”能力突出。浙江在制度层面上有关低碳绿色交通基础设施的法律法规制度体系较为完善，“碳解锁”水平因而较高。

2.3.2 中水平发展省市 安徽、河南、天津、湖北、河北、四川和辽宁等15个省市“碳解锁”水平综合指数处于中间范围且呈现一定的上升趋势，其“碳解锁”水平综合指数均值处于0.102~0.208范围内。河南、河北、湖北、安徽在交通产业增长效益方面表现良好，四川和陕西地区近年来政府对环境污染治理给予的低碳支出以及低碳规制的政策导向落实较为到位。这些省市在交通基础设施“碳解锁”某一维度上表现出色，但由于发展不平衡导致解锁综合水平指数处于中等范围，可将这些省市列入交通基础设施“碳解锁”中水平发展省市。

2.3.3 低水平发展省市 在这些交通基础设施“碳解锁”水平综合指数排名靠后的省市中，新疆、青海、吉林、贵州、宁夏和海南等9个省市的交通基础设施“碳解锁”水平综合指数均值在0.102以下。位于中部区域的吉林、黑龙江和山西这三个省市，相比西部区域的省市，经济发展水平较高，交通基础设施条件及资源配置更为完善。然而，由于核心技术高碳化致使低碳技术转型升级困难，在生产总值能耗方面表现欠佳，反映出其过度依赖化石能源，传统高耗能产业占比大，产业结构不合理。而新疆、青海、贵州和宁夏等西部区域的省市，因地理位置偏远、交通基础设施不够完善以及低碳政策匮乏且监管力度不足等原因，交通基础设施“碳解锁”综合水平相对较弱且增长缓慢。这些碳解锁综合指数排名靠后的省市，可列入交通基础设施碳解锁低水平发展省市。

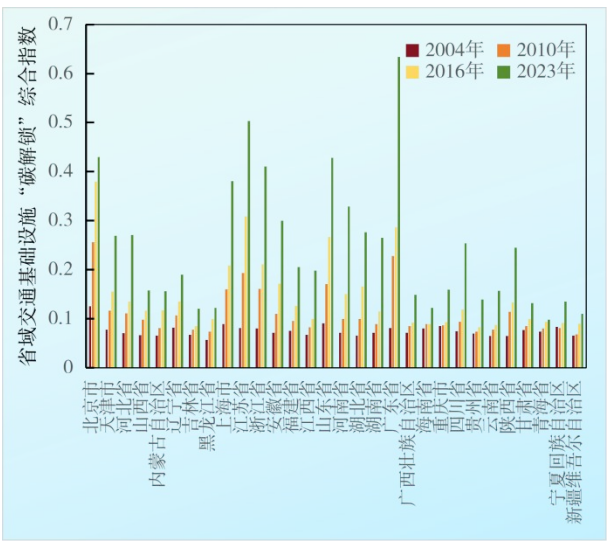


图2 省域交通基础设施“碳解锁”综合指数

Figure 2 Comprehensive index of "Carbon Unlocking" for provincial transportation infrastructure

3 结论与建议

交通基础设施“碳解锁”是推动交通行业低碳转型的核心，对其水平的判定是实现交通基础设施低碳发展的基础。2004—2023年，全国三大区域交通基

础设施“碳解锁”水平综合指数均大幅上升，呈现东部＞中部＞西部的特征。东部地区在各解锁维度上全方位领先中部和西部，中部地区在“碳解锁”指数增幅上位于中位，西部地区解锁水平虽有提升但较少。三大区域交通基础设施“碳解锁”综合指数均有上升但总体不高，且各维度上区域差异较大，还需因地施策提升交通基础设施“碳解锁”水平。各省市间交通基础设施“碳解锁”水平综合指数差距较大，判定结果为高水平发展省市6个，集中于东部沿海地区；中水平发展省市15个，分布在中西部地区；低水平发展省市9个，集中在西部地区和东北地区。总体而言，各省市交通基础设施“碳解锁”水平在研究期间有进一步的提升。

针对不同地区交通基础设施“碳解锁”水平差异，结合交通基础设施条件、地理位置、社会经济发展水平、产业结构和绿色低碳投入等因素差异，秉持统筹大局观、遵循精准引导思路，因地制宜探索具有区域化特色的经济、技术和制度维度上交通基础设施“碳解锁”实施方案。东部地区如广东、江苏、上海，发挥经济、技术和制度维度优势，加大交通基础设施绿色低碳技术研发投入，率先突破新能源、智能交通等前沿技术应用瓶颈，加快科学技术成果转化，强化自身辐射作用，为中西部地区树立标杆。中西部地区如吉林、黑龙江，应尽快摆脱高碳排放路径，降低生产总值能耗，重视清洁能源开发，提高能源利用效率；河北、山西和广西等城市建议打造绿色低碳交通基础设施产业集群，推动交通基础设施相关产业结构向绿色低碳转型；新疆、青海、贵州和宁夏等城市建议加大科研经费投入，完善低碳政策，加强制度创新和监管力度。各区域应加强交流合作，协同探索交通基础设施低碳发展路径，提升全国交通基础设施“碳解锁”水平，助力实现国家“双碳”目标。

参考文献

[1] Unruh G C. Understanding carbon lock-in[J]. Energy Policy, 2000, 28(12): 817-830.

[2] Unruh G C. Escaping carbon lock-in[J]. Energy Policy, 2002, 30(4): 317-325.

[3] 郭进, 徐盈之. 基于技术进步视角的我国碳锁定与碳解锁路径研究[J]. 中国科技论坛, 2015(1): 113-118.
Guo J, Xu Y Z. An empirical study on carbon lock-in and unlocking path in China with technological progress perspective[J]. Forum on Science and Technology in China, 2015(1): 113-118.

[4] 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.

[5] Mattauch L, Creutzig F, Edenhofer O. Avoiding carbon lock-in: Policy options for advancing structural change[J]. Economic Modelling, 2015, 50: 49-63.

[6] Kalkuhl M, Edenhofer O, Lessmann K. Learning or lock-in: Optimal technology policies to support mitigation[J]. Resource and Energy Economics, 2012, 34(1): 1-23.

[7] 孙丽文, 任相伟. 我国"碳锁定"治理过程中的诸方博弈研究: 基于制度解锁视角[J]. 企业经济, 2019, 38(8): 53-59.
Sun L W, Ren X W. Research on game theory in the process of "Carbon Locking" governance in China: Based on the perspective of system unlocking[J]. Enterprise Economy, 2019, 38(8): 53-59.

[8] 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.

[9] 宋德勇, 宋沁颖, 张麒. 中国交通碳排放驱动因素分析: 基于脱钩理论与GFI分解法[J]. 科技管理研究, 2022, 42(11): 216-228.
Song D Y, Song Q Y, Zhang Q. An analysis of the driving factors of China's transportation carbon emissions: Based on decoupling theory and generalized fisher index decomposition[J]. Science and Technology Management Research, 2022, 42(11): 216-228.

[10] 汪中华, 成鹏飞. 中国碳超载下碳锁定与解锁路径实证研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 909-917.
Wang Z H, Cheng P F. China's carbon lock-in and unlocking in the context of carbon loading[J]. Resources Science, 2016, 38(5): 909-917.

[11] 牛鸿蕾. 中国制造业碳锁定测度及时空演变特征研究[J]. 统计与决策, 2023, 39(8): 153-157.

Niu H L. Research on carbon locking measure and temporal and spatial evolution characteristics of manufacturing industry in China[J]. Statistics & Decision, 2023, 39(8): 153-157.

[12] 梁中. "产业碳锁定"的内涵、成因及其"解锁"政策: 基于中国欠发达区域情景视角[J]. 科学学研究, 2017, 35(1): 54-62.
Liang Z. Industry Carbon Lock-In: The connotation, causes and unlocking policy: Based on the perspective of less-developed areas in China [J]. Studies in Science of Science, 2017, 35(1): 54-62.

[13] Hernandez A M, Pacheco Rojas D A, Barrón Villaverde D. Carbon Lock-In and contradictions: Applied guide to academic teaching of Mexico's energy transition[J]. Applied Sciences, 2021, 11(18): 8289.

[14] 徐成龙, 王长雪, 巩灿娟. 中国电力行业碳解锁演变特征及影响因素: 基于"能源-技术-制度"三重视角[J]. 新型工业化理论与实践, 2024, 11(3): 65-75.
Xu C L, Wang C X, Gong C J. Evolution characteristics and influencing factors of Carbon Unlocking in China's power industry: Based on the triple perspective of "Energy-Technology-System"[J]. Theory and Practice of New Industrialization, 2024, 11(3): 65-75.

[15] Hossain M A, Chen S S, Khan A G. Decomposition study of energy-related CO_2 emissions from Bangladesh's transport sector development [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(4): 4676-4690.

[16] 陈赟, 石梦怡, 马崇森. 省域交通基础设施碳锁定系统耦合效应时空演化[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(3): 1127-1138.
Chen Y, Shi M Y, Ma C S. Spatial and temporal evolution of coupling effect of Carbon Locking system in provincial transportation infrastructure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(3): 1127-1138.

[17] 张国兴, 苏钊贤. 黄河流域交通运输碳排放的影响因素分解与情景预测[J]. 管理评论, 2020, 32(12): 283-294.
Zhang G X, Su Z X. Analysis of influencing factors and scenario prediction of transportation carbon emissions in the Yellow River Basin [J]. Management Review, 2020, 32(12): 283-294.

[18] 胡晓伟, 包家烁, 安实, 等. 碳达峰下城市交通运输减排治理策略研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(6): 244-256.
Hu X W, Bao J S, An S, et al. Urban transportation emission reduction governance strategies under peak carbon dioxide emissions[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(6): 244-256.

[19] Wei C H, Zhang Y J, Lan M H, et al. How could we benefit from a low-carbon economy? Evidence from Chinese regional labor markets [J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2024, 71: 523-537.

[20] 陈赟, 陈先俊, 石晓雅, 等. 交通基础设施碳锁定破解障碍度分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(10): 4277-4287.
Chen Y, Chen X J, Shi X Y, et al. Barrier hacking level analysis of Carbon Locking for transportation infrastructure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(10): 4277-4287.

[21] 陈友. "双碳"目标背景下工业企业绿色低碳转型研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15(2): 162-164, 169.
Chen Y. Research on green and low-carbon transformation of industrial enterprises under the background of "Dual Carbon"[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2025, 15(2): 162-164, 169.

[22] He Y S, Wang M, Yuan C. Digital economy and low-carbon trade competitiveness: A multidimensional analysis of China's manufacturing sector[J]. Sustainability, 2025, 17(1): 274.

[23] 陈赟, 孙欣妍, 陈先俊, 等. 政府补贴对交通基础设施碳排放强度影响研究[J]. 工程经济, 2024, 34(7): 33-45.
Chen Y, Sun X Y, Chen X J, et al. Study on the impact of government subsidies on the carbon emission intensity of transportation infrastructure[J]. Engineering Economy, 2024, 34(7): 33-45.

[24] 邵志国, 李可心, 李梦笛. 中国交通基础设施、经济增长与碳排放的脱钩效应及互动关系分析[J]. 环境科学, 2025, 46(8): 4813-4825.
Shao Z G, Li K X, Li M D. Decoupling effect and interactive relationship among transportation infrastructure, economic growth, and carbon emissions in China[J]. Environmental Science, 2025, 46(8): 4813-4825.

[25] 田瑾, 佟琼, 梁栋. 中国交通运输业碳减排成本测算及碳减排潜力分析[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2025, 24(1): 86-98.
Tian J, Tong Q, Liang D. Cost assessment and potential analysis of carbon emission reduction in China's transportation sector[J]. Journal of Beijing Jiaotong University(Social Sciences Edition), 2025, 24(1): 86-98.

[26] Xu W Y, Mo W T. Institutional unlocking or technological unlocking. The logic of carbon unlocking in the new energy vehicle industry in China[J]. Energy Policy, 2024, 195: 114369.

[27] Weng S M, Tao W L, Lu Y L. Unlocking the carbon emission efficiency improvement path of technological innovation: A perspective on industrial restructuring and R&D element flows[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(14): 21189-21207.

[28] Behera B, Sahoo M, Sethi L, et al. Fuelling the low-carbon transportation sector in emerging economies: Role of institutional quality,

environmental tax, green technology innovation and biofuel[J]. Transport Policy, 2025, 166: 124-134.

[29] 何春, 张奥, 刘荣增. "双碳"目标背景下低碳城市试点政策促进绿色经济转型的机制与检验: 来自低碳试点城市的准自然实验[J]. 生态经济, 2025, 41(4): 96-105.
He C, Zhang A, Liu R Z. Mechanisms and tests of pilot policies for low carbon cities to promote green economy transformation under the background of the dual carbon goals: A quasi natural experiments from low-carbon pilot cities[J]. Ecological Economy, 2025, 41(4): 96-105.

[30] 王欢芳, 张博佳, 刘奎兵, 等. 先进制造业产业链现代化水平空间差异及空间关联研究[J]. 财经理论与实践, 2024, 45(5): 133-141.
Wang H F, Zhang B J, Liu K B, et al. Research on spatial difference and spatial correlation of advanced manufacturing industry chain modernization level[J]. The Theory and Practice of Finance and Economics, 2024, 45(5): 133-141.

[31] 孙婷. 国际大城市交通碳中和实现路径及启示: 以伦敦、纽约和巴黎为例[J]. 规划师, 2022, 38(6): 144-150.
Sun T. The implementation path of carbon neutrality and its enlightenment of metropolitan transport: The cases of London, New York, and Paris[J]. Planners, 2022, 38(6): 144-150.

Study on the Judgment of Carbon Unlocking Level of Transportation Infrastructure

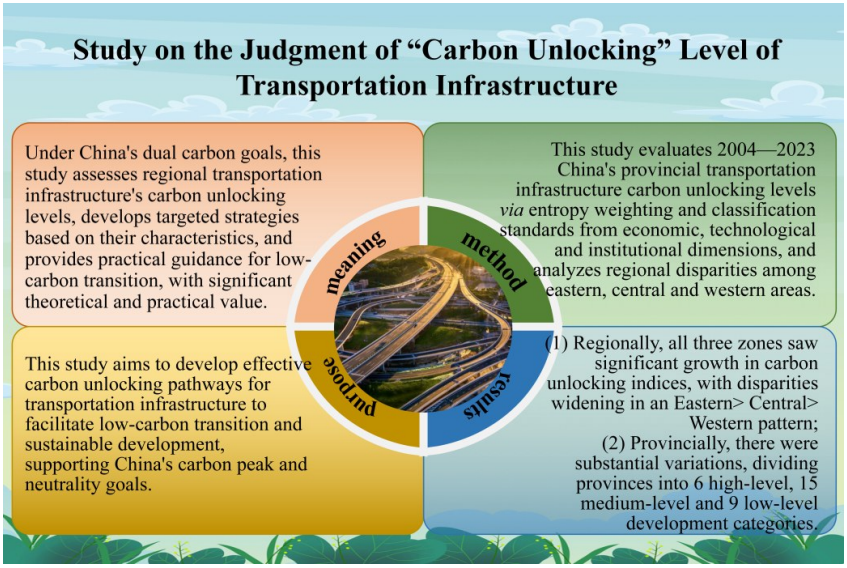
CHEN Yun*, LEI Ang, SUN Ge

Institute of Transportation, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, *China*

Highlights

- Measures transport infrastructure carbon unlock levels in 30 Chinese provinces from 2004 to 2023.
- Develops an economic-technical-institutional index system for transport infrastructure carbon unlock levels.
- Reveals widening regional disparities, showing an Eastern > Central > Western pattern.
- Identifies 6 high-level, 15 medium-level, and 9 low-level provinces using Carbon Unlock criteria.

Graphical Abstract



Abstract: Since carbon unlocking in transportation infrastructure is the core driver for the low-carbon transformation of the transportation sector, assessing its level constitutes the foundation for achieving low-carbon development in transportation infrastructure. Therefore, under the impetus of China's "Dual Carbon" goals proposed in 2020, this study aims to break through the "Carbon Lock-In" dilemma of transportation infrastructure by measuring and evaluating the carbon unlocking levels across different regions. Based on the characteristics of varying unlocking levels, targeted carbon unlocking strategies will be

formulated to provide an effective basis for realizing the low-carbon transformation of transportation infrastructure, which holds significant theoretical and practical implications.

This study utilizes data from 30 Chinese provinces from 2004 to 2023 to construct a comprehensive evaluation index system for measuring the carbon unlocking level of transportation infrastructure. The system comprises 15 indicators across three dimensions: economic, institutional, and technological. The economic dimension includes indicators such as industrial structure, transportation economic growth benefits, and government low-carbon expenditure. The institutional dimension covers environmental regulation intensity, low-carbon regulation level, and transportation infrastructure network density. The technological dimension incorporates metrics like the number of green patent applications, R&D investment, and energy consumption per unit of GDP.

The entropy weight method and level determination criteria are employed to measure and evaluate the carbon unlocking levels of transportation infrastructure across China's eastern, central, and western regions as well as at the provincial level. The entropy weight method is an objective weighting approach that determines indicator weights based on the degree of variation in each indicator's values. A higher variation index indicates greater importance of the indicator in the evaluation system, which helps eliminate subjective bias in manual weighting and enhances the objectivity and accuracy of the evaluation results. By calculating the weights of each indicator, the carbon unlocking level of transportation infrastructure can be quantitatively assessed. China is divided into eastern, central, and western regions to analyze inter-regional differences in carbon unlocking levels. Based on the established carbon unlocking level evaluation criteria, provinces are classified into high-level, medium-level, and low-level categories of carbon unlocking development.

The research findings reveal that at the regional level, the comprehensive carbon unlocking index of transportation infrastructure in all three major regions showed significant upward trends during the study period. However, the inter-regional disparities gradually widened, presenting a distinct pattern of Eastern > Central > Western regions in terms of performance. At the provincial level analysis, substantial variations were observed in the comprehensive carbon unlocking indices among different provinces. The evaluation results classified the provinces into three categories: 6 high-level development provinces, 15 medium-level development provinces, and 9 low-level development provinces.

The research conclusions propose that, in light of the disparities in carbon unlocking levels across different regions, tailored implementation plans should be developed by comprehensively considering factors such as transportation infrastructure conditions, geographical location, economic and social development level, industrial structure, and green low-carbon investments. Adopting an overarching perspective of coordinated planning and a precision-guided approach, region-specific carbon unlocking solutions should be explored in the economic, technological, and institutional dimensions of transportation infrastructure. All regions should strengthen communication and cooperation, learn from each other's experiences, and collaboratively explore low-carbon development pathways for transportation infrastructure. This collective effort aims to enhance the overall carbon unlocking performance of transportation infrastructure nationwide.

Keywords: transportation infrastructure; Carbon Unlocking; Carbon Unlocking level; Carbon Unlocking level indicators; level judgment