

邵志国,李可心,李梦笛.“双碳”背景下中国交通运输业碳排放驱动因素及脱钩效应[J].中国环境科学,2025,45(1):571-582.

Shao Z G, Li K X, Li M D. Driving factors and decoupling effect of carbon emissions in China's transportation industry under the background of "dual carbon" [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):571-582.

## “双碳”背景下中国交通运输业碳排放驱动因素及脱钩效应

邵志国<sup>1\*</sup>,李可心<sup>1</sup>,李梦笛<sup>2</sup>(1.青岛理工大学管理工程学院,山东 青岛 266525;2.同济大学经济与管理学院,上海 200092)

**摘要:** 基于LMDI分解模型量化交通碳排放驱动因素的贡献情况,利用Tapio脱钩模型对行业碳排放与经济增长之间的关系进行分析,并定量分析各因素为达到脱钩状态所做的努力.结果表明:经济产出是导致交通碳排放增加的决定性因素,对碳排放的贡献率高达115.93%;产业结构对碳排放的抑制作用最显著.全国、东部、中部和西部地区的交通碳排放脱钩指数均处于下降态势,展现了从扩张负脱钩→弱脱钩→强脱钩的变化趋势.各地区交通碳排放驱动因素总体上均呈现“无脱钩努力→弱脱钩努力→强脱钩努力”的阶段性特点.产业结构对30个省份做出不同程度的脱钩努力,运输强度和人口规模成为阻碍绝大多数省份碳脱钩的关键因素.

**关键词:** 交通运输业; 碳排放; 驱动因素; Tapio模型; 脱钩努力

**中图分类号:** X21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)01-0571-12

**Driving factors and decoupling effect of carbon emissions in China's transportation industry under the background of "dual carbon".** SHAO Zhi-guo<sup>1\*</sup>, LI Ke-xin<sup>1</sup>, LI Meng-di<sup>2</sup> (1.School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2.School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China). *China Environmental Science*, 2025,45(1): 571~582

**Abstract:** Based on the LMDI decomposition model, the contribution of driving factors of transportation carbon emissions is quantified. The Tapio decoupling model is used to analyze the relationship between carbon emissions and economic growth, and the efforts made by each factor to achieve decoupling are quantitatively analyzed. The results show that: Economic output is the decisive factors leading to an increase on transportation carbon emissions, with a contribution rate of 115.93% to carbon emissions; Industrial structure has the most significant inhibiting effect on carbon emissions. The decoupling index of transportation carbon emissions in the national, eastern, central, and western regions is all in a downward trend, experiencing the decoupling trend of expansive negative decoupling → weak decoupling → strong decoupling. The driving factors of transportation carbon emissions in the four regions generally show the phased characteristic of "no decoupling effort → weak decoupling effort → strong decoupling effort". Industrial structure has made varying degrees of decoupling effort in 30 provinces, with transportation intensity and population size becoming key factors hindering carbon decoupling in the vast majority of provinces.

**Key words:** transportation industry; carbon emissions; driving factors; Tapio model; decoupling effort

“双碳”背景下,中国各行业均面临着巨大的减排压力.交通运输业是国民经济中具有基础性、先导性和战略性的产业,然而,从碳排放占总量比例来看,中国交通运输业已成为仅次于工业和建筑业的第三大碳排放行业<sup>[1]</sup>.因此,在经济发展不以牺牲资源环境为代价的共识下,促进区域交通运输业经济增长和碳排放协调发展,推动交通运输业绿色低碳转型,对促进行业高质量发展及助力“双碳”目标的实现具有重要的现实意义.

目前,国内外学者针对交通运输业碳排放(以下简称“交通碳排放”)的研究主要集中于行业碳排放测算、碳排放影响因素、碳排放与经济增长的关系等方面.首先,已有关于交通碳排放测算方法的研究

中,“自上而下”法和“自下而上”法是目前被广泛应用的两种碳排放测算方法.“自上而下”法主要基于交通运输业的能源消耗量及能源碳排放因子进行碳排放量的估算<sup>[2-4]</sup>;“自下而上”法主要基于不同交通运输工具车型、保有量、行驶里程、单位行驶里程燃料消耗等数据进行能源消耗量的估算,进而测算碳排放量<sup>[5-7]</sup>.近年来,逐渐有学者将两种测度方法结合应用<sup>[8-9]</sup>.其次,根据研究方法的不同,将有关交通碳排放影响因素的研究分为以下两类.第一,采用

收稿日期: 2024-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72304161;71874123);山东省自然科学基金资助项目(ZR2022QG029)

\* 责任作者, 副教授, shaozhiguo@qut.edu.cn

计量经济学方法主要包括空间面板数据模型<sup>[10]</sup>、STIRPAT 模型<sup>[11]</sup>和岭回归<sup>[12]</sup>研究交通碳排放的影响因素.第二,因素分解分析通过将碳排放量表示为几个因素的乘积,根据不同的确定权重的算法进行分解,以量化各因素对碳排放的影响程度<sup>[13]</sup>.其可以分为 3 种:结构分解分析(SDA)<sup>[14-15]</sup>、指数分解分析(IDA)<sup>[16]</sup>和生产理论分解分析(PDA)<sup>[17-18]</sup>.最后,明晰交通碳排放与经济增长之间的关系是促进二者和谐发展的必要条件.已有文献主要涉及到行业碳排放总量的环境库兹涅茨曲线(EKC)形态判断<sup>[19-20]</sup>、碳排放与经济增长之间的动态作用机理研究<sup>[21-23]</sup>及两者之间的脱钩状态分析<sup>[24-27]</sup>等.

已有关于中国交通碳排放的研究成果为交通运输业碳减排提供了一定的参考与借鉴,但目前仍存在未解决的问题:第一,大部分文献对交通运输能源消耗的核算仅局限于原煤、汽油、煤油和柴油等几种能源,但由于各省份每年的交通运输能源消费品种存在差异,便导致以往研究的核算结果准确性较低;第二,现有关于交通碳排放的研究多从国家宏观层面或针对具体某个省份展开,鲜有文献将中国所有省份进行整体性对比,即在交通碳排放空间维度的研究较为匮乏;第三,在有关交通碳排放影响因素的研究中,传统的计量回归模型通常将因素视为单一指标,忽略了它们之间的相互作用.因素分解分析能够改善这一问题,但已有研究大多选取能源结构、经济产出、人口规模等指标,仅依赖这些指标无法全面准确地揭示交通碳排放的变化程度,需要对因素进行深入分解;第四,大多数关于行业碳排放与经济增长脱钩关系的研究都以每年为研究间隔,但碳排放与经济发展均存在时间上的滞后性,以每年为时间尺度无法准确反映脱钩关系.此外,多数研究

在使用 Tapio 脱钩模型判断脱钩状态时未能深入分析各驱动因素在碳脱钩进程中所发挥的作用,缺少对实现脱钩所做努力有效性的评估.

鉴于此,本文使用能源平衡表在对中国 30 个省份(不含西藏、香港、澳门和台湾)2001~2020 年交通碳排放量进行测算的基础上,根据国家五年规划将研究期划分为 4 个阶段(2001~2005 年、2006~2010 年、2011~2015 年、2016~2020 年),在对数平均迪氏指数(LMDI)分解模型中引入交通运输能源效率、交通运输强度、产业结构等重要变量的影响,分析各驱动因素在不同阶段对区域及省份碳排放影响的差异,并运用 Tapio 脱钩模型考察行业碳排放与经济增长之间相对关系的变化情况.最后,建立脱钩努力模型以反映各因素在碳脱钩过程中发挥的作用.基于此,提出促进交通运输业经济与环境协调发展的政策建议.研究成果可为统筹推进交通运输节能减排和环境保护工作,加快推动行业绿色低碳转型提供科学指导,助力实现国家“碳达峰、碳中和”目标.

## 1 方法与数据

### 1.1 交通碳排放测算

“自上而下”法只需收集交通运输领域终端能源消耗量数据,数据获取难度相对较低.因此,本文从终端能源消费角度,采用“自上而下”法测算中国交通碳排放量,公式如下.

$$TC = \sum_i TC_i = \sum_i E_i \times K_i \times F_i \quad (1)$$

式中:TC 为交通碳排放量; $E_i$ 为第  $i$  类交通运输能源消耗实物量; $K_i$ 为第  $i$  类能源折算标准煤系数; $F_i$ 为第  $i$  类能源碳排放系数.各种能源折算标准煤系数和碳排放系数,见表 1.

表 1 能源折算标准煤系数和碳排放系数

Table 1 Energy conversion standard coal coefficient and carbon emissions coefficient

能源类型	标准煤折算系数(tce/t)	碳排放系数(t/tce)	能源类型	标准煤折算系数(tce/t)	碳排放系数(t/tce)
原煤	0.714	0.756	燃料油	1.429	0.618
洗精煤	0.900	0.765	润滑油	1.200	0.812
其他洗煤	0.450	0.808	溶剂油	1.467	0.585
型煤	0.600	0.798	石油沥青	1.331	0.775
焦炭	0.971	0.855	液化石油气	1.714	0.504
焦炉煤气	0.571	0.354	其他石油制品	1.200	0.585
原油	1.429	0.585	天然气	1.214	0.448
汽油	1.471	0.401	液化天然气	1.757	0.571
煤油	1.471	0.571	热力	0.034	0.252
柴油	1.457	0.592	电力	0.123	0.290

注:焦炉煤气、天然气、热力、电力折标准煤的单位分别为tce/10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>、tce/10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>、tce/10<sup>6</sup>KJ、tce/10<sup>3</sup>kW·h.

### 1.2 碳排放驱动因素分解模型

IDA 模型下有多种方法,其中,LMDI 分解模型具有全分解、无残差等优点<sup>[28-30]</sup>.因此,本文采用 LMDI 加法形式,根据交通碳排放的特征,在已有研究基础上<sup>[31]</sup>,将影响交通碳排放的因素分解为能源碳排放强度、能源效率、运输强度、产业结构、经济产出和人口规模,模型公式如下.

$$TC = \frac{TC}{E} \times \frac{E}{T} \times \frac{T}{TGDP} \times \frac{TGDP}{GDP} \times \frac{GDP}{P} \times P \quad (2)$$

$$= ECI \times EE \times TI \times IS \times EO \times P$$

分解模型中相关变量的定义,见表 2.从基期到  $t$  期交通碳排放差值称为总效应,总效应及各分解因素对碳排放贡献值的公式如下.

$$\Delta TC = TC' - TC^0 \quad (3)$$

$$= \Delta ECI + \Delta EE + \Delta TI + \Delta IS + \Delta EO + \Delta P$$

$$\Delta ECI = \frac{TC' - TC^0}{\ln TC' - \ln TC^0} \times \ln \left( \frac{ECI'}{ECI^0} \right) \quad (4)$$

$$\Delta EE = \frac{TC' - TC^0}{\ln TC' - \ln TC^0} \times \ln \left( \frac{EE'}{EE^0} \right) \quad (5)$$

$$\Delta TI = \frac{TC' - TC^0}{\ln TC' - \ln TC^0} \times \ln \left( \frac{TI'}{TI^0} \right) \quad (6)$$

$$\Delta IS = \frac{TC' - TC^0}{\ln TC' - \ln TC^0} \times \ln \left( \frac{IS'}{IS^0} \right) \quad (7)$$

$$\Delta EO = \frac{TC' - TC^0}{\ln TC' - \ln TC^0} \times \ln \left( \frac{EO'}{EO^0} \right) \quad (8)$$

$$\Delta P = \frac{TC' - TC^0}{\ln TC' - \ln TC^0} \times \ln \left( \frac{P'}{P^0} \right) \quad (9)$$

式中: $\Delta ECI$ 、 $\Delta EE$ 、 $\Delta TI$ 、 $\Delta IS$ 、 $\Delta EO$ 、 $\Delta P$  分别为交通能源碳排放强度、能源效率、运输强度、产业结构、经济产出、人口规模引起的碳排放变化量.若某因素对碳排放的贡献值大于 0,说明该因素会造成交通碳排放的增加;反之,说明该因素会抑制交通碳排放的增长.

表 2 变量定义

Table 2 Variable definition

变量	定义	单位
$E$	能源消耗总量	万 tce
$T$	折算后的运输周转量	亿 t·km
GDP	地区生产总值	万元
$P$	人口规模,即年末常住人口	万人
ECI	能源碳排放强度,即单位能源消耗所释放的碳排放量	t/tce
EE	能源效率,即单位周转量能耗	万 tce/(亿 t·km)
TI	运输强度,即单位交通运输业增加值的周转量	亿 t·km/万元
IS	产业结构,即交通运输业增加值占地区生产总值的比重	%
EO	经济产出,即人均地区生产总值	元/人

### 1.3 Tapio 脱钩模型

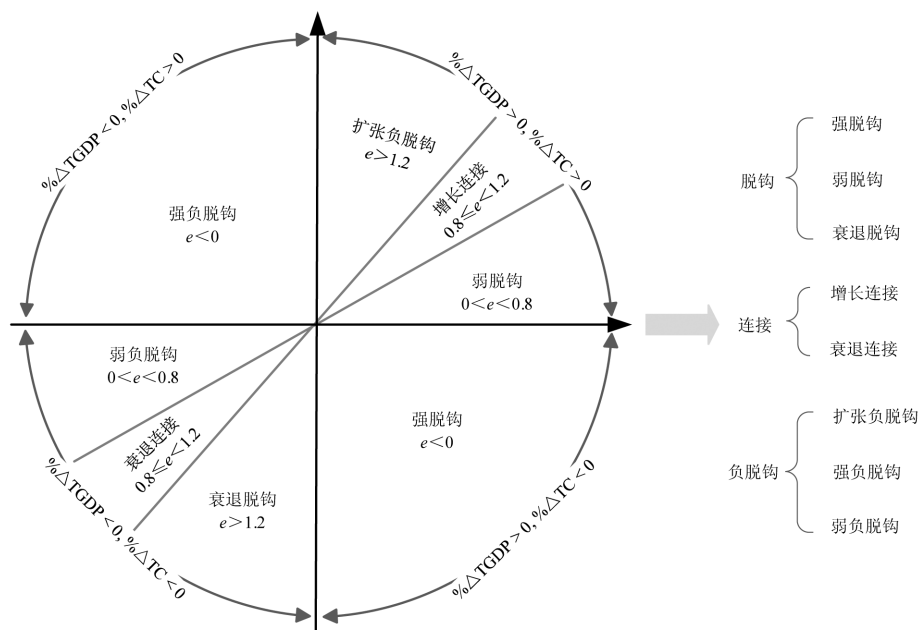


图 1 Tapio 脱钩状态划分

Fig.1 Classification of Tapio decoupling state

经济合作与发展组织(OECD)最早将脱钩模型

引入环境经济领域,并构建了 OECD 脱钩指数<sup>[32-33]</sup>.

OECD 脱钩模型虽然易于应用,但其缺点也很明显.第一,它对基准年的选择高度敏感,导致计算结果的稳定性较差<sup>[34]</sup>.第二,模型只能大致揭示两种状态:脱钩和不脱钩,无法解释微小的变化<sup>[35]</sup>.为解决上述缺点,Tapio<sup>[36]</sup>在 2005 年提出脱钩弹性概念并细化了脱钩指数分类<sup>0</sup>,将脱钩状态分为 3 个大类,包括 8 个子类,见图 1. Tapio 脱钩模型公式如下.

$$e = \frac{\% \Delta TC}{\% \Delta TGDP} = \frac{\Delta TC / TC^0}{\Delta TGDP / TGDP^0} \quad (10)$$

$$= \frac{(TC^t - TC^0) / TC^0}{(TGDP^t - TGDP^0) / TGDP^0}$$

式中: $e$  为交通碳排放与经济增长的脱钩指数; $\% \Delta TC$  和  $\% \Delta TGDP$  分别为交通碳排放量和交通运输业增加值的变化率; $t$  和  $0$  分别为研究期期末和期初.

由图 1 可知,脱钩分为强脱钩、弱脱钩和衰退脱钩 3 种状态,是碳排放污染开始好转的状态;连接分为增长连接和衰退连接两种状态,是碳排放和经济发展同时增加或减少且增速和降速相当的状态;负脱钩分为强负脱钩、弱负脱钩和扩张负脱钩 3 种状态,是碳排放污染相对严重的状态.

#### 1.4 脱钩努力模型

在不影响经济发展的前提下,剔除由经济产出效应引起的碳排放,可以进一步评估脱钩努力的有效性<sup>[37-38]</sup>.在 Tapio 脱钩模型和 LMDI 分解模型的基础上,构建脱钩努力模型.当经济产出的增长效应为正时,各驱动因素做出的脱钩努力程度计算公式如下.

$$D = -\frac{\Delta E}{\Delta EO} = -\frac{\Delta TC - \Delta EO}{\Delta EO}$$

$$= -\left( \frac{\Delta ECI}{\Delta EO} + \frac{\Delta EE}{\Delta EO} + \frac{\Delta TI}{\Delta EO} + \frac{\Delta IS}{\Delta EO} + \frac{\Delta P}{\Delta EO} \right) \quad (11)$$

$$= D_{ECI} + D_{EE} + D_{TI} + D_{IS} + D_P$$

式中: $D$  为剔除经济产出因素后的总脱钩努力程度, $D_{ECI}$ 、 $D_{EE}$ 、 $D_{TI}$ 、 $D_{IS}$ 、 $D_P$  分别为 5 个驱动因素各自做出的脱钩努力. $D \geq 1$ ,为强脱钩努力,表明驱动因素对碳排放与经济增长之间的脱钩具有促进作用,且能够完全抵消经济产出带来的碳排放贡献; $D \leq 0$ ,为无脱钩努力,表明驱动因素不会促进碳排放与经济增长之间的脱钩,反而促进了碳排放的增长; $0 < D < 1$ ,为弱脱钩努力,表明驱动因素对碳排放与经济增长之间脱钩具有促进作用,但无法完全抵消

经济产出带来的碳排放贡献.

#### 1.5 数据来源及区域划分

根据中国《国民经济行业分类》(GB/T4754-2017),本文所指的交通运输业泛指交通运输、仓储和邮政业.考虑到仓储和邮政业在整体能源消费中所占比例较小,且大部分能源消费用于支持交通运输活动<sup>[39]</sup>.因此涉及的交通运输业统计年鉴中的指标数据,均近似取值于对应的交通运输、仓储和邮政业数据<sup>[40-41]</sup>.选用 2001~2020 年中国 30 个省份的相关变量数据,交通运输能源消耗量和能源折算标准煤系数来源于《中国能源统计年鉴 2022》、中国碳核算数据库及各省份能源统计年鉴.能源碳排放系数来源于《中国能源统计年鉴 2022》及《IPCC 国家温室气体清单指南》.交通运输业增加值、各地区生产总值、旅客周转量、货物周转量及人口数量来源于《中国统计年鉴》及各省份统计年鉴.交通运输业增加值和地区生产总值均以 2001 年不变价为基期进行平减折算调整.铁路、公路、水路的旅客周转量转换为货物周转量的系数分别取 1、0.1、0.33<sup>[42]</sup>.

鉴于中国东部、中部和西部地区在经济发展水平、地理和交通条件及资源配置和产业结构等方面的差异,根据国家统计局三大地带分类标准<sup>[43]</sup>,将 30 个省份划分为东部、中部和西部 3 个地区,见表 3.

表 3 30 个省份三大地带划分

Table 3 Division of three regions in 30 provinces

区域	省/直辖市/自治区
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

## 2 结果与分析

### 2.1 交通碳排放驱动因素分解

有学者发现中国的“五年规划”政策对交通碳排放具有一定的影响<sup>[44-45]</sup>.因此,根据国家五年规划将研究期划分为 4 个阶段(2001~2005 年、2006~2010 年、2011~2015 年、2016~2020 年),基于 LMDI 分解模型分别对各驱动因素在中国各区域及 30 个省份的交通碳排放的贡献值进行量化.

#### 2.1.1 区域层面分析 各区域交通碳排放驱动因

素分解结果,见表 4.总体来看,2001~2020 年运输强度、经济产出和人口规模均促进了交通碳排放的增加.其中,经济产出是主导因素,累计增加碳排放 15880.58 万 t,对交通碳排放的贡献率高达 115.93%.

人口规模对交通碳排放产生的正效应较小,主要因为中国常住人口的增幅较小.从促降因素来看,产业结构是抑制碳排放增加的最主要贡献因素,累计减少碳排放 5453.51 万 t.

表 4 各区域交通碳排放驱动因素分解结果

Table 4 Decomposition results of driving factors of transport carbon emissions in each region

时期	地区	$\Delta ECI$	$\Delta EE$	$\Delta TI$	$\Delta IS$	$\Delta EO$	$\Delta P$	$\Delta TC$
2001~2005 年	全国	24.30	1915.42	975.91	-1158.41	2713.72	208.80	4679.73
	东部	18.79	982.05	648.11	-581.37	1453.41	187.25	2708.23
	中部	1.04	451.08	183.74	-320.66	611.34	0.67	927.21
	西部	4.47	482.30	144.06	-256.38	648.97	20.88	1044.29
2006~2010 年	全国	220.45	-2382.53	3401.13	-2265.33	5081.08	613.35	4668.17
	东部	59.24	-783.74	1062.96	-1023.82	2343.83	544.85	2203.33
	中部	100.24	-894.29	1161.28	-570.69	1231.30	39.85	1067.69
	西部	60.97	-704.51	1176.89	-670.82	1505.96	28.66	1397.14
2011~2015 年	全国	-161.45	181.93	-3495.76	-583.84	5310.71	446.41	1698.00
	东部	2.52	-510.11	-1112.71	-651.36	2281.21	378.25	387.81
	中部	-105.11	661.44	-1212.69	134.59	1465.98	-27.68	916.53
	西部	-58.86	30.59	-1170.37	-67.07	1563.52	95.84	393.66
2016~2020 年	全国	-515.87	-1124.70	-1001.92	-2068.04	3898.45	222.40	-589.68
	东部	-109.95	-1556.56	306.54	-912.53	1728.52	197.05	-346.93
	中部	-213.97	357.43	-719.90	-612.40	1136.10	-72.30	-125.05
	西部	-191.95	74.43	-588.56	-543.10	1033.84	97.65	-117.69
2001~2020 年	全国	-174.73	-327.84	2327.28	-5453.51	15880.58	1446.40	13698.18
	东部	-36.75	-1172.78	1777.65	-2598.52	7188.06	1249.23	6406.88
	中部	-50.37	539.60	422.43	-1520.92	4384.93	-11.10	3764.56
	西部	-87.61	305.35	127.20	-1334.07	4307.60	208.27	3526.74

能源碳排放强度、能源效率和运输强度对交通碳排放的影响存在阶段性差异,对交通碳排放既表现出促进作用,也表现出抑制效果.能源碳排放强度在 2001~2010 年促进了交通碳排放的增加,而在 2011~2020 年对交通碳排放表现为抑制作用,说明交通能源消耗结构改善,清洁能源产业建设力度正逐步加大.无论是促进作用还是抑制作用,能源碳排放强度对交通碳排放的贡献值均较小,2001~2020 年累计贡献率仅为 1.3%.

能源效率在 2001~2005 年和 2011~2015 年对交通碳排放表现为促进作用,而在 2006~2010 年和 2016~2020 年表现为抑制作用.这是因为“十五”时期国家加大了能源、交通运输等基础设施建设的投资,而“十一五”时期,交通运输业加大科技投入,不断强化创新能力建设,“十三五”则着手优化交通运输结构,力促节能减排.虽然“十二五”时期能源效率对交通碳排放在全国仍表现为促进作用,但其贡献率很小,且东部地区能源效率对碳排放表现为抑制作用,是因为东部地区作为中国的较发达地区,能源结构调整力度大,交通运输结构合理,交通基础设施完善.

运输强度在 2001~2010 年对交通碳排放表现为促进作用,在 2011~2020 年对交通碳排放表现为抑制作用,与能源碳排放强度的作用趋势类似,但运输强度对碳排放的贡献率更高.在“十五”和“十一五”期间,运输强度导致全国交通碳排放分别增加 975.91 和 3401.13 万 t,“十二五”和“十三五”期间,运输强度已成为抑制交通碳排放增加的核心因素.

2.1.2 省份层面分析 各省份交通碳排放驱动因素分解结果,见图 2.可以看出,不同省份交通碳排放驱动因素的影响差异较大.经济产出在各阶段均是导致各省份交通碳排放增加的决定性因素.2001~2020 年,除河北、山东、河南和青海 4 省外,其他省份经济产出对交通碳排放的贡献率均大于 100%.人口规模在绝大多数省份对交通碳排放总体上均存在较小的促进作用,但 4 个阶段都有个别中西部省份的人口规模对交通碳排放表现出抑制效果,如安徽、广西、贵州等地.在“十三五”期间,人口规模对交通碳排放呈现抑制作用的省份数量增多,其中包括北京、天津等经济发达省份,这主要与近几年年轻人生育意愿降低,人口数量小规模下降有关.产业结构

是抑制各省份交通碳排放增长的主导因素,但也存在个别省份的产业结构产生了碳增排效应.如图 2(c)可以看出,部分省份的产业结构效应促进交通碳排放的增长,如辽宁、河南等地.这主要与 GDP 和交通运输业增加值增速的相对大小有关<sup>[46]</sup>.当 GDP 增速

大于交通运输业增加值增速时,产业结构对交通碳排放的效应值为负,反之,效应值为正.2011~2015 年,辽宁省 GDP 增速为 37.88%,小于交通运输业增加值的增速 39.85%;河南省 GDP 增速为 46.37%,小于交通运输业增加值的增速 78.85%.

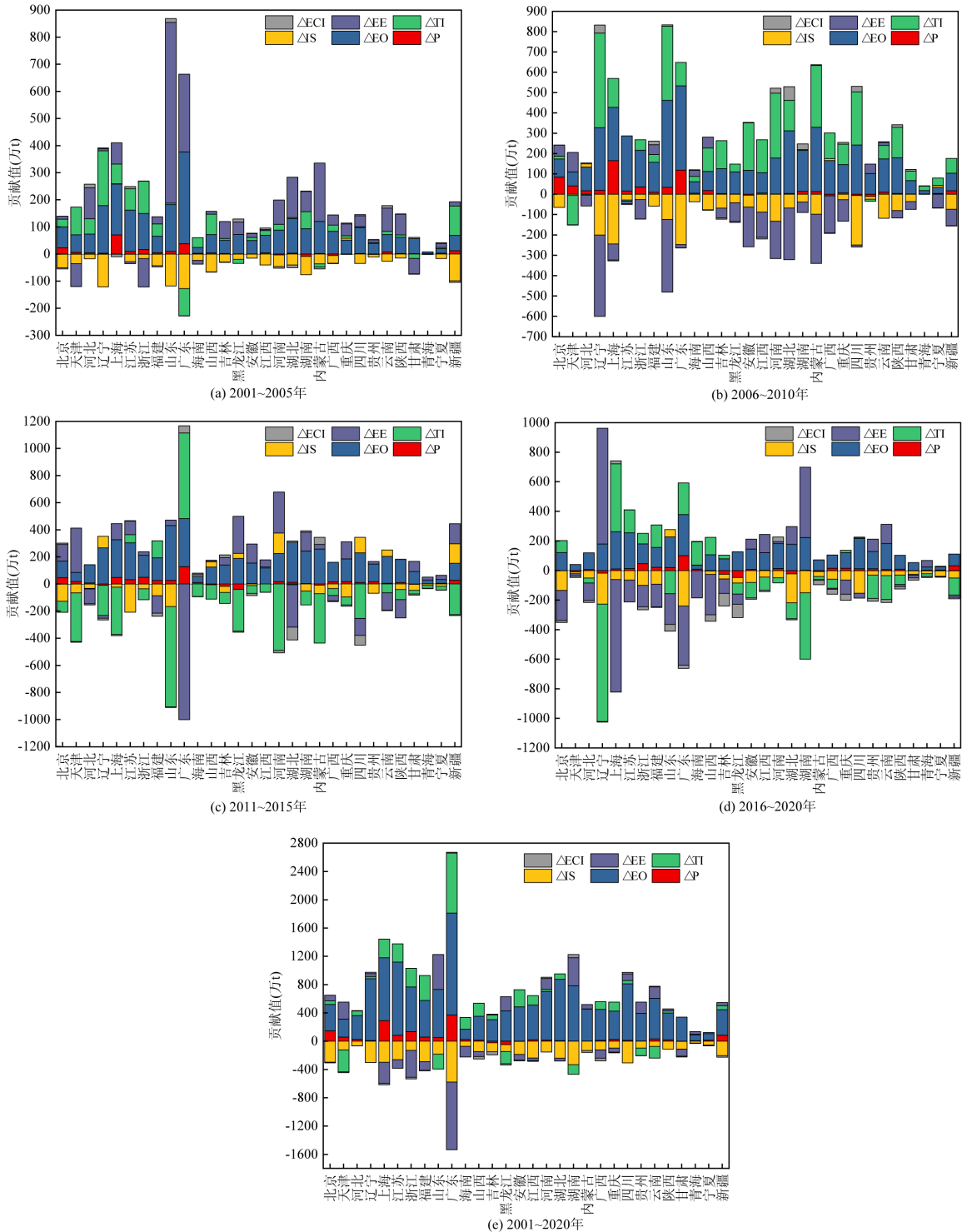


图 2 30 个省份交通碳排放驱动因素分解结果

Fig.2 Decomposition results of driving factors of transportation carbon emissions in 30 provinces

能源碳排放强度、能源效率和运输强度对交通碳排放的影响具有异质性。首先,就能源碳排放强度而言,研究期内,不同省份能源碳排放强度对交通碳排放既呈现正向驱动效应,又存在负向抑制作用,但作用效果均较小,且在 4 个阶段的作用趋势变化较小。这主要因为在中国的能源消费结构中,消费比例最大的能源是煤炭,煤炭在能源体系中的主体地位短期不会改变<sup>[45,47]</sup>。其次,就能源效率而言,能源效率在 2001~2005 年间对交通碳排放的影响在 24 个省份表现为促进作用,在山东的增排效果达到了 666.74 万 t;2006~2010 年,能源效率对交通碳排放的影响在 23 个省份表现为抑制作用,共减少碳排放 2726.37 万 t,是该阶段抑制交通碳排放增加的主导因素,其中在辽宁的减排效果达到了 399.75 万 t,贡献率高达-197.52%;2011~2015 年,绝大多数省份能源效率对交通碳排放的影响又重新表现为促进作用;2016~2020 年,绝大多数省份能源效率对交通碳排放的影响又表现为抑制作用。最后,就运输强度而言,绝大多数省份运输强度对交通碳排放的影响在 2001~2010 年表现为促进作用,主要是因为中国交通运输业在这一时期经历了快速增长阶段,但相对缺乏环保技术和清洁能源的应用,中国政府在这一时期主要关注经济发展和基础设施建设,对环保要求相对较低,交通运输业的能源政策也相对宽松。2011~2015 年和 2016~2020 年,运输强度对交通碳排放表现为抑制作用,累计减排量分别为 3495.76 万 t 和 1001.92 万 t,是交通碳减排的重要因素,这与中国的交通运输业能源政策逐渐加强有关。

此外,还可以发现同一地区内不同省份的影响因素差异较大。由图 2(d)可知,2016~2020 年,同属东部地区的辽宁和上海两地的能源效率和运输强度对交通碳排放的作用效果相反,辽宁的能源效率和运输强度对交通碳排放分别呈现促进和抑制作用,上海则相反。这主要因为两地在经济发展模式、交通运输网络等方面的差异。辽宁有中国最大的重工业基地,工业发展相对较为集中,尤其是重化工业和能源行业,这导致辽宁的交通运输活动所需的能源消耗较大,单位周转量能耗相对较高,从而促进了交通碳排放的增加。而作为中国的经济中心之一,上海具有完善的城市交通网络,包括高速公路、城际铁路、轨道交通等多种交通方式,交通网络的发达使得上

海地区运输强度相对较大,从而伴随着交通碳排放的增加。因此,有必要根据地区的交通碳排放量、经济发展水平和交通基础设施完善程度等因素,制定差异化交通碳减排路径方案。

## 2.2 交通碳排放与经济增长脱钩分析

利用 Tapio 脱钩模型分别对中国各区域及 30 个省份在 4 个阶段的交通碳排放与经济增长之间的脱钩状态进行研究,结果分别见图 3 和表 5。从区域角度来看,4 个阶段中,全国、东部、中部和西部地区的交通碳排放脱钩指数均处于下降态势,均经历了从“扩张负脱钩→弱脱钩→强脱钩”的脱钩变化趋势,脱钩状态好转。结合图 3 和表 5 中数据可以看出,除了 2001~2005 年,东部地区的脱钩指数在其余 3 个阶段均小于全国整体脱钩指数;中部地区的脱钩指数在 4 个阶段均大于全国整体脱钩指数;西部地区脱钩指数相对于全国整体脱钩指数的大小趋势不稳定,2001~2005 年和 2011~2015 年的脱钩指数小于全国整体脱钩指数,2006~2010 年和 2016~2020 年的脱钩指数大于全国整体脱钩指数。

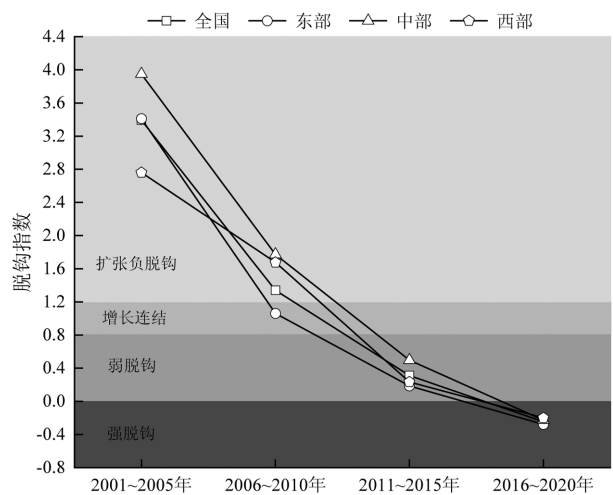


图 3 各区域交通碳排放脱钩状态

Fig.3 Decoupling state of transport carbon emissions in each region

从省份角度来看,30 个省份的脱钩状态主要表现为扩张负脱钩、增长连接、弱脱钩和强脱钩 4 种。这是因为交通运输业增加值总体上一直保持增长态势。2001~2005 年,绝大多数省份均表现为扩张负脱钩状态,表明此期间刚性交通需求增加的同时,各地区尚未形成有效的交通减排措施,从而导致交通

碳排放加剧.山东、海南、山西、湖南、宁夏等地的脱钩指数较高,意味着这些省份交通运输业经济水平增长速度远远小于碳排放量增长速度.2006~2010年,处于扩张负脱钩状态的省份数量由26个减至17个,且脱钩指数明显降低,处于弱脱钩和增长连接状态的省份数量增多,脱钩状态有所好转.2011~2015年,处于弱脱钩和强脱钩状态的省份数量增多,这与

许多省份的交通碳排放增长率下降密切相关.2016~2020年,处于强脱钩状态的省份数量已增至15个,脱钩状态优化明显.在这4个阶段,虽然多数省份的脱钩状态逐步向强脱钩靠拢,脱钩水平向好发展,但仍存在一些省份的脱钩状态反弹和恶化,如北京、江苏、江西、湖南等地,表明实现各省份交通碳排放与经济增长的绝对脱钩还需要做出更多努力.

表5 30个省份交通碳排放脱钩状态

Table 5 Decoupling state of transportation carbon emissions in 30 provinces

地区	省份	2001~2005年		2006~2010年		2011~2015年		2016~2020年	
		脱钩指数	脱钩状态	脱钩指数	脱钩状态	脱钩指数	脱钩状态	脱钩指数	脱钩状态
东部	北京	1.887	END	1.789	END	2.338	END	10.180	RD
	天津	1.596	END	0.451	WD	-0.811	SD	-0.279	SD
	河北	7.164	END	0.605	WD	-0.092	SD	-1.210	SD
	辽宁	5.922	END	1.958	END	0.220	WD	1.314	RD
	上海	1.775	END	1.364	END	0.192	WD	-0.355	SD
	江苏	1.838	END	0.895	EC	2.988	END	1.032	EC
	浙江	1.144	EC	0.736	WD	0.669	WD	-0.177	SD
	福建	5.051	END	2.475	END	0.746	WD	0.926	EC
	山东	30.499	END	1.045	EC	-1.264	SD	-0.393	SD
	广东	1.999	END	1.403	END	0.310	WD	-0.471	SD
	海南	49.830	END	4.455	END	-0.168	SD	0.285	WD
	整体	3.411	END	1.062	EC	0.187	WD	-0.277	SD
	中部	山西	21.239	END	7.241	END	0.360	WD	-1.182
吉林		5.254	END	2.892	END	0.916	EC	-4.974	SD
黑龙江		2.016	END	0.127	WD	0.741	WD	-3.648	SD
安徽		2.003	END	1.928	END	1.604	END	0.255	WD
江西		2.109	END	2.833	END	0.915	EC	1.355	END
河南		4.773	END	5.696	END	0.382	WD	1.067	EC
湖北		3.298	END	0.824	EC	-0.232	SD	0.877	RC
湖南		12.956	END	0.876	EC	1.302	END	1.371	END
整体		3.950	END	1.773	END	0.498	WD	-0.227	SD
西部	内蒙古	5.941	END	1.364	END	-0.407	SD	-0.748	SD
	广西	2.596	END	0.602	WD	0.212	WD	-1.100	SD
	重庆	2.623	END	1.035	EC	1.779	END	-1.035	SD
	四川	1.976	END	-54.822	SND	-0.216	SD	0.618	WD
	贵州	1.651	END	1.651	END	1.293	END	0.029	WD
	云南	4.500	END	2.830	END	0.173	WD	0.614	WD
	陕西	3.956	END	2.771	END	-0.387	SD	-0.272	SD
	甘肃	-0.158	SD	1.550	END	2.025	END	-0.434	SD
	青海	0.796	WD	3.023	END	0.951	EC	20.485	END
	宁夏	11.776	END	0.220	WD	1.108	EC	1.145	RC
	新疆	-4.117	SND	0.679	WD	0.631	WD	-1.156	SD
	整体	2.760	END	1.678	END	0.234	WD	-0.199	SD
全国	-	3.393	END	1.341	END	0.312	WD	-0.245	SD

注:SD、WD、EC、RC、RD、END、SND分别表示强脱钩、弱脱钩、增长连接、衰退连接、衰退脱钩、扩张负脱钩、强负脱钩。

### 2.3 交通碳排放驱动因素脱钩努力分析

运用LMDI分解模型评价各驱动因素对碳排放的贡献,并分析了碳排放与经济增长之间的脱钩水平.然而,上述研究并不能定量地评估驱动因素对脱

钩状态的影响,而脱钩努力模型可以将碳排放驱动因素分解模型和脱钩理论结合,定量分析各因素为达到脱钩状态所做的努力.交通碳排放驱动因素的脱钩努力情况,见图4.可知,剔除经济产出因素后,全

国、东部、中部和西部总体呈现出“无脱钩努力→弱脱钩努力→强脱钩努力”的阶段性特点。“十五”期间表现为无脱钩努力效应,“十一五”和“十二五”期间表现为弱脱钩努力效应,“十三五”期间表现为强脱钩努力效应。

从脱钩努力驱动因素来看,全国层面上,2001~2005 年,产业结构因素脱钩努力值为 0.427,做出了弱脱钩努力,其余因素均未做出脱钩努力;2006~2010 年,能源效率和产业结构因素脱钩努力值分别

为 0.469 和 0.446,均做出了弱脱钩努力;2011~2015 年,能源碳排放强度、运输强度和产业结构因素脱钩努力值分别 0.030、0.658 和 0.110,能源效率和人口规模因素未做出脱钩努力;2016~2020 年,除人口规模外,其余因素均做出了弱脱钩努力.总体而言,为实现交通碳排放与经济增长脱钩而做出努力的驱动因素数量逐步增加,产业结构因素在 4 个阶段的脱钩努力效应均为正值,人口规模因素在 4 个阶段的脱钩努力效应均为负值。

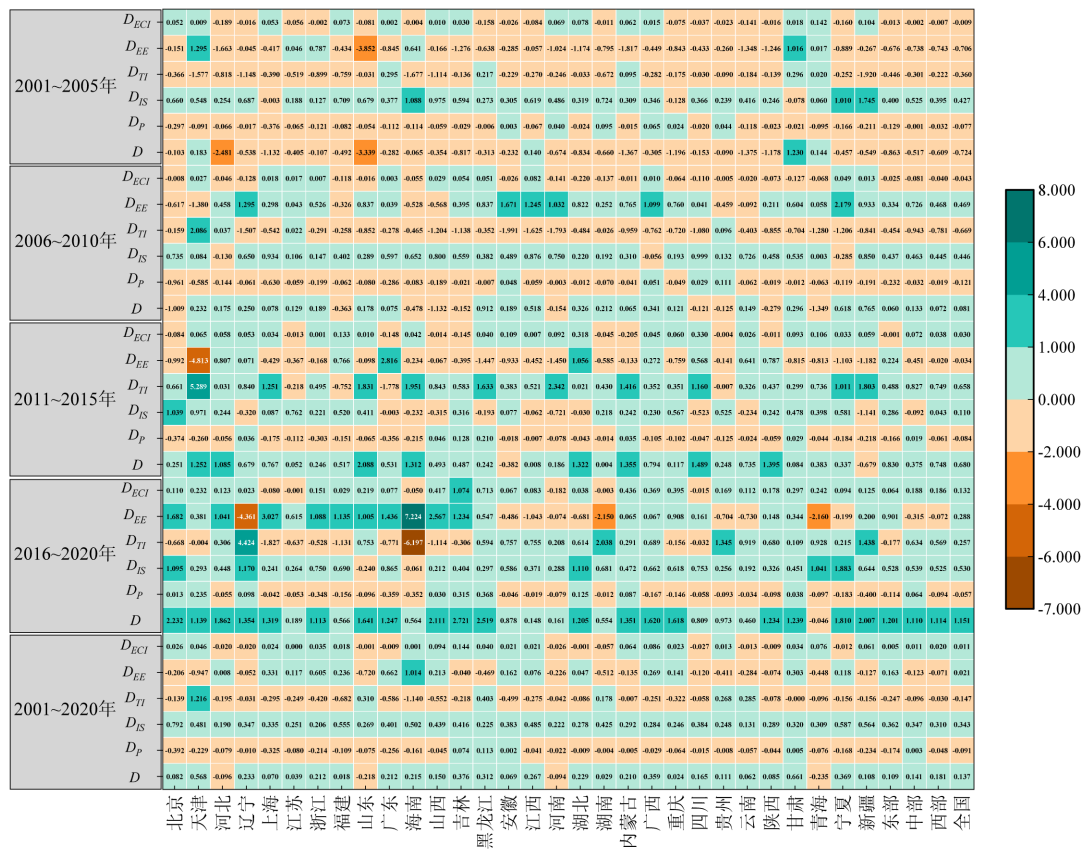


图 4 交通碳排放驱动因素的脱钩努力情况

Fig.4 Decoupling effort of driving factors for transportation carbon emissions

从脱钩努力的省份分布来看,“十五”期间,中国仅有 4 个省份脱钩努力值为正,分别为天津、江西、甘肃和青海.其中,甘肃的脱钩努力值大于 1,说明其为实现交通碳排放与经济增长脱钩做出了强脱钩努力,碳减排努力引致的碳排放减量完全抵消了经济发展引致的碳排放增量.“十一五”期间,脱钩努力值为正的省份数量增加至 20 个,均做出了弱脱钩努力.“十二五”期间,做出强脱钩努力的省份数量增至 8 个,安徽和新疆成为仅有的未做出脱钩努力的省

份.“十三五”期间,做出强脱钩努力的省份数量增至 19 个,青海在该阶段的脱钩努力值为负,其他省份的脱钩努力值都保持在正向的中等水平.总体而言,大部分省份的交通碳排放与经济增长之间的脱钩关系在“十一五”期间就已有所改善,并在“十二五”和“十三五”时期进一步得到优化。

结合省份特征和驱动因素来看,2001~2020 年,能源碳排放强度因素的作用效果最不明显,30 个省份脱钩努力绝对值最大仅为 0.144,在 19 个省份做出

一定的脱钩努力;能源效率因素对 15 个省份做出脱钩努力,在海南呈现强脱钩努力状态,而在天津、山东和湖南等地阻碍了碳脱钩的实现;运输强度因素在天津有明显的强脱钩努力效果,在山东、黑龙江、湖南、贵州和云南呈现弱脱钩努力状态,在其余 24 个省份呈现无脱钩努力状态;产业结构因素对 30 个省份均做出脱钩努力,展现出对加快脱钩进程的积极影响,意味着产业结构升级做出的碳减排努力引致的碳排放减量可以不同程度地抵消经济发展引致的部分碳排放增量;人口规模因素在 26 个省份未做出脱钩努力,尤其是在北京、天津、上海等人口密集区。总体而言,2001~2020 年,除河北、山东、河南和青海 4 省外,其余省份均为碳脱钩做出了努力。其中,甘肃做出的脱钩努力最大,脱钩努力值达到了 0.661。

## 2.4 政策建议

基于上述研究结论,结合《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》的要求,提出如下促进交通运输业经济与环境协调发展的建议。

经济产出和人口规模是导致交通碳排放增加的主导因素,但通过限制行业规模产出的方式来减少交通碳排放,明显不符合经济发展现实。政府应在确保经济增长不受影响的前提下,加速推动产业结构的优化升级和高能耗行业的改革,重点发展具有战略意义的新兴产业和高科技产业,以实现经济、环境和社会效益的三方面平衡。与此同时,注重人口密集地区的交通规划与管理,提升城市公共交通的覆盖率和服务质量,优化公共交通运行效率,减少拥堵和能源浪费。积极推广绿色低碳出行理念,鼓励和推广电动车、混合动力车辆等低碳交通工具的使用,在满足交通需求的基础上,尽可能地减少碳排放。

产业结构的有效调整可以加快碳脱钩进程。这就需要对高能耗产业进行优化改革,以降低碳排放为前提,同时保持其高附加值,最大化碳排放空间的经济效益,实现产业发展与经济增长之间相对平衡的状态。清洁能源的广泛应用大大抑制了化石燃料需求的增长,为加速向非化石能源转型提供了机遇。IEA 发布的《2023 年全球碳排放报告》中指出,如果没有清洁能源技术,过去五年全球二氧化碳排放量将增加 3 倍。因此,应鼓励交通运输企业大力发展清洁化运输装备,使用清洁能源驱动技术。此外,由

于不同省份的经济结构、产业布局、区域发展水平和交通需求等方面存在差异,导致各驱动因素在各省份的脱钩努力程度不同。只有因地制宜制定碳减排政策,才能更好地实现交通运输业经济与环境的协调发展。

虽然中国碳排放脱钩指数总体呈下降态势,脱钩水平向好发展,但存在一些省份的脱钩状态反弹和恶化,碳排放脱钩状态不稳定。因此,建立跨区域合作机制,以促进各省份间的技术互通、政策协作和经验共享,共同探讨低碳交通解决方案,推动低碳交通技术在不同地区的普及应用。脱钩水平落后的省份应借鉴先进省份的治理经验,完善碳减排政策,因地制宜,分类施策,以实现交通碳排放稳定脱钩为目标,促进交通运输业经济高质量发展。

## 3 结论

3.1 运输强度、经济产出和人口规模总体上均促进了交通碳排放的增加。经济产出对交通碳排放的累计贡献率高达 115.93%。产业结构是抑制交通碳排放增长的最主要贡献因素,累计减少碳排放 5453.51 万 t。能源碳排放强度、能源效率和运输强度对交通碳排放的影响存在阶段性差异,能源碳排放强度对交通碳排放的累计贡献率仅为 1.3%。

3.2 30 个省份交通碳排放的脱钩主要表现为扩张负脱钩、增长连接、弱脱钩和强脱钩 4 种状态。“十三五”时期,处于强脱钩的省份数量已增至 15 个,但仍存在一些省份的脱钩状态出现反弹和恶化。

3.3 为实现交通碳排放与经济增长脱钩而做出努力的驱动因素数量正逐步增加。产业结构在 4 个阶段的脱钩努力效应均为正,而人口规模因素的脱钩努力效应均为负。

## 参考文献:

- [1] 王超,武丽敏.基于“双碳”视角的丝绸之路经济带交通碳排放驱动因素分析[J].干旱区资源与环境,2024,38(2):9-19.  
Wang C, Wu L M. Factors driving the carbon emission reduction in transport along the Silk Road economic belt: an analysis from the perspective of "double carbon" [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024,38(2):9-19.
- [2] Han X, Xu Y, Kumar A, et al. Decoupling analysis of transportation carbon emissions and economic growth in China [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2018,37(5):1696-1704.
- [3] Engo J. Decoupling analysis of CO<sub>2</sub> emissions from transport sector in

- Cameroon [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019,51:101732.
- [4] 邵海琴,王兆峰.中国交通碳排放效率的空间关联网络结构及其影响因素 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2021,31(4):32-41.
- Shao H Q, Wang Z F. Spatial network structure of transportation carbon emissions efficiency in China and its influencing factors [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021,31(4):32-41.
- [5] Sun D, Xia J. Research on road transport planning aiming at near zero carbon emissions: taking Ruicheng County as an example [J]. *Energy*, 2023,263:125834.
- [6] Vanhulsel M, Degraeuwe B, Beckx C. Road transportation emission inventories and projections—case study of Belgium: methodology and pitfalls [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014,27:41-45.
- [7] Palencia J C G, Otsuka Y, Araki M, et al. Scenario analysis of lightweight and electric-drive vehicle market penetration in the long-term and impact on the light-duty vehicle fleet [J]. *Applied Energy*, 2017,204:1444-1462.
- [8] Liu J, Chen X, Zhou H, et al. A practical methodology to evaluate internationally consistent energy data for China's transport sector [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,239:118030.
- [9] Yang X, Pang J, Teng F, et al. The environmental co-benefit and economic impact of China's low-carbon pathways: evidence from linking bottom-up and top-down models [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021,136:110438.
- [10] Zhu C, Gao D. A research on the factors influencing carbon emission of transportation industry in “the Belt and Road Initiative” countries based on panel data [J]. *Energies*, 2019,12(12):2405.
- [11] 刘淳森,曲建升,葛钰洁,等.基于 LSTM 模型的中国交通运输业碳排放预测 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(5):2574-2582.
- Liu C S, Qu J S, Ge Y J, et al. LSTM model-based prediction of carbon emissions from China's transportation sector [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(5):2574-2582.
- [12] 陈亮,何涛,李巧茹,等.区域交通碳排放相关指标测算及影响因素分析 [J]. *北京工业大学学报*, 2017,43(4):631-637.
- Chen L, He T, Li Q R, et al. Index calculation and effect factor study of regional transport carbon emission [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017,43(4):631-637.
- [13] 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.
- [14] Ang B W, Liu N. Energy decomposition analysis: IEA model versus other methods [J]. *Energy Policy*, 2007,35(3):1426-1432.
- [15] Wang H, Ang B W, Su B. A multi-region structural decomposition analysis of global CO<sub>2</sub> emission intensity [J]. *Ecological Economics*, 2017,142:163-176.
- [16] Ang B W. Decomposition methodology in industrial energy demand analysis [J]. *Energy*, 1995,20(11):1081-1095.
- [17] Zhang D, Wang H, Löschel A, et al. The changing role of global value chains in CO<sub>2</sub> emission intensity in 2000~2014 [J]. *Energy Economics*, 2021,93:105053.
- [18] Jiang X, Guan D. The global CO<sub>2</sub> emissions growth after international crisis and the role of international trade [J]. *Energy Policy*, 2017,109:734-746.
- [19] 左大杰,戴文涛,熊巧,等.基于 EKC 视角的四川省交通碳排放与行业增长关系的实证研究 [J]. *公路交通科技*, 2018,35(4):129-136.
- Zuo D J, Dai W T, Xiong Q, et al. Empirical study on relationship between traffic carbon emission and industry growth in Sichuan Province based on EKC perspective [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018,35(4):129-136.
- [20] 周岸,吴开亚.上海市交通碳排放驱动因素分析 [J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2020,43(2):264-269.
- Zhou A, Wu K Y. Analysis of driving factors for carbon emissions from transportation in Shanghai [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2020,43(2):264-269.
- [21] 蔡婉华,叶阿忠.交通运输、经济增长与碳排放之间的互动关系研究——基于 PVAR 模型 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017,17(3):26-31.
- Cai W H, Ye A Z. Interactive relationship among transportation, economic growth, and carbon emissions based on PVAR model [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017,17(3):26-31.
- [22] Acheampong A O. Economic growth, CO<sub>2</sub> emissions and energy consumption: what causes what and where? [J]. *Energy Economics*, 2018,74:677-692.
- [23] Azlina A A, Law S H, Mustapha N H N. Dynamic linkages among transport energy consumption, income and CO<sub>2</sub> emission in Malaysia [J]. *Energy Policy*, 2014,73:598-606.
- [24] Wang Q, Su M, Li R. Toward to economic growth without emission growth: the role of urbanization and industrialization in China and India [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,205:499-511.
- [25] Wang Q, Wang S. A comparison of decomposition the decoupling carbon emissions from economic growth in transport sector of selected provinces in eastern, central and western China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,229:570-581.
- [26] Parker S. A decoupling analysis of transport CO<sub>2</sub> emissions from economic growth: evidence from Vietnam [J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2022,16(10):928-941.
- [27] Liu X, Bao Y, Zhang Y, et al. Decoupling analysis on China's civil aviation carbon emissions from transportation revenue: a three-dimension decomposition framework [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022,32:718-730.
- [28] 王安静,郭琳,赵景峰.中国经济与碳排放脱钩的时空异质性及其驱动因素分析 [J]. *软科学*, 2024,38(5):100-106.
- Wang A J, Guo L, Zhao J F. Spatial and temporal heterogeneity of the decoupling between economy and carbon emissions and its driving factors [J]. *Soft Science*, 2024,38(5):100-106.
- [29] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide [J]. *Energy Policy*, 2005,33(7):867-871.
- [30] 刘浩东,邱微,陈爽.黑龙江省能源碳排放核算及驱动因素分析 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(7):4117-4126.
- Liu H D, Qiu W, Chen S. Accounting and driving factors analysis of energy carbon emissions in Heilongjiang Province [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(7):4117-4126.
- [31] 胡怀敏,左薇,徐士元.长江经济带交通能源碳排放脱钩效应及驱

- 动因素研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(4):862-877.
- Hu H M, Zuo W, Xu S Y. Decoupling effect and driving factors of transportation energy carbon emission in Yangtze River economic belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(4): 862-877.
- [32] 田泽源,董 治,董治宇,等.基于面板数据模型关中平原城市群交通碳排放峰值预测与脱钩分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(10): 5901-5911.
- Tian Z Y, Dong Z, Dong Z Y, et al. Predicting and decoupling analysis of transportation peak carbon emissions in Guanzhong Plain urban agglomeration based on panel data modeling [J]. China Environmental Science, 2024,44(10):5901-5911.
- [33] 庞 军,梁宇超,孙可可,等.中国经济增长与煤炭消费脱钩及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):1144-1157.
- Pang J, Liang Y C, Sun K K, et al. Decoupling effects and driving factors between provincial economic growth and coal consumption in China [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):1144-1157.
- [34] Zhu S, Sun H, Xia X, et al. Decoupling analysis of carbon emissions and forest area in China from 2004 to 2020 [J]. Land, 2023,12(7): 1458.
- [35] Magazzino C, Mele M. On the relationship between transportation infrastructure and economic development in China [J]. Research in Transportation Economics, 2021,88:100947.
- [36] Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. Transport Policy, 2005,12(2):137-151.
- [37] Wang Q, Wang S. Decoupling economic growth from carbon emissions growth in the United States: the role of research and development [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,234:702-713.
- [38] 刘博文,张 贤,杨 琳.基于 LMDI 的区域产业碳排放脱钩努力研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018,28(4):78-86.
- Liu B W, Zhang X, Yang L. Decoupling efforts of regional industrial development on CO<sub>2</sub> emissions in China based on LMDI analysis [J]. China Population, Resources and Environment, 2018,28(4):78-86.
- [39] 丁利杰,朱泳丽.中国交通运输业碳排放区域差异及脱钩效应 [J]. 东南学术, 2023,(4):162-174.
- Ding L J, Zhu Y L. Regional differences and decoupling effect of carbon emissions in China's transportation industry [J]. Southeast Academic Research, 2023,(4):162-174.
- [40] 李铭泓,黄 羿,朱伟俊,等.中国交通运输业碳排放全要素生产率研究——基于 Global Malmquist-Luenberger 指数 [J]. 科技管理研究, 2021,41(9):203-211.
- Li M H, Huang Y, Zhu W J, et al. Research on the carbon emission total factor productivity of the transportation industry in China based on the Global Malmquist-Luenberger index [J]. Science and Technology Management Research, 2021,41(9):203-211.
- [41] 王 波,王涵韬,费 烜.中国交通碳排放与经济发展脱钩研究 [J]. 科技导报, 2023,41(22):38-46.
- Wang B, Wang H T, Fei D. Research on the decoupling of China's transportation carbon emissions and economic development from 2000 to 2020 [J]. Science & Technology Review, 2023,41(22):38-46.
- [42] Li Y, Du Q, Lu X, et al. Relationship between the development and CO<sub>2</sub> emissions of transport sector in China [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019,74:1-14.
- [43] 国家统计局.三大地带 [EB/OL]. 2023-5-22 [2024-2-6]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>.
- National Bureau of Statistics. The three regions [EB/OL]. 2023-5-22 [2024-2-6]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>.
- [44] Bai C, Chen Y, Yi X, et al. Decoupling and decomposition analysis of transportation carbon emissions at the provincial level in China: perspective from the 11th and 12th Five-Year plan periods [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019,26:15039-15056.
- [45] Wu Y, Tam V W Y, Shuai C, et al. Decoupling China's economic growth from carbon emissions: empirical studies from 30 Chinese provinces (2001-2015) [J]. Science of the Total Environment, 2019, 656:576-588.
- [46] 刘妍慧,栗 洋.湖北省交通运输业碳排放测算及影响因素分解 [J]. 统计与决策, 2022,38(15):88-92.
- Liu Y H, Li Y. Calculation of carbon emissions from the transportation industry in Hubei Province and decomposition of influencing factors [J]. Statistics & Decision, 2022,38(15):88-92.
- [47] Wang C, Wood J, Wang Y, et al. CO<sub>2</sub> emission in transportation sector across 51 countries along the Belt and Road from 2000 to 2014 [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,266:122000.

**作者简介:** 邵志国(1988-),男,山东泰安人,副教授,博士,主要研究方向为低碳交通运输.发表论文 20 余篇.shaozhiguo@qut.edu.cn.