

中国交通碳排放与经济发展脱钩研究

王波¹, 王涵韬¹, 费烜^{2*}

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275

2. 国家发展和改革委员会宏观经济研究院综合运输研究所, 北京 100038

摘要 采用“自下而上”的交通碳排放计算方法统计全国及各省的铁路、航空、水运和道路的年度交通碳排放, 分析了2000—2020年中国交通碳排放的时空变化, 并使用Tapio脱钩模型探究中国交通碳排放脱钩状态。研究发现:(1) 2000—2020年, 中国交通碳排放总量从23774.41万t增长至139051.47万t, 2004—2011年为高速增长期, 2012年以后增速开始放缓;(2) 2000—2020年, 道路碳排放一直是中国交通碳排放的主要来源, 航空交通碳排放的占比小幅增加, 铁路和水运碳排放的占比则出现较大幅度的减少;(3) 2000—2020年, 中国东部、中部、西部和东北4大地区的交通碳排放量持续存在明显的区域差异;(4) 2000—2020年间, 中国交通行业碳排放和经济发展呈现出“相对脱钩”的总体态势, 北京、上海等省份已进入“强脱钩”状态。

关键词 交通碳排放; 脱钩分析; Tapio脱钩模型

近年来, 碳排放及气候变化问题已成为全球学术界关注的热点。根据国际能源署(International Energy Agency, IEA)的温室气体排放数据, 21世纪初中国二氧化碳排放量约为33亿t, 占全球比例不到14%; 2006年迅速增加至59亿t, 跃居世界第1位; 2013年则达90亿t, 占全球比例近30%^[1]。其中, 交通运输业作为支撑国民经济的重要行业, 也是能源消耗最多和碳排放增速最快的行业之一, 已成为全球的第2大碳排放源^[2]。根据IEA提供的中国历年交通碳排放数据, 中国交通碳排放从1990

年的1.09亿t迅速增长到了2012年的7.02亿t^[3]。

中国从自身经济社会可持续发展的需要出发, 重点推进交通领域的绿色发展。针对交通运输领域提出“推动运输工具装备低碳转型、构建绿色高效交通运输体系、加快绿色交通基础设施建设”3大举措^[4-5]。2023年1月19日国务院印发《新时代的中国绿色发展》白皮书中多次提到了“推进交通运输工具绿色转型, 提升交通基础设施绿色化水平”^[6]。随着“双碳”战略的逐步推进, 中国已成为全球生态文明建设和低碳经济发展的重要参与者、贡

收稿日期: 2023-06-15; 修回日期: 2023-09-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42271210); 广东省自然科学基金面上项目(2022A1515011572)

作者简介: 王波, 副教授, 研究方向为城市地理与区域规划、智慧城市, 电子信箱: wangbo68@mail.sysu.edu.cn; 费烜(通信作者), 助理研究员, 研究方向为绿色低碳交通、综合交通规划, 电子信箱: feidanju@gmail.com

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.22.006

献者、引领者^[7]。因此,研究中国交通行业碳排放的时空特征和变化情况,对中国政府制定绿色低碳的交通战略,以及促进交通行业整体的可持续发展,有着积极且重要的意义。

1 研究现状

国内外针对中国交通碳排放量的计算已开展了大量的研究。但由于交通领域碳排放核算体系尚未得到统一,存在较多的数据缺失或统计口径不同的问题,学界多使用“自上而下”法进行全国层面的交通碳排放计算方法^[8-12],而“自下而上”法多用于计算局部地区或城市的交通碳排放^[13-14],这导致只能估算交通碳排放的总量,而无法细分到各交通方式。同时全国及省份层面的交通碳排放往往仅关注城际交通,而忽视了城市内部交通^[15],中国私人汽车等交通工具保有量的快速增长带来了一定的计算误差。

国内外研究交通碳排放与经济的关系,最常见的包括能源、环境与经济增长理论、环境库兹涅茨曲线理论以及脱钩理论^[16]等理论方法。脱钩理论能够量化碳排放和经济发展二者的关系,可以作为研究区域、行业碳排放重要的理论支撑。目前已有较多学者运用脱钩理论研究中国交通碳排放与经济增长的脱钩关系,但多是在全国整体层面^[16-20],针对交通碳排放与经济关系的脱钩分析较少涉及区域和省际的对比,未能深入分析各省的脱钩情况。基于此,本文采用“自下而上”的交通碳排放计算方法统计全国及各省的铁路、航空、水运和道路的年度交通碳排放,分析2000—2020年中国交通碳排放的时空变化,并使用Tapio脱钩模型探究中国交通碳排放脱钩状态。

2 研究方法与数据

2.1 研究方法

2.1.1 交通碳排放计算

依据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^[21],交通部门的CO₂排放核算方法可以分为自

上而下和自下而上2种方式。前者是基于交通工具的整体燃料消耗的数据计算;后者则是基于各类交通工具能源活动的计算方法,通过交通工具的运输强度和单位能耗进行估算。自上而下和自下而上法分别具体如公式(1)和公式(2)所示

$$E = \sum_{j,k} F_{j,k} \times C_{j,k} \quad (1)$$

其中, E 为交通部门CO₂排放量。 $F_{j,k}$ 表示不同交通类型、不同燃料类型的排放因子, $C_{j,k}$ 表示不同交通类型、不同燃料的消耗量。 j,k 分别代表交通类型和燃料类型。

$$E = \sum_{j,k} F_{j,k} \times V_{j,k} \times M_{j,k} \quad (2)$$

其中, $V_{j,k}$ 表示不同交通类型、不同燃料类型交通工具的总换算周转量, $M_{j,k}$ 代表不同交通类型、不同燃料类型交通工具的单位运输工作量能耗。

此外,目前中国有统计的交通运输业能源消耗仅包括社会运营车辆的能源消耗,大量非运营交通工具没有纳入统计中^[22]。但是随着经济增长和生活水平的提高,非运营交通工具的能源消耗占交通部门的比重越来越大^[23]。因此在本文的交通碳排放计算中将把非运营交通工具(私人汽车、摩托车)纳入。

2.1.2 Tapio脱钩模型

脱钩(decoupling)最早用于物理学领域,表示两个物理量间不同的变化趋势^[24]。经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)为探讨经济发展与生态环境间的相关性,将其应用到环境领域,如将30个成员国39个指标作为其环境与经济脱钩指标进行了脱钩分析^[25]。

脱钩指标主要用于描述环境压力与驱动力变化的关系,在本文中环境压力(environment pressure, EP)为交通行业二氧化碳排放量,经济驱动力(driving factors, DF)为交通行业GDP,本文参考Tapio^[26]构建的脱钩模型,利用指标变化率测度交通碳排放和经济发展的脱钩状态,具体如式(3)所示

$$e_{(EP,DF)} = \frac{\Delta EP}{EP} \bigg/ \frac{\Delta DF}{DF} \quad (3)$$

其中, $e_{(EP,DF)}$ 表示交通碳排放与交通行业经济发展之间的脱钩弹性指标。 EP 为基期的交通碳排放量,

ΔEP 是末期与基期间的交通排放量变化, $\Delta EP/EP$ 则为末期到基期的交通排放量变化率。 DF 为基期的交通行业 GDP, ΔDF 是末期与基期间的交通行业 GDP 变化, $\Delta DF/DF$ 则为末期到基期的交通行业 GDP 变化率。

同时运用恒等式对其进行因果链分解, 将碳排放与经济增长之间的脱钩弹性分解为一组中间变量弹性的乘积, 即交通碳排放与交通运输量之间的弹性、交通运输量与交通行业经济发展之间的弹性, 分别称为交通减排脱钩指标和交通发展脱钩指标。表达式为

$$e_{(EP,V)} = \frac{\Delta EP}{EP} \bigg/ \frac{\Delta V}{V} \quad (4)$$

$$e_{(V,DF)} = \frac{\Delta V}{V} \bigg/ \frac{\Delta DF}{DF} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} e_{(EP,DF)} &= e_{(EP,V)} \times e_{(V,DF)} \\ &= \frac{\Delta EP}{EP} \bigg/ \frac{\Delta V}{V} \times \frac{\Delta V}{V} \bigg/ \frac{\Delta DF}{DF} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $e_{(EP,V)}$ 表示交通碳排放量与交通运输量之间的脱钩弹性指标, $e_{(V,DF)}$ 表示交通运输量与交通行业经济发展之间的脱钩弹性指标。 V 为基期的交通运输量, ΔV 是末期与基期间的交通运输量变化, $\Delta V/V$ 则为末期到基期的交通运输量变化率。

根据脱钩弹性值的大小, Tapio 定义了 8 种脱钩状态^[26], 如表 1 所示。

表 1 脱钩状态

脱钩状态	变量指标			
	ΔEP	ΔDF	$e_{(EP,DF)}$	
强脱钩	< 0	> 0	$e_{(EP,DF)} < 0$	
脱钩	弱脱钩	> 0	> 0	$0 < e_{(EP,DF)} < 0.8$
衰退脱钩	< 0	< 0	$e_{(EP,DF)} > 1.2$	
连接	增长连接	> 0	> 0	$0.8 < e_{(EP,DF)} < 1.2$
	衰退连接	< 0	< 0	$0.8 < e_{(EP,DF)} < 1.2$
负脱钩	弱负脱钩	< 0	< 0	$0 < e_{(EP,DF)} < 0.8$
	扩张负脱钩	> 0	> 0	$e_{(EP,DF)} > 1.2$
	强负脱钩	> 0	< 0	$e_{(EP,DF)} < 0$

2.2 数据处理

对全国交通碳排放的计算采取“自下而上”为主、“自上而下”为辅的方法。其中, 对于铁路、航空和水运, 主要采用“自下而上”的方法, 缺少能耗数

据的年份采用总能源消耗直接与能源的碳排放系数相乘的“自上而下”的方法^[27]。水运分为内河和海洋分别计算^[28-29]。道路的交通碳排放组成较为复杂, 分为公路营运部门(公路班线客运企业和公路专业货运企业)、城市内部道路交通(公共交通、私人交通和新能源汽车的节能)和轨道交通, 均主要采用“自下而上”的计算方式。其中, 特别将私人汽车按《中国机动车污染防治年报》分为 8 种车型以及国一前至国五排放标准分类计算碳排放量^[30-31], 所使用的能源折标准煤系数如表 2 所示。

表 2 能源折标准煤系数

能源名称	折标准煤系数
原煤	0.7143 kg 标准煤/ kg
汽油	1.4714 kg 标准煤/ kg
煤油	1.4714 kg 标准煤/ kg
柴油	1.4571 kg 标准煤/ kg
电力	0.1229 kg 标准煤/kW·h

注: 能源折标准煤系数相关数据源自《中国能源统计年鉴》。

计算各省份交通碳排放时使用的各交通方式的能耗数据参照全国的数据, 缺失的能耗数据根据全国碳排放和交通运输量反推得到。

进行脱钩分析时采用的全国及各省份的交通行业生产总值使用国家统计局核算后的交通运输、仓储和邮政业数据(仓储和邮政业在交通运输、仓储和邮政业中所占比重较小可以忽略^[32-33])。

3 交通碳排放

基于以上方法与数据, 采用“自下而上”的交通碳排放计算方法统计全国及各省的铁路、航空、水运和道路的年度交通碳排放, 并分析 2000—2020 年中国交通碳排放的时空变化。

3.1 全国交通碳总排放的变化

如图 1 所示, 2000—2020 年中国交通碳排放总量从 23774.41 万 t 增长至 139051.47 万 t, 年均增长率达 9.23%。2000—2018 年交通碳排放持续增长, 其中 2004—2011 年为高速增长期, 年增长率在 10% 以上, 2008 年是增长率最高的 1 年, 达 27.73%, 2012 年以后增速开始放缓。交通碳排放峰值为

2018年的145301.59万t,随后受新冠肺炎疫情的影响,2019和2020年交通碳排放转增为降。

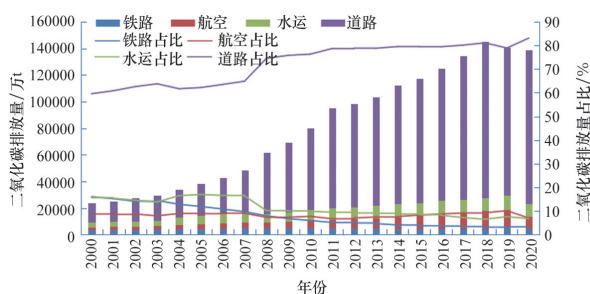


图1 2000—2020年中国交通碳排放总量及不同交通方式占比

分交通方式来看,全国铁路碳排放从2000年的3812.66万t增长至2008年的4931.16万t,随后波动下降至2020年的4330.72万t。同期铁路运输的总换算周转量增长超过1倍。除了2020年受新冠肺炎疫情影响外,2008年以后铁路碳排放的波动下降主要得益于铁路单位运输工作量综合能耗的大幅下降。

全国水运碳排放从2000年的3717.41万t快速增长至2019年的10753.50万t,2020年受新冠肺炎疫情影响大幅降至9426.84万t。2003—2011年水运碳排放增长速度较快,2011—2019年增速放缓,主要得益于沿海运输工作量综合能耗的快速降低。特别是,2008—2009年受次贷危机带来的进出口总额骤降的影响,远洋和沿海货物周转量大幅降低,水运碳排放也随之降低。从各交通方式碳排放占总交通碳排放比例来看,铁路和水运碳排放的占比出现较大幅度的减少,铁路和水运分别从2000年的16.04%和15.64%降至2020年的3.11%和6.78%(图1)。

全国航空碳排放从2000年的2083.64万t快速增长至2019年的14317.33万t,2020年受新冠肺炎疫情影响大幅降至9801.72万t。虽然航空煤油油耗有所下降,但2000—2019年航空运输总换算周转量增长超过10倍,带动航空碳排放总量持续增长。相对应地,航空交通碳排放的占比也有小幅增加,从2000年的8.76%增长至2019年的10.17%。

道路碳排放一直是中国交通碳排放的主要来

源。全国道路碳排放从2000年的14160.70万t持续快速增长至2020年的115492.20万t,其碳排放占比从2000年的59.56%增长至2020年的83.06%(图1)。道路碳排放的最大增长动力来源于私人汽车的碳排放,全国私人汽车保有量从2000年的不到1000万辆暴增至2020年的24240万辆。

总体来看,中国2000—2020年交通行业碳排放强度(即单位GDP交通碳排放量)存在“两下降两反弹”的总体特征(图2)。2000—2007年和2011—2019年为2段下降时期,得益于中国交通行业的绿色化、清洁化发展以及交通和能源结构的不断优化,中国交通行业碳排放强度分别从2000年的3.86 t/亿元下降至2007年的3.32 t/亿元、2011年的4.36 t/亿元下降至2019年的3.32 t/亿元;2007—2011年和2019—2020年为2段反弹时期,分别主要受到次贷危机和新冠肺炎疫情的影响。

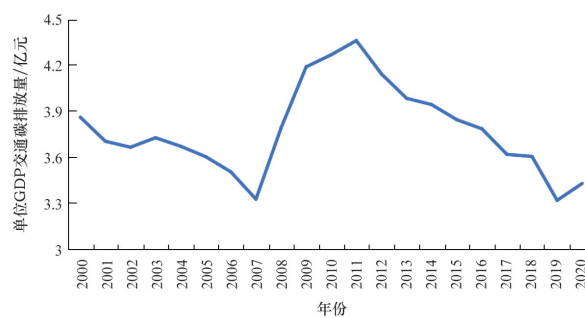


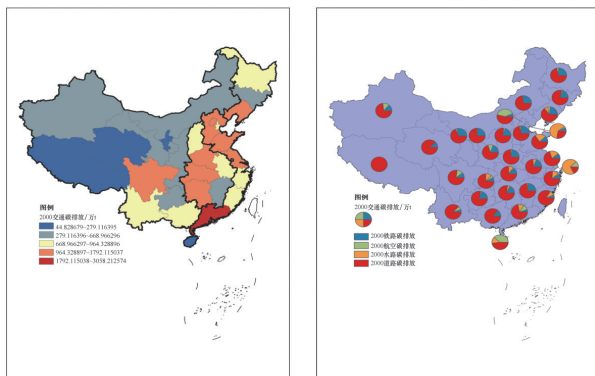
图2 2000—2020年中国单位GDP交通碳排放量

3.2 各省交通碳总排放的变化

2000年中国东部、中部、西部和东北4大地区的交通碳排放量的比值为46:22:23:9,存在较大的区域差异。东部地区的交通碳排放大部分来自于道路,同时铁路、航空和水路也占有较大的比重,而其他3个地区的交通碳排放几乎全部来自于道路和铁路。

如图3所示,2000年中国交通碳排放呈现出明显的自东部到中部再到西部的阶梯式递减的空间分异规律。东部地区除了海南省交通碳排放都较高,其中广东省以3058.21万t位居全国第1;中部地区省份的交通碳排放较为均衡;西部地区 and 东北地区分别只有四川省和辽宁省较高。绝大多数省

份的交通碳排放都是由道路和铁路主要组成,铁路占比基本不超过25%;沿海和长江干流流经的省份会有较高的水路碳排放量,上海市和天津市的水运碳排放占比超过50%;航空碳排放占比较高的省、直辖市有北京市和海南省。

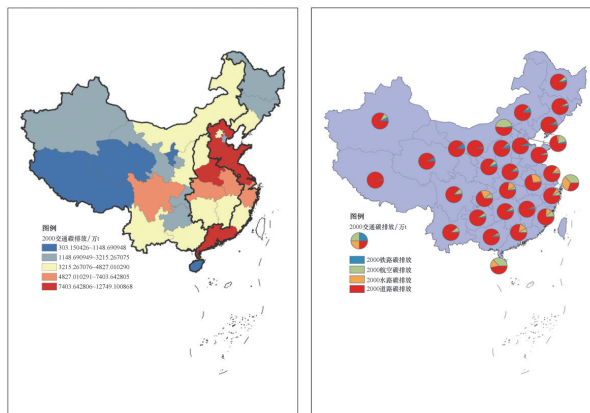


基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图边界无修改

图3 2000年中国各省交通碳排放总量及各交通方式占比

2020年中国东部、中部、西部和东北4大地区的交通碳排放量的比值为46:24:23:7,总体相比于2000年变化不大,仍存在较大的区域差异。东部地区的道路碳排放的占比大幅增加,航空碳排放超过水运位居第2;中部地区和西部地区水运和航空分别超过铁路成为碳排放占比第2大交通方式;东北地区除道路外的其他交通方式碳排放占比均极低。

如图4所示,2020年中国交通碳排放从东部到中部、西部的阶梯式递减的空间分异规律更加明显,并主要集中于环渤海、长三角和珠三角省份。东部地区广东、山东和河北省交通碳排放均超过1亿t;中部地区省份的交通碳排放较为均衡,其中河南省的交通碳排放较高,超过9000万t;西部地区和东北地区中仅四川省较高,其余均较低。绝大多数省份的交通碳排放主要都是道路,铁路占比均大幅下降;沿海和长江干流流经的省份会有较高的水路碳排放量,上海市和安徽省的水运碳排放占比超过25%;航空碳排放占比较高的省、直辖市有北京市、上海市和海南省。



基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图边界无修改

图4 2020年中国各省交通碳排放总量及各交通方式占比

4 交通碳排放脱钩分析

在分析2000—2020年中国交通碳排放的时空变化的基础上,使用Tapio脱钩模型进一步探究中国交通碳排放脱钩状态。

4.1 全国交通碳排放脱钩分析

根据交通碳排放和生产总值的逐年变化率,计算2000—2020各年份的Tapio脱钩指标,如图5所示。2001—2012年以增长连接状态为主,部分年份为弱脱钩或扩张负脱钩,表明中国在该时间段交通行业碳排放和经济发展未出现明显脱钩;2013—2020年以弱脱钩为主,部分年份为增长连接、强脱钩和弱负脱钩,表明中国在该时间段内交通行业碳排放和经济发展呈现出一定的脱钩趋势。

将交通碳排放与经济增长之间的脱钩弹性加入交通运输量的中间变量进行计算,得到各年份的脱钩状态。如图5所示,交通碳排放和运输量的脱钩状态以扩张负脱钩和增长连接为主,甚至有年份为强负脱钩,表明呈现出一定的负脱钩趋势,主要是因为单位运输量碳排放强度较高的道路和航空运输占比逐渐增加;交通运输量和生产总值的脱钩状态以弱脱钩为主,也有较多年份为强脱钩和增长连接,表明呈现出较明显的脱钩趋势,主要是随着交通行业运输效率的提高和溢出效应的增强,单位

运输量创造的GDP总体增加。综上所述,2000—2020年中国交通行业碳排放和经济发展之间呈现

了一定的脱钩趋势,其主要驱动因素是交通运输量和生产总值的脱钩。

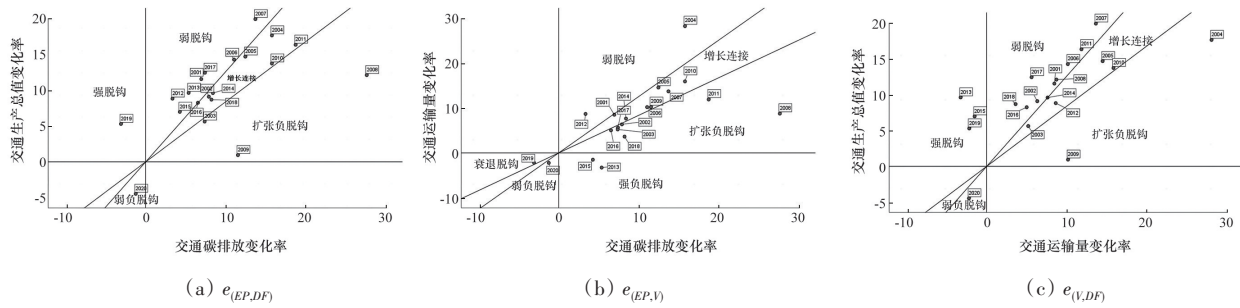
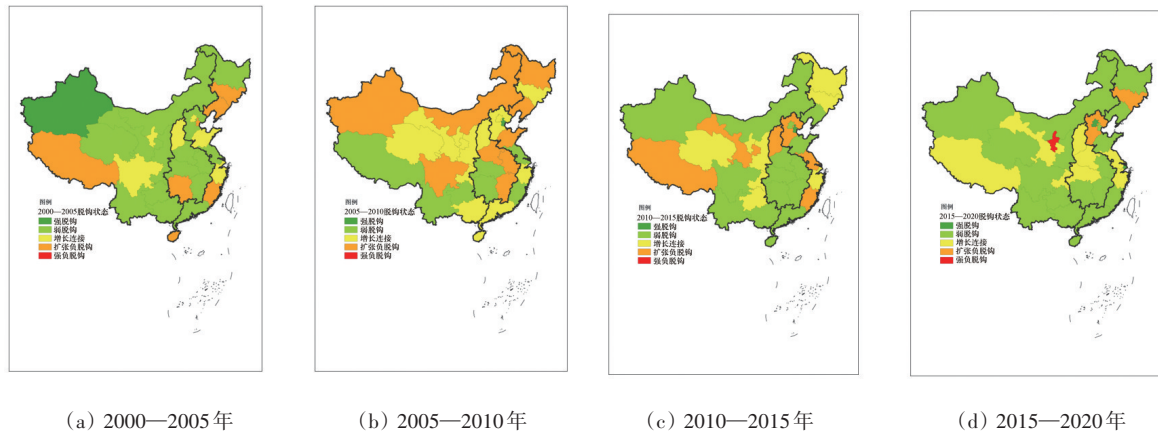


图5 全国2001—2020年交通碳排放、生产总值和运输量的脱钩状态

4.2 各省交通碳排放脱钩分析

为便于动态比较,将研究区间划分为4个时间段(2000—2005年、2005—2010年、2010—2015年、

2015—2020年),计算4个时间段各省的Tapio脱钩指标,得到其脱钩状态(图6)。



基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图边界无修改

图6 2000—2020年各省份脱钩状态

2000—2020年,31个省份交通碳排放与生产总值的关系经历了从弱脱钩到增长连接和扩张负脱钩,最后到弱脱钩的大致趋势。总体来看,各省份交通行业发展趋向于绿色低碳,能源利用效率得到提高。

分时间段来看,2000—2005年,大多数省份(51.61%)呈现弱脱钩的状态,脱钩:连接:负脱钩状态的省份数比值为17:7:7,交通行业发展对碳排放增长的促进作用有所减弱;2005—2010年,较

多省份从较好的状态退回到增长连接和扩张负脱钩状态,脱钩:连接:负脱钩状态的省份数比值为9:13:9,多数省份的交通行业处于较粗放的扩张方式;2010—2015年,脱钩:连接:负脱钩状态的省份数比值为16:8:7,总体交通发展与碳排放之间关系恢复到较合理的阶段;2015—2020年,大多数省份(58.06%)呈现弱脱钩的状态,脱钩:连接:负脱钩状态的省份数比值为20:8:3,全国交通碳排放与经济发展呈现良好的脱钩态势,北京市和上海市

甚至进入强脱钩状态。

5 结论

采用“自下而上”的交通碳排放计算方法统计全国及各省的铁路、航空、水运和道路的年度交通碳排放,分析2000—2020年中国交通碳排放的时空变化,并使用Tapio脱钩模型探究中国交通碳排放脱钩状态。主要得到以下结论。

1) 2000—2020年中国交通碳排放总量从23774.41万t增长至139051.47万t,年均增长率达9.23%。其中2004—2011年为高速增长期,2012年以后增速开始放缓。交通碳排放峰值为2018年的145301.59万t,随后受新冠肺炎疫情的影响,2019和2020年交通碳排放转增为降。

2) 2000—2020年,对比4种交通方式,道路碳排放一直是中国交通碳排放的主要来源,并且其占比从2000年的59.56%增长至2020年的83.06%,航空交通碳排放的占比也有所小幅增加,铁路和水运碳排放的占比则出现较大幅度的减少。

3) 2000—2020年中国东部、中部、西部和东北4大地区的交通碳排放量持续存在较大的区域差异,并呈现出明显的从东部到中部、西部的阶梯式递减的空间分异规律。道路一直是各地区交通碳排放占比最高的交通方式,铁路碳排放占比大幅下降,沿海和长江干流流经的省份有较高的水运碳排放量,航空碳排放占比较高的省、直辖市则主要有北京市、上海市和海南省。

4) 2000—2020年中国交通行业碳排放和经济发展呈现“相对脱钩”的总体态势。2001—2012年以增长连接状态为主,2013—2020年以弱脱钩为主。根据加入交通运输量作为中间变量进行因果分解,其驱动因素主要是交通运输量和交通行业GDP的脱钩。

5) 2000—2020年大多数省份的交通行业碳排放和经济发展呈现“相对脱钩”的总体态势。2000—2020年,31个省份交通碳排放与生产总值的关系经历了从弱脱钩到增长连接和扩张负脱钩,最后到弱脱钩的大致趋势。总体来看,各省份交通行业

发展方向趋向低碳,能源的利用效率不断提高。

首先,尽管本文综合考虑公共营运交通和私人交通工具,对全国及各省份各类型交通方式的碳排放的时空特征做了深入的探讨,但由于部分数据缺乏,有些因素未能充分纳入考虑,例如,水运的具体能耗^[34]、私人汽车的分车型能耗和年行驶里程等数据的误差都会对交通碳排放的计算产生一定影响。相信随着中国未来更全面的交通统计数据完善和出行调查的开展,可以对交通碳排放做到更加精确的计算和分析。

其次,随着可再生能源等在中国交通行业中的普及和绿色低碳交通政策的推进^[35-36],中国交通碳排放将呈现更多积极的新趋势,例如2020年中国新能源汽车保有量已达492万辆,虽然总量仍较少,但增长迅速且节能显著。这也是有待未来研究的重要方向。

最后,考虑到交通碳排放和交通运输量的脱钩状态仍以扩张负脱钩和增长连接为主,应积极调整能源结构和提高能源利用效率,同时需要调整和优化交通业的发展结构和方式,充分发挥各种运输方式的技术经济优势和功能,提高铁路、水路在综合运输中的承运比重,持续降低运输能耗和二氧化碳排放强度^[4]。

参考文献 (References)

- [1] IEA. CO₂ Emissions from fuel combustion[M]. Paris: International Energy Agency, 2015.
- [2] 中国科学院可持续发展战略研究组. 中国可持续发展报告:探索中国特色的低碳道路[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] IEA. Statistics on CO₂ Emissions from fuel combustion [EB/OL]. (2015-05-10) [2023-05-12]. <http://data.worldbank.org/indicator/EN.CO2.TRAN.MT>.
- [4] 中华人民共和国中央人民政府. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. (2021-09-22) [2023-05-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [5] 中华人民共和国中央人民政府. 2030年前碳达峰行动方案[EB/OL]. (2021-10-26) [2023-05-12]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.

- [6] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国绿色发展白皮书(全文)[EB/OL]. (2023-01-19)[2023-05-12]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1735706/1735706.htm>.
- [7] 周宏春. 中国低碳经济发展现状及展望[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 6-12.
- [8] 尹鹏, 段佩利, 陈才. 中国交通运输碳排放格局及其与经济增长的关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 7-12.
- [9] 谢守红, 蔡海亚, 夏刚祥. 中国交通运输业碳排放的测算及影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 13-18.
- [10] 刘新民, 孙璐, 孙秋霞. 中国及省域经济增长与交通碳排放的脱钩关系研究[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2016, 18(6): 47-54.
- [11] 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.
- [12] 范育洁, 曲建升, 张洪芬, 等. 西北五省区交通碳排放现状及影响因素研究[J]. 生态经济, 2019, 35(9): 32-37, 67.
- [13] 欧阳斌, 凤振华, 李忠奎, 等. 交通运输能耗与碳排放测算评价方法及应用: 以江苏省为例[J]. 软科学, 2015, 29(1): 139-144.
- [14] 张秀媛, 杨新苗, 闫琰. 城市交通能耗和碳排放统计测算方法研究[J]. 中国软科学, 2014(6): 142-150.
- [15] 王森. 中国交通运输部门低碳发展模式研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [16] 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.
- [17] 周银香. 交通碳排放与行业经济增长脱钩及耦合关系研究——基于Tapio脱钩模型和协整理论[J]. 经济问题探索, 2016(6): 41-48.
- [18] Loo Becky P Y, David B. Decoupling transport from economic growth: Extending the debate to include environmental and social externalities[J]. *Journal of Transport Geography*, 2016, 57: 134 - 144.
- [19] Loo P B, Tsoi H K, Banister D. Recent experiences and divergent pathways to transport decoupling[J]. *Journal of Transport Geography*, 2020, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2020.102826.
- [20] Tsoi K H, Loo B P Y, Baniste D. Mind the (Policy-Implementation) Gap: Transport decarbonisation policies and performances of leading global economies (1990—2018)[J]. *Global Environmental Change*, 2021, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2021.102250.
- [21] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel A V. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [J]. International Panel on Climate Change, 2006, doi: 10.1016/S1462-9011(99)00023-4.
- [22] 李琳娜, Loo Becky P Y. 中国客运交通的碳排放地理特征与展望[J]. 地理研究, 2016, 35(7): 1230-1242.
- [23] 蔡博峰, 曹东, 刘兰翠, 等. 中国交通二氧化碳排放研究[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(3): 197-203.
- [24] 孙耀华, 李忠民. 中国各省区经济发展与碳排放脱钩关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(5): 87-92.
- [25] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth[R]. Paris: OECD, 2002.
- [26] 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.
- [27] 铁道部统计中心. 铁路简明统计资料[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [28] 刘建翠. 中国交通运输部门节能潜力和碳排放预测[J]. 资源科学, 2011, 33(4): 640-646.
- [29] 王亚洁. 基于系统动力学的中国综合交通能耗情景分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [30] Loo Becky P Y, Li L. Carbon dioxide emissions from passenger transport in China since 1949: Implications for developing sustainable transport[J]. *Energy Policy*, 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.07.044.
- [31] 何立强. 中国机动车温室效应污染物排放清单及其削减潜力研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2014.
- [32] 张帅. 基于RAM模型的交通碳排放及经济效率测度研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [33] 黄羿, 李冬梅, 李永田, 等. 交通运输业碳排放的时空变化特征及影响因素——基于全国与经济区域层面[J]. 环境保护科学, 2021, 47(4): 62-70.
- [34] 彭传圣. 我国水运历史燃料消耗量分析[J]. 水运管理, 2022, 44(12): 1-3.
- [35] Li L, Loo Y P B. Alternative and transitional energy sources for urban transportation[J]. *Current Sustainable/ Renewable Energy Reports*, 2014, 1(1): 1-7.
- [36] Tsoi K H, Loo Becky P Y, Gil T, et al. Pioneers of electric mobility: Lessons about transport decarbonisation from two bay areas[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129866.

Research on the decoupling of China's transportation carbon emissions and economic development from 2000 to 2020

WANG Bo¹, WANG Hantao¹, FEI Da^{2*}

1. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

2. Institute of Comprehensive Transportation, Academy of Macroeconomic Research, NDRC, Beijing 100038, China

Abstract Study on the decoupling relationship between transport carbon emission and economic growth is of great practical significance for achieving the goals of carbon peaking and carbon neutrality. This paper mainly uses a "bottom-up" transportation carbon emission calculation method to calculate the annual transportation carbon emission of railways, aviation, water, and roads in China and various provinces. It analyzes the spatiotemporal changes of China's transportation carbon emission from 2000 to 2020, and uses the Tapio decoupling models to explore the decoupling status of China's transportation carbon emission. It is found that (1) From 2000 to 2020, the total carbon emission from China's transportation increased from 237.7441 million tons to 1390.5147 million tons. The period from 2004 to 2011 was a period of rapid growth, and the growth rate began to slow down after 2012; (2) From 2000 to 2020, road carbon emission was the main source of carbon emissions in China's transportation, with a slight increase in the proportion of carbon emission from air transportation and a significant decrease in the proportion of carbon emission from railways and waterways; (3) From 2000 to 2020, there were significant regional differences in transportation carbon emission in the four major regions of eastern, central, western, and northeastern China; (4) From 2000 to 2020, the carbon emissions and economic development of China's transportation industry showed an overall trend of "relative decoupling", with most provinces including Beijing and Shanghai achieving "decoupling".

Keywords transportation carbon emissions; decoupling analysis; Tapio decoupling model ●



(责任编辑 卫夏雯)