

基于STIRPAT拓展模型的交通运输业碳排放测算与情景预测

钱晓栋, 徐展, 李国梁, 陈丽, 王于勤

中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司, 杭州 浙江

收稿日期: 2022年11月28日; 录用日期: 2023年1月9日; 发布日期: 2023年1月18日

摘要

随着我国双碳目标的提出,对交通运输行业碳排放进行测算并制定科学合理的发展路径对提前实现碳达峰有至关重要的作用。本文使用“自顶向下”的方法对2001~2019年中国交通运输碳排放进行测算,通过建立扩展的STIRPAT模型,对影响碳排放的几个主要因素作回归分析,结果表明人口规模、人均GDP、单位周转能耗对碳排放有正向影响,清洁能源占比和第三产业占比对碳排放有负向影响。最后考虑未来社会经济发展情况,对人口规模、经济水平和技术条件分别作高速发展和低速发展的预测,分别计算8种情景下未来交通运输碳排放情况。结果表明不同情景下的碳排放存在差异,保持人口低速增长,经济稳定增长和技术条件稳步提升可能是最适合中国交通低碳发展的道路。

关键词

综合运输, STIRPAT模型, 岭回归, 碳排放, 情景分析

The Calculation and Scenario Prediction of Transportation Carbon Emissions in China Based on Extended STIRPAT Model

Xiaodong Qian, Zhan Xu, Guoliang Li, Li Chen, Yuqin Wang

China Energy Engineering Group Zhejiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Nov. 28th, 2022; accepted: Jan. 9th, 2023; published: Jan. 18th, 2023

Abstract

With the introduction of China's double carbon target, it is crucial to measure carbon emissions in

文章引用: 钱晓栋, 徐展, 李国梁, 陈丽, 王于勤. 基于 STIRPAT 拓展模型的交通运输业碳排放测算与情景预测[J]. 交通技术, 2023, 12(1): 25-36. DOI: 10.12677/ojtt.2023.121004

the transportation industry and formulate a scientific and reasonable development path to achieve the carbon peak ahead of schedule. This paper uses a “top-down” approach to measure China’s transportation carbon emissions from 2001 to 2019. By establishing an extended STIRPAT model, the regression analysis of several major factors affecting carbon emissions shows that population size, GDP per capita, and energy consumption per unit of turnover have a positive effect on carbon emissions, while the share of clean energy and the share of tertiary industry have a negative effect on carbon emissions. Finally, considering the future socio-economic development, high and low development speeds are made for population size, economic level and technological conditions, and future transportation carbon emissions are calculated under eight scenarios respectively. The results show that there are differences in carbon emissions under different scenarios, and that maintaining low population growth, stable economic growth and steady improvement of technological conditions may be the most suitable path for low-carbon transportation development in China.

Keywords

Integrated Transportation, STIRPAT Model, Ridge Regression, Carbon Emission, Scenario Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气候变化，尤其是全球气候升温是目前全人类面对的共同挑战。众所周知气候变化是由于人类活动引起的[1]。众多研究表明驱动全球气候升温的重要因素是温室气体的排放，这其中由人口增长、经济活动、社会发展等产生的 CO₂ 是温室气体的主要来源[2]。CO₂ 排放量的增加导致气候变暖加剧，世界范围内出现冰川加速消融、旱涝灾害频发、极端天气等现象[3][4]。气候持续升温给生态环境和社会经济带来不可修复的损失，当前人类经济社会的发展方式仍然属于高碳路径，因此未来全球升温的趋势会进一步延续[5]。交通领域是 CO₂ 排放增长最快的领域之一[6]。《美国国家科学院学报》上刊登的报告指出过去十年全球碳排放总量增加了 13%，来自交通工具的碳排放增长率超过 20%。在欧盟，大部分工业领域都已经完成减排，但交通工具碳排放在过去十年增加了 21% [7]。

改革开放以来，我国的经济取得了举世瞩目的成就，但资源环境背上了沉重的代价。西方发达国家的发展经验表明，经济发展、能源消耗与碳排放之间有密切的关系，经济的快速发展来自于能源的大量消耗，碳排放从而快速增加[8]。2006 年我国 CO₂ 排放超过美国，成为世界第一碳排放量大国[9]。2020 年 9 月，在第七十五届联合国大会上我国宣布将提高国家自主贡献力度，采取更有力的政策和措施，二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和[10]。

在中国，交通行业正处于快速发展与转型期[7]。从总量上看，2021 年我国碳排放量达到 105.23 亿吨，占世界二氧化碳排放量的 31%，而我国交通运输业碳排放约占我国碳排放总量的 10% [11]。作为国民经济发展重要的基础性、先导性、服务性行业，交通运输行业同时也是继工业之后二氧化碳的主要排放源，是国家节能减排的重要对象。因此，交通运输行业作为减排工作对我国实现“双碳”目标以及推进生态文明建设、加快发展方式绿色转型有着极其重要的影响。处理好经济增长与双碳目标之间的关系，既需要先进的碳减排技术又需要科学的政策支撑。因此，需要对中国交通运输业碳排放进行测算并分析其主要影响因素，探究时间变化规律，制定符合国情的发展路径以减少碳排放量，从而实现低碳目标。

2. 文献综述

针对交通运输业的能源消耗与碳排放问题,国内外众多学者通过不同的模型对交通运输业的能耗量与碳排放量进行测算。最广泛使用的碳排放核算方法是 IPCC 提供的碳排放系数法,其又可以分为“自顶向下(Top-Down Model)”和“自底向上(Bottom-Up Model)”两种计算方法。“自顶向下”法通过交通运输业各类能源的消耗量和碳排放系数来计算碳排放。Salvatore Saija 等[12]基于“自顶向下”法的思路测算了意大利道路运输的碳排放量。蔡博峰等[13]根据交通工具燃料消耗的统计数据运用“自顶向下”法计算了全国及各区域的道路运输业碳排量。薛进军[14]等通过基于各个部门的燃料消费量乘以各自的二氧化碳排放系数对各部门的碳排放进行测算,结果表明 1980~2007 年间中国交通运输部门的碳排放增加了 5 倍。刘妍慧[15]等人采用 IPCC 提供的“自顶向下”方法计算湖北省交通运输行业的碳排放总量,结果表明湖北省碳排放总量逐年上升,电力产生的总碳排放相较于其他能源增加缓慢。“自底向上”法则是通过将交通工具分类后分别预测其保有量,以每种交通工具的行驶路程为基础计算碳排放量。KebinHe [16]计算了 1997~2002 年中国道路运输的碳排放量。陈露露等[17]测算了 2005~2012 年江苏省各运输方式的碳排放量,并从单位生产总值下碳排放的角度计算分析了碳排放强度,结果表明碳排放强度在 2006~2009 年呈上升趋势,2009~2012 年期间呈现整体下降的态势。

对交通运输领域碳排放影响因素的分析,学者以往的研究表明,影响交通运输碳排放的主要因素有人口规模、人均 GDP、产业结构、交通运输结构、交通运输强度、能源结构、能源强度、技术水平等。通过考虑这些因素来计算碳排放量。Timilsina 等[18]研究发现人均 GDP 增长、人口规模扩大和交通能源强度增加是推动亚洲国家交通碳排放增长的主要因素。Kim [19]认为 1990~2013 年经济增长和人口增长对韩国交通行业碳排放起促进作用,交通能源强度则对碳排放起抑制作用。张国兴[20]等人的对黄河流域的交通运输碳排放进行影响因素分解,结果表明人均 GDP 和人口规模对碳排放起促进作用,交通运输强度、单位周转量能耗和交通能源强度对碳排放增长起抑制作用。张乐勤[21]等人的研究表明碳排放量与 GDP 增长率呈正相关,与碳排放强度呈负相关。刘妍慧[15]等的研究结果显示 2001~2019 年间,经济的不断发展是造成碳排放持续增加的主要原因;交通能源强度的改善会在很大程度上减少湖北省交通运输业碳排放,对碳排放总量有明显的负向影响,同时交通能源结构的变化也会对交通运输业碳排放产生影响。邓小乐[22]等人通过对中国西北五省区碳排放峰值预测,认为技术与财富对峰值的影响较为重要,可以通过增加人均 GDP 使碳排放峰值提前。

学术界对交通运输碳排放预测采用的方法主要有 LEAP 模型和 IPAT 模型衍生出的 IMPACT 模型和 STIRPAT 模型。另外,结合情景分析法,通过设定未来年影响因素的不同取值,实现对各情景下碳排放量的预测。洪竞科[23]等人使用 RICE-LEAP 模型并通过设置参考情景、碳排放约束情景和供给侧结构性改革情景,动态模拟了 2020~2050 年的中国碳达峰路径及全球气候变化趋势。常征和潘克西[24]的通过构建 LEAP-Shanghai 模型,在此基础上设计基准情景、减排情景、强化减排情景三个综合情景,模拟上海能源消费和碳排放趋势,并分析各自的情景贡献率。他们认为长期节能碳减排的关键在于合理控制经济发展增速,并依靠其他多种手段共同实现。Liu [25]等人建立扩展的 STIRPAT 模型,并设定 10 种场景,探究未来中国是否可以完成碳达峰的目标及是否存在库兹涅茨曲线。黄蕊[26]等人采用 STIRPAT 模型对江苏省能源消费碳排放趋势进行预测,结果表明当人口、经济保持低速增长,并保持高技术增长率时,有利于控制江苏省的能源消费碳排放量。张巍[27]基于 STIRPAT 模型构建西安市碳足迹的预测模型,结果表明保持人口和经济适度增长,降低碳足迹强度和优化产业结构,可以控制西安市碳足迹量过快增长。

通过上述分析可知,当前对交通运输碳排放的核算存在一定偏差,这是由于不同的文献对纳入交通运输业消耗的能源种类不同产生的,本文选取《中国统计年鉴》中交通运输终端能源消耗量占比较大的

7种能源采用“自顶向下”法进行测算。在选择影响影响因素时,本文除了将最广泛使用的人口规模和经济产出纳入模型外,还从中国未来的发展规划出发,使用清洁能源占比及单位周转能耗对STIRPAT模型的技术条件部分进行扩展,模型更具有实际意义。并根据人口规模、经济条件和技术水平的高低建立8种不同的情景,使用岭回归方法对未来年各情景下的交通运输碳排放预测,以期探究适合中国低碳交通发展的道路并为相关的政策决策提供科学支持。

3. 碳排放测算模型

3.1. 数据来源及处理

本文数据根据《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》中的统计数据及相关数据资料整理计算得到。国内的统计口径中将交通运输、仓储和邮政业归为一类,且由于仓储和邮政终端的能源消耗占比相对较少,故本文将此项数据直接作为交通运输业统计数据。交通运输业产生碳排放的一个主要原因来自于提供位移服务时消耗的化石能源。根据目前的统计数据,交通运输工具主要采用的能源类型包括柴油、汽油、煤油、燃料油、天然气、液化石油气和电力。随着科学技术水平的进步,原煤现在很少应用于交通运输终端。因此本文对交通运输业碳排放的测算建立在上述7种能源消耗量的基础上。

3.2. 碳排放测算模型

考虑数据的可获取性和后期碳排放预测模型的建立,本文采取IPCC提供的“自上而下”的方法计算中国交通运输行业的碳排放总量。自上而下法的原理是以能源消耗量乘以各类能源碳排放因子,累计得到碳排放总量。该方法是现阶段国际(IPCC)、国内(生态环境部)等权威机构计算交通碳排放的主要方法,广泛应用于公路、航空、水路、铁路等交通方式的碳排放计算,计算公式如(1)。

$$CO_2 = \sum_i EC_i \times F_i \times K_i = \sum_i EC_i \times F_i \times \left(ALV_i \times CV_i \times COF_i \times \frac{44}{12} \right) \quad (1)$$

式中, CO_2 为交通运输业碳排放总量, EC_i 为交通运输业第 i 种能源终端消耗实物量, F_i 为第 i 种能源折算成标准煤参考系数, K_i 为第 i 种能源折算标准煤碳排放系数, ALV_i 为第 i 种能源平均低位发热量, CV_i 为第 i 种能源单位热值含碳量, COF_i 为第 i 种能源碳氧化率。

表1给出了本文统计的7种能源的折煤系数、平均低位发热量等各种碳排放系数[6][28]。

Table 1. Carbon emission coefficients of various energy sources

表1. 各种能源碳排放系数

能源类型	折煤参考标准系数 (kgce/kg)	平均低位发热量 (KJ/kg)	单位热值含碳 (t 碳/TJ)	碳氢化率(%)	碳排放系数(kgCO ₂ /kg 或 kgCO ₂ /m ³ 或 kg/kwh)
原煤	0.7143	20,908	26.37	94	1.9003
汽油	1.4714	43,070	18.90	98	2.9251
煤油	1.4714	43,073	19.60	98	3.0334
柴油	1.4571	42,652	20.20	98	3.0959
燃料油	1.4286	41,816	21.10	98	3.1705
液化石油气	1.7143	50,179	17.20	98	3.1013
天然气	1.3300	38,931	15.32	99	2.1650
电力	0.1229	NULL	NULL	NULL	0.8010

3.3. 计算结果及分析

基于表 1 的碳排放系数和统计年鉴数据, 利用碳排放计算公式对中国 2001~2019 年的交通运输业碳排放进行测算, 得到各能源碳排放结果如下表 2。

根据表 2 和图 1 对各能源的碳排放量和总碳排放量进行分析, 可以发现总碳排放量不断增加, 2019 年的交通运输业碳排放已由 2001 年的 22132.74 万吨增加至 81682.11 万吨, 年均增长率为 7.52%。汽油、煤油和电力产生的碳排量快速增加, 且为主要的交通碳排放来源。传统的道路运输主要是客运以汽油作为燃料, 随着交通技术的不断进步和国家政策对清洁能源的鼓励, 公路中电动汽车的占比在逐渐增高[29], 汽油在未来的占比会逐渐降低。航空运输的燃料主要是煤油, 随着我国经济的快速发展和居民可支配收入的提高[30], 未来居民对出行效率的追求会使得航空运输量增加, 从而导致航空煤油消耗量增加。

柴油产生的碳排放增长缓慢, 出现下降趋势。由于我国对清洁能源的大力推广和技术水平的提高, 公路上采用柴油机的机动车占比已经较少, 目前柴油的消耗主要在于铁路货物机车的使用[28], 未来占比会进一步降低。现阶段天然气和液化石油气由于开采难度相对较大, 目前能源消耗较小, 碳排放量占比并不多。天然气具有绿色环保、经济实惠、安全可靠的特点, 随着我国对绿色交通的推进, 相信未来天然气在机动车清洁能源使用领域的普及率会越来越高。

Table 2. Carbon emissions by energy in the transport sector (unit: 10,000 tons)

表 2. 交通运输业各能源碳排放量(单位: 万吨)

年份	柴油	汽油	煤油	燃料油	天然气	液化石油气	电力	碳排放总量
2001	10591.07	4576.03	1700.83	2710.78	23.82	52.72	2477.49	22132.74
2002	11717.39	4851.28	2174.34	2701.58	35.51	88.70	2427.03	23995.83
2003	13730.94	5737.99	2249.87	2981.22	41.14	111.96	3260.07	28113.18
2004	17018.91	6828.65	2789.85	3647.50	56.72	111.34	3604.50	34057.46
2005	19099.85	7108.29	2889.01	3807.77	82.27	151.03	3446.70	36584.92
2006	20672.31	7583.03	3065.37	4805.21	95.69	169.64	3743.87	40135.13
2007	22722.05	7643.87	3427.74	5088.65	101.76	172.12	4261.32	43417.51
2008	24758.87	9039.82	3563.03	3623.25	155.88	175.84	4581.72	45898.41
2009	24742.31	8428.94	3986.65	3968.32	197.17	175.53	4942.25	46441.17
2010	26803.06	9579.41	4856.78	4206.30	231.01	189.18	5883.35	51749.08
2011	29365.23	10452.84	4994.19	4264.96	299.42	203.14	6795.68	56375.46
2012	33209.72	11051.03	5420.99	4387.65	334.49	211.20	7332.35	61947.44
2013	33808.87	12817.20	6061.28	4530.61	380.56	277.26	8017.37	65893.15
2014	34187.40	13645.59	6722.01	4569.96	464.18	284.70	8484.19	68358.04
2015	34558.91	15522.34	7598.36	4563.93	514.40	311.06	9019.26	72088.27
2016	34266.97	16120.52	8538.72	4791.89	551.64	323.16	10020.51	74613.41
2017	34592.66	16668.68	9625.89	5615.91	616.38	383.63	11358.18	78861.32
2018	34571.61	17748.34	10503.15	5693.27	619.62	387.97	12880.08	82404.03
2019	30547.25	18267.25	11190.21	6420.26	738.27	485.35	14033.52	81682.11

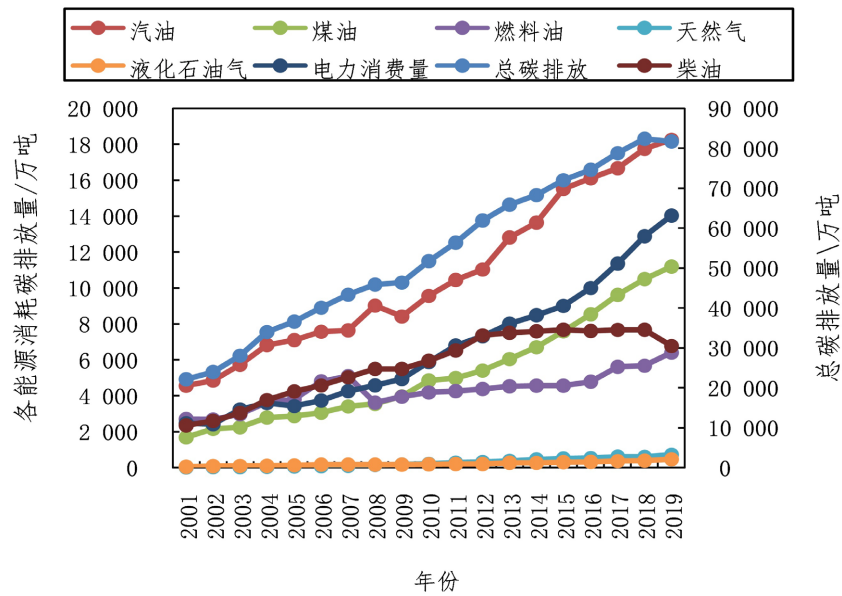


Figure 1. Carbon emissions from China's transport sector
图 1. 中国交通运输业碳排放量

4. 碳排放预测模型

4.1. 碳排放预测模型

4.1.1. 建立 STIRPAT 模型

STIRPAT 的初始模型为下式(2), 对其进行取对数操作, 可以得到式(3)的线性关系式。其中 I, P, A 和 T 分别代表碳排放量, 人口, 经济水平(即人均 GDP), 技术水平, e 代表残差。 a, b, c 分别代表 I, P, A 的弹性系数。本文考虑产业结构、清洁能源占比、单位周转能耗作为模型的自变量, 对原始模型进行扩展, 如式(4)。

$$I = \alpha P^a A^b T^c e$$

$$\ln I = \ln \alpha + a \ln P + b \ln A + c \ln T + \ln e$$

$$\ln I = \ln \alpha + a \ln P + b \ln A + c \ln ST + d \ln ET + f \ln PC + \ln e$$

式中, I, P, A 与 e 代表含义与初始模型一致, ST 代表产业结构(第三产业占比), ET 代表单位周转能耗(完成单位周转量消耗的能源), PC 代表清洁能源消耗占比(电力和天然气)。

4.1.2. 数据处理与结果分析

表 3 数据根据《中国统计年鉴 2021》和《中国能源统计年鉴 2021》搜集整理得到。

通过对表的初步分析可知, 2001~2019 年, 人口、人均 GDP、第三产业占比及清洁能源占比逐渐升高, 单位周转能耗逐渐降低。

利用 SPSS 软件采用进入法进行回归分析, 即纳入自变量框的变量均进入模型, 不涉及变量筛选问题, 得到结果如表 4 所示。

人口规模、经济水平以及技术条件等方面相互制约和影响, 三者同时存在可能导致时序数据产生多重共线性问题。通过 VIF 值(方差扩大因子)判断各变量之间是否存在多重共线性(图 1), 结果显示除清洁能源外, 人口、经济产出等四项变量的 VIF 值均远高于 10, 表明此时变量间存在多重共线性问题, 得到的结果并不可靠。

Table 3. Initial data of regression model explanatory variables**表 3.** 回归模型解释变量初始数据

年份	P (万人)	A (万元)	ST	ST (吨/万吨公里)	PC
2001 年	127,627	0.867	0.413	0.98	0.048
2002 年	128,453	0.945	0.423	0.98	0.043
2003 年	129,227	1.06	0.421	1.08	0.050
2004 年	129,988	1.24	0.412	1.12	0.046
2005 年	130,756	1.4259	0.414	1.06	0.042
2006 年	131,448	1.6602	0.419	1.01	0.041
2007 年	132,129	2.0337	0.429	0.91	0.043
2008 年	132,802	2.3912	0.429	0.86	0.046
2009 年	133,450	2.5963	0.444	0.86	0.050
2010 年	134,091	3.0567	0.442	0.84	0.053
2011 年	134,916	3.6018	0.443	0.78	0.058
2012 年	135,922	3.9544	0.455	0.79	0.057
2013 年	136,726	4.332	0.469	0.77	0.059
2014 年	137,646	4.6629	0.481	0.73	0.061
2015 年	138,326	4.9922	0.508	0.72	0.062
2016 年	139,232	5.3783	0.524	0.68	0.067
2017 年	140,011	5.9592	0.527	0.64	0.072
2018 年	140,541	6.5534	0.533	0.61	0.077
2019 年	141,008	7.0892	0.543	0.57	0.087

a. 因变量: CO₂。

Table 4. Model coefficients**表 4.** 模型系数

模型	非标准化系数		标准系数		t	Sig.	共线统计量	
	B	标准误差	试用版				容差	VIF
(常量)	-0.158	0.061			-2.580	0.027		
P	0.877	0.289	0.862		3.030	0.013	0.002	465.090
A	0.497	0.239	0.538		2.079	0.064	0.003	385.738
ST	-0.187	0.103	-0.182		-1.809	0.101	0.017	57.954
ET	0.233	0.074	0.230		3.126	0.011	0.032	31.174
PC	-0.041	0.023	-0.041		-1.825	0.098	0.343	2.912

a. 因变量: CO₂。

为解决上述问题, 本文使用 python 的机器学习包 sklearn 中的 linear_model 模块进行岭回归。使用 RidgeCV 方法训练模型, 会自动采用留一化交叉验证选择最优模型, 最大限度的利用小样本数据, 使得模型训练效果更好。通过多次调整正则化系数 α , 避免模型出现过拟合和欠拟合的情况, 确定正则化系

数为 0.1，模型的 Loss = 0.0002，训练 $R^2 = 0.998$ 。由于数据是经过标准化处理后训练的模型，最终得到标准化回归模型如下。

$$\ln I = 0.283\widehat{\ln P} + 0.274\widehat{\ln A} - 0.037\widehat{\ln ST} + 0.096\widehat{\ln ET} - 0.038\widehat{\ln PC} + 10.811$$

根据上式可以得出：交通运输业碳排放与人口总量、人均 GDP、单位周转能耗存在正相关关系，与第三产业占比和清洁能源占比存在负相关关系。各项系数均符合其经济意义，但影响程度存在显著差。人口、人均 GDP、第三产业占比、单位周转能耗及清洁能源占比分别变化 1%时，交通运输碳排放分别产生 0.283%、0.274%、0.037%、0.096%、0.038%的变化。

4.2. 情景设计

本文根据中国的社会经济现状、交通能源消费现状及政府对未来的规划，同时参考国外经济的发展历程及政策制定，结合国内文献对未来情景的分析，根据 STIRPAT 模型中人口规模、经济水平及技术条件的高低，设计了 8 种碳排放情景。在各情景下对未来年的碳排放量进行预测，8 种情景如表 5 所示。

Table 5. Scenario setting of transport carbon emissions
表 5. 交通运输业碳排放情景设置

情景方案	人口规模	经济水平	技术条件
情景 1	低	低	低
情景 2	高	低	低
情景 3	高	高	低
情景 4	高	高	高
情景 5	低	低	高
情景 6	低	高	高
情景 7	低	高	低
情景 8	高	低	高

情景模型中的主要参数参考国家政策、往年历史数据、以往学者的研究资料以及笔者本人推算确定。

人口规模。根据国家统计局数据显示，近 20 年内人口自然增长率持续下降。特别是近 5 年(2017~2022)内由 0.558%下降至 0.034%。同时，近些年来我国人口老龄化规模越来越大。本研究参考张现苓等[31]的观点，结合中国目前经济社会发展情况，将人口自然增长率按水平高低设定如下表 6 所示。人均 GDP。往年人均 GDP 增长率由中国统计年鉴数据整理计算得到，近 10 年在 5%~6%之间波动。自 2012 年以来，我国的经济发展模式逐渐从“高速度”向“高质量”转变，伴随着经济结构调整和产业升级，短期内增长速度不会变大。参考发达国家发展经验，经济增长速度会随着经济的发展呈现下降趋势，未来将会保持较低的增长速度[32]。第三产业占比。胡鞍钢[33]认为第三产业在 2030 年将会超过 60%；根据 Liu [25]等人的预测数据，第三产业占比在 2050 年仍不会突破 60%。根据国家统计局的历史数据计算，2001~2020 年第三产业占比年均增长率为 1.4%。参考国外发达国家的第三产业占比，我国第三产业仍存在一定的发展空间。单位周转能耗。根据张国兴等人[20]的观点，单位周转能耗随着节能减排会达到边际效应，此后下降速度会出现衰减。参考其设定的参数，对各时期的单位周转能耗进行设定。清洁能源占比。根据罗仕华等人[34]对中国 2060 碳中和能源系统转型路径的研究，他们认为在碳中和的目标下，非化石能源将在 2030 年占比达到 18%，在 2060 年占比达到 95.98%。由电力规划设计总院发布的《中国能源发展报告》

[35]显示, 2021 年我国清洁能源比重同比提高 0.8%, 清洁能源消费比重比上年提高 1.2%, 非化石能源消费和生产比重均提高 0.7%。参考以上观点, 对未来年清洁能源占比做出预测。

综上所述, 预测年 8 种情景对应的相关参数增长速率如表 6 所示。

Table 6. Set growth rates of each explanatory variable in the forecast year

表 6. 预测年各解释变量设定增长率

变量	情景设置	2020~2030	2030~2040	2040~2050	2050~2060
人口	低	0.023%	0.004%	-0.014%	-0.026%
	高	0.034%	0.017%	0.006%	-0.012%
人均 GDP	低	3.270%	2.840%	1.780%	0.920%
	高	4.010%	3.360%	2.330%	1.420%
第三产业占比	低	1.050%	0.780%	0.340%	0.230%
	高	1.270%	1.040%	0.710%	0.320%
单位周转能耗	低	-1.240%	-0.710%	-0.480%	-0.270%
	高	-1.770%	-1.320%	-0.910%	-0.510%
清洁能源占比	高	3.920%	4.840%	5.310%	4.010%
	低	4.380%	5.020%	5.670%	4.320%

4.3. 预测结果及分析

根据上表设定的各解释变量增长率, 以 2019 年为基准年对各变量进行预测, 并将预测结果带入回归模型计算, 得到如图 2 所示结果。

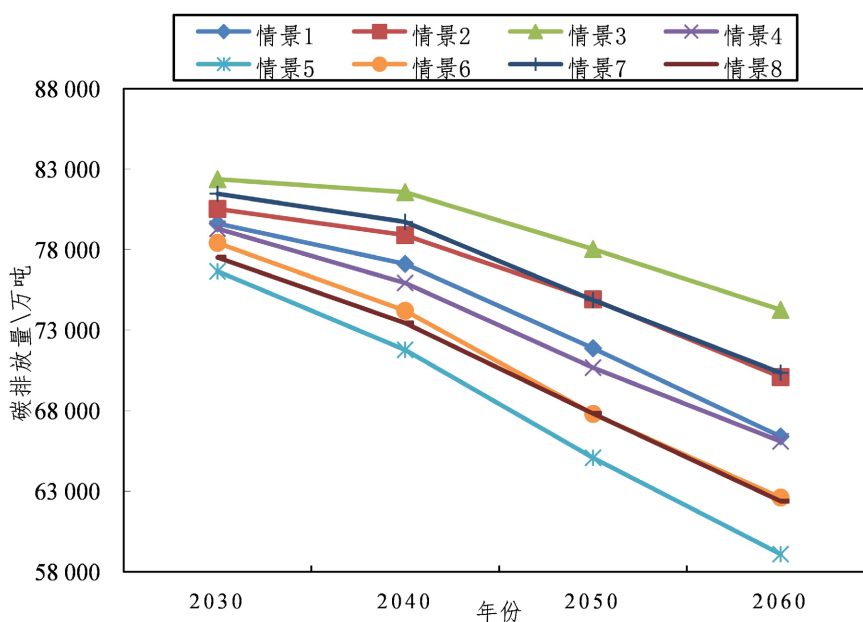


Figure 2. Predicts transport carbon emissions in each scenario

图 2. 预测年各情景交通运输碳排放

从图中可知, 8 种情景下的碳排放量均在 2030 年或之前达到峰值。8 种情景碳排放量由高到低排序为: 情景 3 > 情景 7 > 情景 8 > 情景 1 > 情景 4 > 情景 6 > 情景 8 > 情景 5。情景 3 中人口规模和经济水平均为高速发展, 技术条件为低水平发展, 因此其碳排放量最高, 在 2030 年达 82378.25 万吨。情景 4 相较于情景 3 技术条件由低水平变为高水平, 碳排放量在 2030 年为 79305.20 万吨, 相比减少 3073.05 万吨。情景 7 和 8 比较, 情景 7 的碳排放大于情景 8, 但两者差距逐渐缩小, 在 2050 年之后, 两者几乎相等。原因在于情景 7 技术条件较低, 随着时间推移, 技术条件可以较容易的抵消掉较低的人口规模增加的碳排放。而情景 8 中尽管技术水平为高, 但是到 2050 年之后增长速率也逐渐降低, 此时人口基数仍然比较大, 所以相较于情景 7 并没有大幅度降低碳排放。情景 1、5 和 6 的人口规模均为低水平, 由之前的回归方程可知, 人口规模对碳排放的影响较大, 所以这 3 种情景的碳排放量均较低。情景 5 在 8 个情景中碳排放量最低, 碳峰值为 7667.71 万吨。原因在于其低水平的人口及经济, 高水平的技术条件。这种情况在现实中很难达到, 因为技术水平跟国家的发展有密切关系。相较于情景 5, 情景 6 (碳峰值为 78431.61 万吨)建立在区域经济稳定增长, 人口规模较低、较高的技术水平条件上, 通过产业结构调整、优化运输结构和提交通情景能源占比等手段降低交通运输碳排放的发展模式应该是最适合中国未来碳达峰的方式。

5. 结论与建议

本文使用“自上而下”法对 2001~2019 年的交通运输业碳排放进行测算, 建立了扩展 STIRPAT 的模型, 使用岭回归方法考察了人口规模、人均 GDP、第三产业占比、单位周转能耗及情景能源占比对碳排放的影响。并在此基础上预测人口规模、经济产出和技术水平的发展速率, 设定了 8 种情景, 探究预测年各情境下的交通运输碳排放趋势, 最终得到结论如下:

1) 汽油、柴油、煤油在中国交通运输碳排放中占比仍然较高, 电力产生的碳排放近些年快速增加, 天然气和液化石油气能源消耗量占比较小。

2) 人口规模、人均 GDP、单位周转能耗对碳排放起促进作用, 第三产业占比和情景能源占比对碳排放起抑制作用。各因素对碳排放的影响由大到小排序为: 人口规模 > 人均 GDP > 单位周转能耗 > 清洁能源占比 > 第三产业占比。

3) 不同情景下均可以在 2030 年完成“碳达峰”的目标, 但是碳排放量有差异。保持人口低速增长, 经济水平稳定增长和高水平技术条件可能最符合中国未来低碳发展路径。

我国在 2020 年的第七十五届联合国大会上宣布要采取更加有力的政策和措施争取 2030 年前二氧化碳排放达到峰值, 2060 年前实现碳中和。考虑到我国社会经济发展实际情况和政府制定的目标, 结合本文的研究结论, 得到可行的政策启示如下:

1) 构建绿色交通运输服务体系, 加快运输结构调整, 降低单位周转量能耗。推进大宗货物“公转铁”、“公转水”、“铁水联运”等, 提升集装箱运输的货物周转量比例, 应用大数据、云计算、人工智能能技术优化多式联运结构的设计, 实现成本与效率的均衡。发展智能交通, 推动不同运输方式合理分工、有效衔接, 降低空载率和不合理客货运周转量。推进现代物流业发展, 推动物流运输智能化、精细化、集约化、协同化、绿色化。

2) 推动运输工具装备低碳装修, 提高清洁能源占比。积极扩大电力、氢能、天然气、先进生物液体燃料等新能源、清洁能源在交通运输领域应用。大力推广新能源汽车, 逐步降低传统燃油汽车在新车产销和汽车保有量中的占比, 推动城市公共服务车辆电动化替代, 推广电力、氢燃料、液化天然气动力重型货运车辆。提升铁路系统电气化水平。加快老旧船舶更新改造, 发展电动、液化天然气动力船舶, 深入推进船舶靠港使用岸电, 因地制宜开展沿海、内河绿色智能船舶示范应用。提升机场运行电动化智能

化水平, 发展新能源航空器。

加快产业结构调整, 实现碳排放空间经济效用最大化。根据十九大和二十大的报告, 中国未来要着力提高全要素生产率, 着力提升产业链供应链韧性和安全水平, 构建高水平社会主义市场经济体制, 促进经济高质量发展。加快推动产业结构优化升级和高耗能行业的改革, 注重发展战略性新兴产业和高新技术产业(如先进制造业), 加快低端传统制造业转型速度, 从而减少货运交通低附加值需求。

参考文献

- [1] Gasbarro, F., Iraldo, F. and Daddi, T. (2017) The Drivers of Multinational Enterprises' Climate Change Strategies: A Quantitative Study on Climate-Related Risks and Opportunities. *Journal of Cleaner Production*, **160**, 8-26. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.018>
- [2] Bong, C.P.C., Lim, L.Y., Ho, W.S., et al. (2017) A Review on the Global Warming Potential of Cleaner Composting and Mitigation Strategies. *Journal of Cleaner Production*, **146**, 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.066>
- [3] Schleussner, C.-F., Lissner, T.K., Fischer, E.M., et al. (2016) Differential Climate Impacts for Policy-Relevant Limits to Global Warming: The Case of 1.5°C and 2°C. *Earth System Dynamics*, **7**, 327-351. <https://doi.org/10.5194/esd-7-327-2016>
- [4] 黄建平, 陈文, 温之平, 等. 新中国成立 70 年以来的中国大气科学研究: 气候与气候变化篇[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(10): 1607-1640.
- [5] Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K.V., et al. (2018) Scenarios towards Limiting Global Mean Temperature Increase below 1.5°C. *Nature Climate Change*, **8**, 325-332. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0091-3>
- [6] 沙爱敏, 陈婷, 吕凡任, 王晓东. “双碳”目标下扬州交通碳排放量测算及分析[J]. 绿色科技, 2022, 24(15): 276-280. <https://doi.org/10.16663/j.cnki.lskj.2022.15.014>
- [7] 杨琦, 朱容辉, 赵小强. 中国交通运输业的碳排放情景预测模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(5): 77-83. <https://doi.org/10.19721/j.cnki.1671-8879.2014.05.012>
- [8] 卢娜, 曲福田, 冯淑怡, 邵雪兰. 基于 STIRPAT 模型的能源消费碳足迹变化及影响因素——以江苏省苏锡常地区为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 814-824.
- [9] 岳超, 王少鹏, 朱江玲, 方精云. 2050 年中国碳排放量的情景预测——碳排放与社会发展 IV [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(4): 517-524. <https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2010.076>
- [10] 史丹, 李鹏. “双碳”目标下工业碳排放结构模拟与政策冲击[J]. 改革, 2021(12): 30-44.
- [11] 加快形成绿色低碳运输方式[EB/OL]. 中国政府网. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/14/content_5668085.htm, 2022-11-02.
- [12] Saija, S. and Romano, D. (2002) A Methodology for the Estimation of Road Transport Air Emissions in Urban Areas of Italy. *Atmospheric Environment*, **36**, 5377-5383. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00488-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00488-0)
- [13] 蔡博峰, 曹东, 刘兰翠, 等. 中国道路交通二氧化碳排放研究[J]. 中国能源, 2011, 33(4): 26-30.
- [14] 薛进军, 赵忠秀, 戴彦德, 等. 中国低碳经济发展报告(2011) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2011.
- [15] 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. <https://doi.org/10.13546/j.cnki.tjyj.2022.15.016>
- [16] He, K., Huo, H., Zhang, Q., et al. (2005) Oil Consumption and CO₂ Emissions in China's Road Transport: Current Status, Future Trends, and Policy Implications. *Energy Policy*, **33**, 1499-1507. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.01.007>
- [17] 陈露露, 赵小风, 赖力. 江苏省交通运输业碳排放预测及减排情景分析研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(10): 13-17.
- [18] Timilsina, G.R. and Shrestha, A. (2009) Factors Affecting Transport Sector CO₂ Emissions Growth in Latin American and Caribbean Countries: An LMDI Decomposition Analysis. *International Journal of Energy Research*, **33**, 396-414. <https://doi.org/10.1002/er.1486>
- [19] Kim, S. (2019) Decomposition Analysis of Greenhouse Gas Emissions in Korea's Transportation Sector. *Sustainability*, **11**, Article No. 1986. <https://doi.org/10.3390/su11071986>
- [20] 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. <https://doi.org/10.14120/j.cnki.cn11-5057/f.2020.12.022>

- [21] 张乐勤, 陈素平, 荣慧芳, 许信旺. 基于 IPAT 模型的安徽省不同情景碳排放趋势测度分析[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(2): 60-64+93.
- [22] 邓小乐, 孙慧. 基于 STIRPAT 模型的西北五省区碳排放峰值预测研究[J]. 生态经济, 2016, 32(9): 36-41.
- [23] 洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于 RICE-LEAP 模型[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 639-651.
- [24] 常征, 潘克西. 基于 LEAP 模型的上海长期能源消耗及碳排放分析[J]. 当代财经, 2014(1): 98-106.
<https://doi.org/10.13676/j.cnki.cn36-1030/f.2014.01.001>
- [25] Liu, D. and Xiao, B. (2018) Can China Achieve Its Carbon Emission Peaking? A Scenario Analysis Based on STIRPAT and System Dynamics Model. *Ecological Indicators*, **93**, 647-657.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.049>
- [26] 黄蕊, 王铮, 丁冠群, 等. 基于 STIRPAT 模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 781-789.
- [27] 张巍. 基于 STIRPAT 模型的西安市碳足迹预测和情景分析[J]. 生态经济, 2021, 37(4): 25-29.
- [28] 侯晨. 基于系统动力学的湖北省交通运输业碳排放仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [29] 彭天铎, 袁志逸, 任磊, 欧训民. 中国碳中和目标下交通部门低碳发展路径研究[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(4): 351-359.
- [30] 许宪春, 唐雅, 靖骐亦. 2021 年中国经济形势分析与 2022 年展望[J]. 经济学动态, 2022(2): 3-17.
- [31] 张现苓, 翟振武, 陶涛. 中国人口负增长: 现状、未来与特征[J]. 人口研究, 2020, 44(3): 3-20.
- [32] 国务院发展研究中心“国际经济格局变化和中国战略选择”课题组, 李伟, 隆国强, 等. 未来 15 年国际经济格局变化和中国战略选择[J]. 管理世界, 2018, 34(12): 1-12. <https://doi.org/10.19744/j.cnki.11-1235/f.2018.0028>
- [33] 胡鞍钢. 中国经济发展大趋势[J]. 人民论坛, 2017(14): 16-19. <https://doi.org/10.16619/j.cnki.rmlt.2017.14.005>
- [34] 罗仕华, 胡维昊, 刘雯, 等. 中国 2060 碳中和能源系统转型路径研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2022: 1-22.
- [35] 电力规划设计总院. 《中国能源发展报告 2022》: 我国能源绿色低碳转型加快推进[J]. 经济导刊, 2022(7): 6.