

北京市交通碳排放的 驱动因素分析

——基于城市发展视角

孙岩 张昱 刘学敏

摘要 城市交通与城市存在耦合发展的特征，城市发展带动交通需求增长并产生大量的交通碳排放，深入理解城市发展对交通碳排放的驱动机制是实现城市交通和城市协同低碳发展的重要前提。作者首先利用油品分摊法估算了1995—2016年北京市交通碳排放量，随后基于城市发展对交通碳排放驱动机制的理解，利用城市异速标度律探析城市规模与交通碳排放的关系，利用STRIPAT模型分析城市发展对交通碳排放的综合驱动作用。结果显示，北京市交通碳排放总量持续增长，增速高于城市规模扩张速度，呈超线性关系；人口规模、城市化进程、经济规模、产业结构、空间规模、交通基础设施建设都正向驱动交通碳排放增长，能源技术进步抑制交通碳排放增长；城市化进程推进的影响最为显著、经济规模的贡献度最大。根据分析结果提出北京市交通低碳发展的建议：在城市化进程中提高交通效率，在经济发展中加大节能减排力度、尽早实现脱钩发展，遏制城市无序蔓延、转变交通基础设施供给理念，大力发展能源技术、提高能源效率。

关键词 城市交通 城市发展 碳排放 STRIPAT模型 北京

[中图分类号] U12 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X(2020)01-0081-15

城市交通是指城市内人口和资源要素因生产生活等目的移动和配置而产生的、需要借助某种交通方式完成的空间位置变化。城市交通与城市存在耦合发展的特征，呈现出基本同步的、“从初级向高级”的阶段特征，且目前均处于突破转型、寻求可持续发展的阶段（金雪涛，2010；胡晓健，2014；王卫，2016）。随着城市化进程加

【基金项目】 国家社会科学基金重大项目“我国低碳城市建设评价指标体系研究”（批准号：15ZDA055）。

【作者简介】 孙岩（1996-），北京师范大学地理科学学部硕士研究生；张昱（1990-），北京师范大学地理科学学部博士研究生；刘学敏（1963-），北京师范大学资源经济与政策研究中心主任，北京师范大学地理科学学部教授、博士生导师，本文通讯作者，邮政编码：100875。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

快,人口、经济和空间等要素的规模扩大和结构复杂化,城市发展派生出巨大的交通需求、消耗能源,进而产生了大量的碳排放(满洲等,2018;荣培君等,2018)。北京市是中国重要的超大城市,是区域人流和物流的集中地。根据《2019北京市交通发展年度报告》,北京市机动车保有量达到608.4万辆,中心城日出行3924万人次(含步行),年客运量77.8亿人次。北京市城市交通的特点主要表现为交通需求增长潜力大,高机动化、高油品依赖、高碳排放,交通服务水平有待进一步提高(Wang et al., 2015; Yuan et al., 2019)。北京市作为“低碳城市试点”和“低碳交通运输体系建设城市试点”,深入理解其城市发展对交通碳排放的驱动因素和机制,对于实现城市交通系统节能减排和低碳城市建设是十分必要的。

城市交通碳排放的驱动因素分析主要是探索或验证人口、经济等因素与碳排放的相关或因果关系,一般先从理论上分析对交通碳排放具有影响的可能因素并筛选表征指标,而后利用定量分析方法在统计上检验影响的显著性、识别发挥主要影响作用的因素、确定影响方向和影响强度(一般为相对强度)等。常见的理论模型有IPAT模型及其扩展模型、Kaya恒等式及其扩展、脱钩模型等。Delgado和Rosa(2017)、王泳璇等(2017)利用STIRPAT模型开展城市交通碳排放驱动分析。常见的统计模型,除基础统计包含的相关和回归分析外,主要是因素分解法、计量经济模型。例如,Fan和Lei(2016)、宋梅和郝旭光(2018)、Guo和Meng(2019)应用LMDI方法开展研究工作。虽然分析城市交通碳排放影响因素的研究成果已经比较丰富,但由于城市交通处于复杂的城市系统内,因素众多且彼此联系,过于全面而缺少针对性的影响因素分析往往只能得到宽泛、普适性的结论。因此,应在已有研究的基础上进行重点深入,基于对城市交通和城市耦合发展的理解,从城市发展视角分析交通碳排放驱动机制、探索驱动因素。

本文以北京市为研究区域,选取城市规模扩张和结构演进两个维度的变量来描摹城市发展,利用STIRPAT模型和城市异速标度律,基于城市发展视角分析交通碳排放的驱动因素,结合研究结果与北京市实际情况讨论交通低碳发展思路。

一、北京市交通碳排放估算和特征

(一) 北京市交通碳排放估算

本文将北京市交通碳排放估算范围界定为:由城市交通直接产生的能源消耗而引起的碳排放,包含交通营运部门和非营运部门(社会其他部门及私人车辆),不包含交通工具制造、交通建筑性基础设施等消耗能源引起的间接碳排放。

在碳排放核算的方法中,相较于质量平衡法和实测法,排放因子法数据易得、接受度广,可以应用于城市交通碳排放估算,公式(1)如下:

$$C = \sum_i^n (E_i \times EF_i) \quad (1)$$

式中, C 为二氧化碳排放量, 单位为 kg ; E_i 为能源活动水平数据, 即与二氧化碳排放直接相关的 i 类能源的消耗水平; 对于城市交通部门, i 指汽油、柴油、天然气、电力及液化石油气, 数据主要来自《中国能源年鉴》中的地区能源平衡表。 EF_i 为排放因子, 即单位 i 类能源使用量所释放的二氧化碳量。排放因子可以利用公式(2)计算:

$$EF_i = Q_i \times CQ_i \times a_i \times h \quad (2)$$

式中, Q_i 是燃料 i 低位热值, 单位为 $\text{kJ}/\text{燃料 } i \text{ 单位}$, 固体和液体燃料单位为 kg , 气体燃料单位为 m^3 ; a_i 是燃料 i 的碳氧化率。 CQ_i 是燃料 i 的单位热值燃料所含碳元素的质量, 单位为 kg/GJ 。 h 是二氧化碳与碳的分子量之比, 即 $44/12$ 。

城市交通部门能源排放因子如表 1 所示。

表 1 城市交通部门能源排放因子

一次能源排放因子				
能源名称	低位发热值	单位热值含碳量	燃料碳氧化率	排放因子
汽油	43 070 kJ/kg^a	18.90 kg/GJ^c	98% ^c	2.925 kg/kg
柴油	42 652 kJ/kg^a	20.20 kg/GJ^c	98% ^c	3.096 kg/kg
液化石油气	50 179 kJ/kg^a	17.20 kg/GJ^c	98% ^c	3.101 kg/kg
天然气	35 544 kJ/m^3^b	15.30 kg/GJ^c	99% ^c	1.977 kg/m^3
二次能源排放因子				
电力	1995—2005 年 ^c			1.246 $\text{kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$
	2006—2010 年 ^d			0.8845 $\text{kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$
	2011 年 ^d			0.8967 $\text{kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$
	2012—2014 年 ^d			0.8843 $\text{kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$
	2015—2017 年 ^e			0.6101 $\text{kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$

资料来源: a 表示来自《中国能源统计年鉴 2017》; b 表示天然气取自中华人民共和国国家标准《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008) 中气田天然气发热值, 电力碳排放因子 2005 年前年份按 2005 年计; c 表示来自《省级温室气体清单编制指南(试行)》; d 表示 2010 年、2011 年、2012 年为国家气候中心公布, 2006—2010 年按 2010 年计, 2012—2014 年按 2012 年计; e 表示来自《国家发展改革委办公厅关于做好 2016、2017 年度碳排放报告与核查及排放监测计划制定工作的通知》。

根据研究需要及数据可获取性, 本文选择城市能源平衡表中“交通运输, 仓储和邮政业”各类能源消耗数据作为基础数据。需要注意的是, 目前我国能源统计体系中, 交通能源只统计运营车辆, 未统计社会其他部门及私人车辆的消耗, 导致能耗数据和由此估算的碳排放是被低估的。同时, 交通建筑性基础设施的采光、冬暖、调度设备等, 应归属建筑业能源消耗。采用“油品分摊法”对城市交通能源消耗数据进行调整, 具体调整方案参考国家发展和改革委员会能源研究所的调研结果, 如表 2 所示。

表2 交通能源消耗数据统计调整方案

平衡表调整前所属行业	汽油	柴油	液化石油气	天然气	电力	调整后所属行业
农业	99%	10%	—	—	—	交通运输业
工业行业除用作原料	80%	26%	—	—	—	交通运输业
建筑业	98%	30%	—	—	—	交通运输业
其他三产	98%	30%	—	—	—	交通运输业
生活部门	100%	96%	—	—	—	交通运输业
交通运输业	—	—	30%	65%	65%	建筑业

资料来源：国家发展和改革委员会能源研究所“‘十三五’及2030年交通部门节能目标研究”课题组终期成果，调整主要参考“油品分摊法”，基于不同品种能源的实际用途和与中石油咨询的有关中国汽油、柴油的流向相结合。

根据以上估算方法，得到北京市1995—2016年城市交通碳排放量，如表3所示。

表3 1995—2016年北京市城市交通碳排放总量

单位：万吨二氧化碳

年份	碳排放	年份	碳排放	年份	碳排放
1995	319.52	1996	324.07	1997	325.72
1998	370.04	1999	414.00	2000	484.81
2001	634.22	2002	684.88	2003	727.96
2004	889.51	2005	1014.80	2006	1239.20
2007	1464.02	2008	1640.40	2009	1737.02
2010	1762.00	2011	1842.42	2012	1918.31
2013	1823.74	2014	1887.29	2015	1872.96
2016	1877.34	—	—	—	—

资料来源：作者整理。

(二) 北京市交通碳排放特征分析

北京市交通碳排放特征主要表现在如下两方面。第一，总量总体在增长且渐趋稳定，增速放缓。如图1a所示，城市交通碳排放总体在增长。从增长速度上看，1998—2008年，增长迅速，大多年份的年均增速超过15%，而2010年以后，增速放缓，逐渐趋于稳定。第二，城市交通对于油品依赖性高，油品消耗是碳排放主要来源。北京市拥有近600万辆机动车，城市交通的机动化程度高，消耗了大量的油品。如图1b所示，1995—2016年，油品对碳排放贡献率达到85%以上。具体到燃料品类，汽油占比最大，其次是柴油，再次为电力，天然气和液化石油气占比较小。

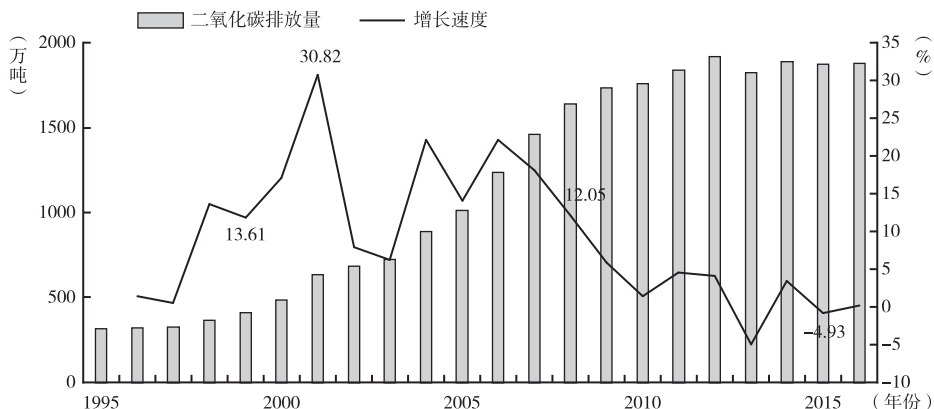


图 1a 北京市城市交通碳排放量和年均增长速度

资料来源：作者绘制。

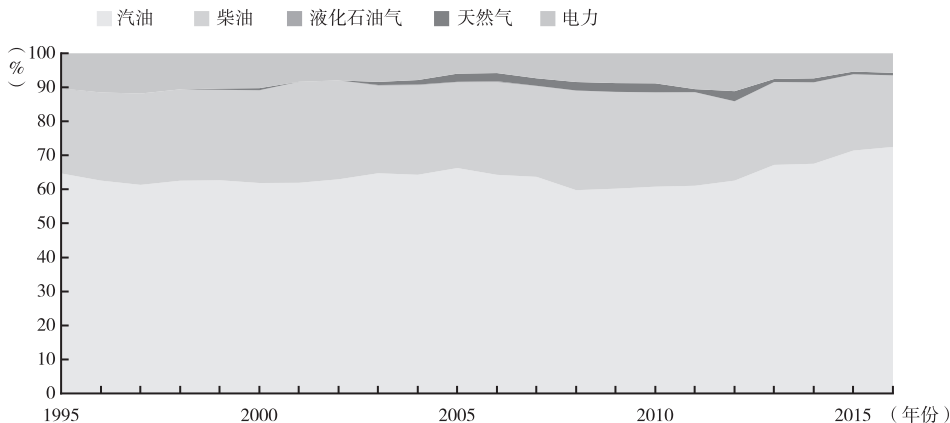


图 1b 北京市城市交通历年各类能源碳排放贡献率

资料来源：作者绘制。

二、驱动分析方法

（一）驱动机制

根据图 2，可将城市发展对交通碳排放的驱动机制理解为：城市的经济、人口、空间和能源四个要素在规模和结构两个维度上的发展过程中，不断对城市交通产生新的、更高级的需求，进而驱动交通碳排放增长。具体而言，人口方面，人口规模的扩张促使城市交通需求增长，进而导致交通碳排放增加；年龄、性别、受教育程度等人口结构特征差异也会对交通需求产生不同程度的影响，其中表现最为显著的影响来自

城市化进程。经济方面,经济活动水平和居民消费水平提升会带来交通需求增加,经济结构中第三产业的交通运输需求的量和质都要高于第一、第二产业(冯旭杰等,2012),第三产业比重升高带动了更高的交通需求,引起交通碳排放增加。空间方面,城市空间规模和土地利用决定交通的需求,影响了碳排放水平。空间规模扩张带来了出行距离的变化,增加交通碳排放。土地资源被用作城市道路等交通基础设施建设,满足刚性交通需求的同时也诱导产生了新的交通需求,可能导致碳排放的增加。能源方面,随着能源技术发展、效率提高,细化到城市交通领域可节约能源、减少碳排放。城市能源结构指的是城市宏观利用各种能源的比例构成,降低油品占比、提高替代能源占比,均有助于减少交通碳排放。

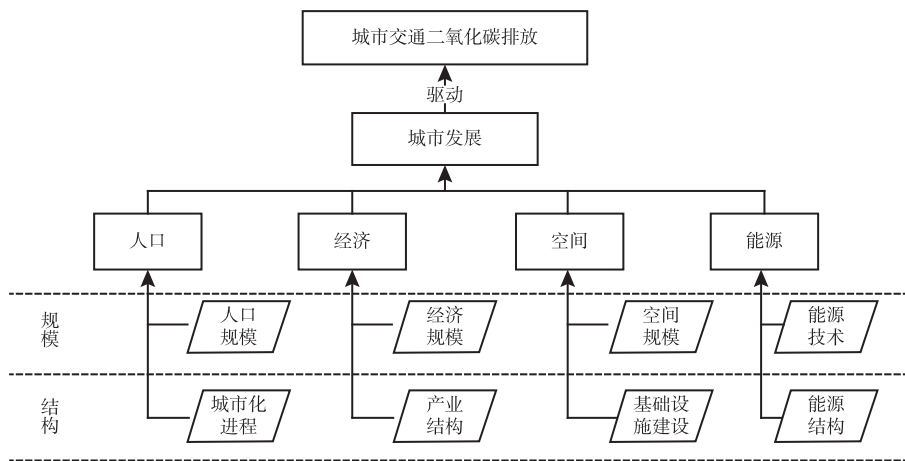


图2 城市发展驱动交通碳排放增长

资料来源:作者绘制。

(二) STIRPAT 模型

随机回归影响模型(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology, STIRPAT 模型)既具有较强的理论基础支撑,又形式灵活,可考量多样因素对于碳排放的影响,被广泛应用在碳排放驱动分析的实证研究中。STIRPAT 模型是基于 IPAT 模型的扩展模型(钟兴菊、龙少波,2016)。IPAT 模型认为温室效应等环境压力 I 是由人类活动所引起的,是人均环境压力 F 与人口总数 P 共同决定的,而人均环境压力用富裕程度 A 、环境压力强度或者技术 T 表征(Commoner, 1971; Ehrlich and Holden, 1971)。STIRPAT 模型认为环境压力与各驱动因素间可能存在非线性的幂函数关系(Dietz and Rosa, 1994),克服了 IPAT 模型的量纲限制(王永刚等,2015),公式如下:

$$I = aP^b A^c T^d e \quad (3)$$

式中, P 为人口; A 为富裕程度, 一般用人均消费或产出表示; T 为技术; a 为常数项; b 、 c 、 d 为指数项, 被定义为“生态弹性系数” (York et al., 2003), 表征驱动因素的变化对环境压力的影响作用; e 为误差项, 可以代表未列入研究驱动变量的其他所有影响因素的作用。当 $a = b = c = d = e = 1$ 时, STIRPAT 模型退化为 IPAT 模型。

本文选用 STIRPAT 模型分析城市发展对交通碳排放的综合驱动。

(三) 城市异速标度律

城市异速标度律 (Allometric Scaling) 是借鉴幂律、异速生长等理论, 研究城市系统发展和集聚规律的理论。West (1997)、Bettencourt (2013)、陈彦光 (2013) 等研究者应用城市异速标度律完成了大量研究并将其发展完善。城市异速标度律认为城市活动 (资源) 指标与城市规模的变化率成比例关系, 存在普适性的标度律, 也可用幂函数表示 (刘承良等, 2016; 董磊等, 2017):

$$\frac{1}{Y} \cdot \frac{dY}{dt} = \beta \left(\frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dt} \right) \quad (4)$$

$$Y = \alpha X^\beta \quad (5)$$

式中, Y 是城市活动 (资源) 的度量, X 是城市规模, α 为标准化常量, β 为异速标度律, 其大小表征 Y 和 X 的关系, 具体分为: $\beta < 1$, 表示亚线性关系; $\beta \approx 1$, 表示线性关系; $\beta > 1$, 表示超线性关系。

结合 STIRPAT 模型对于环境压力与驱动因素幂函数关系的假定, 可以运用城市异速标度律 β 分析城市规模与交通碳排放的关系, 如表 4 所示。

表 4 异速标度律 β 值表征关系划分

异速标度律	$\beta < 1$	$\beta \approx 1$	$\beta > 1$
划分类型	亚线性关系	线性关系	超线性关系
表征关系	交通碳排放的增长率小于城市发展指标增长率, 表征碳排放效率较高, 有集约效益	交通碳排放的增长率等于城市发展指标增长率, 表征线性同步增长	交通碳排放的增长率大于城市规模发展增长率, 表征碳排放效率较低, 属于粗放增长

资料来源: 作者整理。

(四) 变量选取

现有研究中, 城市交通碳排放驱动因素主要有表征人口的指标, 如人口数量、人口结构和城市化率等 (Wang et al., 2016; 高莹, 2019), 表征经济和居民生活水平的指标, 如 GDP、人均纯收入和第三产业生产总值等 (唐葆君等, 2016; 李健等, 2018), 表征城市空间的指标, 如城市建设用地面积、紧凑度等 (陈珍启等, 2016; 李佳佳, 2016), 表征城市能源的指标, 如能源经济强度、能源效率和能源结构等 (Hao et al., 2014; Peng et al., 2016; 徐慧智等, 2018)。

基于城市发展对交通碳排放影响的机理,选取对交通碳排放产生驱动作用的城市发展变量,主要如表5所示。人口规模 Pop 和城市化进程 U 表征 STIRPAT 模型中人口 P ,经济规模 $PGDP$ 表征富裕程度 A ,其余变量表征技术 T 。同时,变量还表征“规模”和“结构”两类含义。人口规模 Pop 、经济规模 $PGDP$ 、空间规模 L 表征城市规模,另城市化进程 U 表征人口结构变动,产业结构 S 表征经济结构变化,基础设施建设 D 表征城市土地利用结构,能源效率 EX 表征城市能源技术进步,能源消费结构 ES 表征城市能源转型。

表5 对交通碳排放产生驱动作用的城市发展变量

城市发展变量	指标	符号	指标说明及计算方法	单位	表征
人口规模	常住人口	Pop	年末常住人口数量 ^f	万人	P ;规模
城市化进程	城镇人口比重	U	城镇人口数量 ^f 与常住人口数量 ^f 之比	%	P ;结构
经济规模	人均地区生产总值	$PGDP$	不变价格(1995年)地区生产总值 ^f 与常住人口数量 ^f 之比	元/人	A ;规模
产业结构	第三产业占地区生产总值比重	S	第三产业产值 ^f 与地区生产总值 ^f 增量之比	%	T ;结构
空间规模	建成区面积	L	城市行政区内实际已成片开发建设、市政公用设施和公共设施基本具备的区域面积 ^g	平方公里	T ;规模
基础设施建设	道路面积	D	年末实有城市道路面积 ^f	万平方米	T ;结构
能源技术	能源效率	EX	能源强度倒数,不变价格(1995年)地区生产总值 ^f 与城市能源消费总量 ^f 之比	吨/万元	T ;规模
能源转型	油品消耗比重	ES	城市油品消耗量 ^h 与能源消费总量 ^f 之比	%	T ;结构

资料来源: ^f表示来自《北京统计年鉴》, ^g表示来自《中国城市统计年鉴》, ^h表示来自“国家数据”网站(<http://data.stats.gov.cn>)。

三、结果与分析

(一) 城市规模与交通碳排放关系分析

选取人口规模、经济规模、空间规模作为解释变量(席强敏、李国平,2018),研究城市规模与交通碳排放的关系。城市交通碳排放受到经济、社会、环境、居民行为等多方面影响,在分析单个城市规模变量与交通碳排放关系过程中,省略其他重要解释变量和有限的样本等都会导致异方差产生。城市异速标度律模型为非线性模型,对异方差敏感。为实现良好拟合,对等式两侧取对数并利用加权最小二乘法进行估计。

$$\ln Y = \beta \ln X + \ln \alpha \quad (6)$$

以北京市交通碳排放 C 为因变量，分别以常住人口 Pop （人口规模）、人均地区生产总值（不变价格） $PGDP$ （经济规模）、建成区面积 L （空间规模）为自变量，按公式（6）进行拟合求得 β 。

整体看，城市规模与交通碳排放为超线性关系。如组图3实线所示，1995—2016年北京市交通碳排放与经济规模、人口规模、空间规模的异速标度律 β 分别为 1.4648、3.1248、1.5095，均大于 1，呈现超线性关系；说明北京市交通碳排放的增长率大于城市规模的增长率，呈现粗放增长特征。

近期看，交通碳排放与经济规模、人口规模呈亚线性关系，与空间规模成超线性关系。进一步观察变化趋势，对数据进行分段拟合。对于经济规模，1995—2004年阶段， $\beta > 1$ ，而在 2005—2016 年阶段， $\beta < 1$ ，说明交通碳排放的增长率与经济规模增长率关系在 2005 年前后发生了变化，逐渐呈现亚线性关系，呈集约发展趋势。对于人口规模，相似的变化发生在 2007 年前后。对于空间规模，1995—2004 年阶段， $\beta < 1$ ；而在 2005—2016 年阶段，虽然由于数据原因拟合优度较差，但异速标度律 $\beta > 1$ ，说明交通碳排放和空间规模的关系在 2005 年前后，呈现亚线性关系向超线性关系的变化，城市蔓延使得交通发展由集约式转向粗放式。

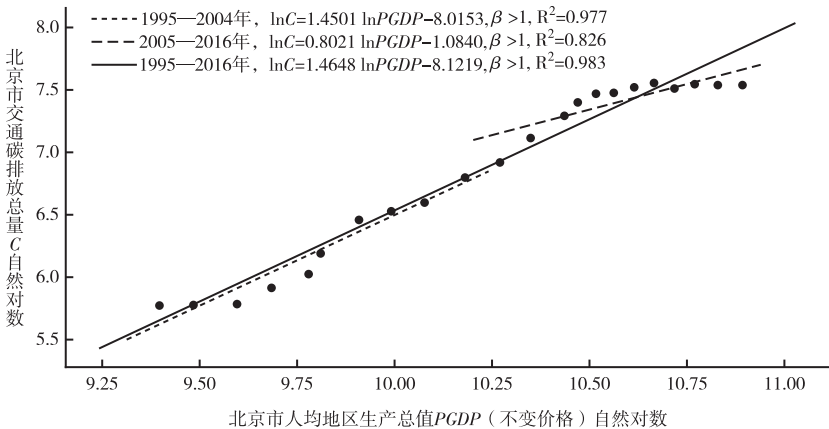


图3a 人均地区生产总值（不变价格）拟合结果

资料来源：作者绘制。

（二）城市发展综合驱动交通碳排放

利用 STIRPAT 模型分析城市发展对交通碳排放综合驱动，选取表 5 中的变量构建综合驱动模型，得到公式（7）。在计量分析中对公式（7）取自然对数，得公式（8）。

$$C = aPop^{b_1}U^{b_2}PGDP^{c_1}S^{d_1}L^{d_2}D^{d_3}ES^{d_4}EX^{d_5}e \quad (7)$$

$$\ln C = \ln a + b_1 \ln Pop + b_2 \ln U + c_1 \ln PGDP + d_1 \ln S + d_2 \ln L + d_3 \ln D + d_4 \ln ES + d_5 \ln EX + \ln e \quad (8)$$

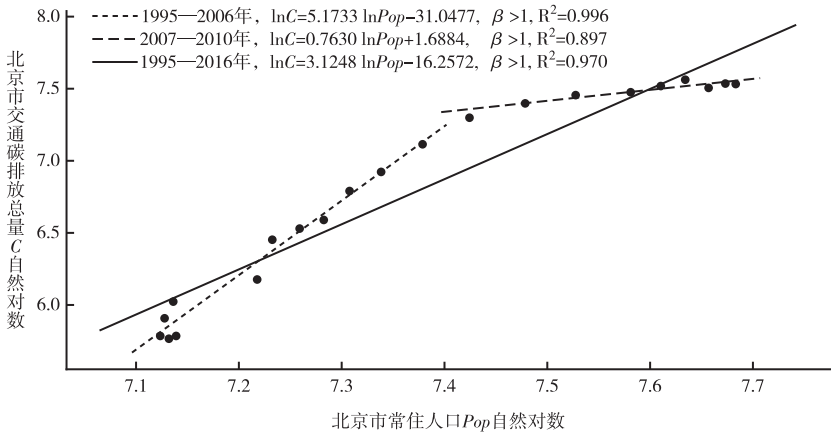


图 3b 常住人口拟合结果

资料来源：作者绘制。

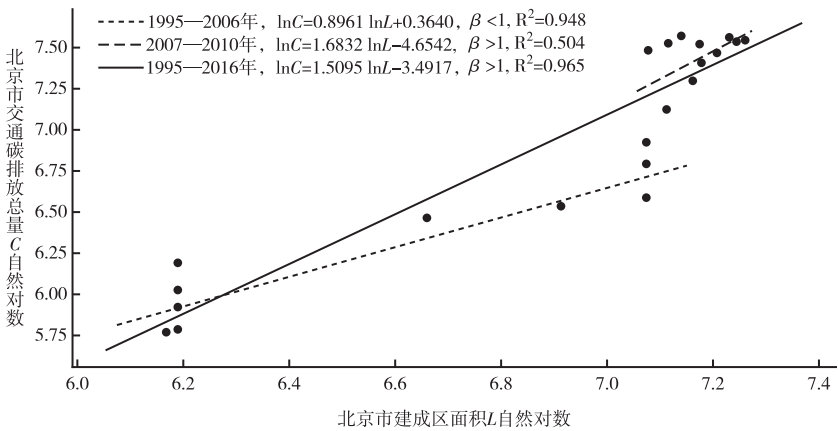


图 3c 建成区面积拟合结果

资料来源：作者绘制。

式中自变量都属于城市发展指标，具有很强的相互影响关系，存在多重共线性（刘晓红、江可申，2017；王长建等，2017）。为消除自变量之间存在的共线性和异方差，利用偏最小二乘法进行拟合（陈操操等，2014；李健等，2017），选取3个主成分，得到解释变量VIP值（Variable Importance in the Projection），如图4a所示。能源转型的VIP值最小，对于解释交通碳排放的贡献最小。这是由于北京市油品消耗主要源自交通领域且一直保持较高水平，交通能源转型成效尚未显现，故剔除能源转型变量。重新拟合综合驱动模型，得到各解释变量生态弹性系数（见表6）和贡献度VIP值（见图4b），符合城市发展现实和经济学意义。

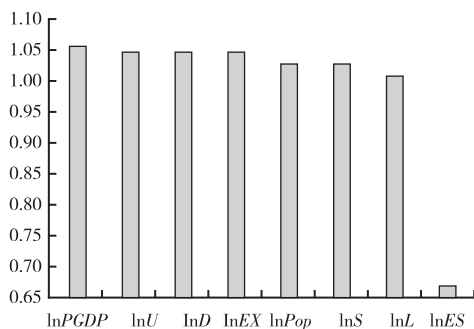


图 4a 包含能源转型变量解释变量 VIP 值

资料来源：作者绘制。

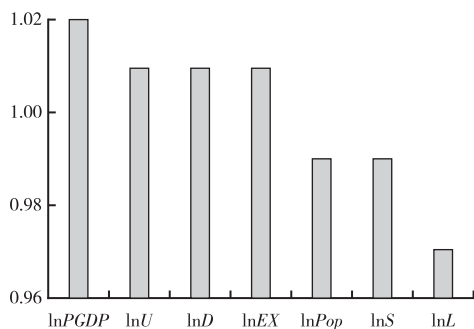


图 4b 剔除能源转型变量解释变量 VIP 值

资料来源：作者绘制。

表 6 解释变量生态弹性系数估计值

变量	生态弹性系数估计值	变量	生态弹性系数估计值
lnPop	$b_1 = 0.50$	lnL	$d_2 = 0.37$
lnU	$b_2 = 5.54$	lnD	$d_3 = 0.25$
lnPGDP	$c_1 = 0.08$	lnEX	$d_5 = -0.03$
lnS	$d_1 = 0.29$		

资料来源：作者整理。

由生态弹性系数估计结果分析，除能源技术对交通碳排放为负向驱动外，其余变量均为正向驱动。控制其他变量不变情况下，解释变量变动 1% 平均影响交通碳排放相对变化程度（变化百分比）由大到小依次是城市化进程 5.54%、人口规模 0.50%、空间规模 0.37%、产业结构 0.29%、基础设施建设 0.25%、经济规模 0.08%、能源效率 0.03%（负向）。由图 4b 分析，解释变量 VIP 值均大于 0.95，贡献显著，按大小顺序依次为人均地区生产总值 1.02，城市化进程、能源效率和基础设施建设 1.01，人口规模和产业结构 0.99，建成区面积 0.97。

对综合驱动模型解释变量生态弹性系数和 VIP 值共同分析，发现以下方面。第一，城市人口变化方面，城市化进程和人口规模对解释交通碳排放的贡献度较大，说明城市人口是导致交通碳排放增长的重要因素。其中，城市化进程的推进能带来最为显著的交通碳排放的增长，证明了城市化带来的生活方式变化和生活质量提升需求引起了交通领域的机动化发展，导致能源消耗和碳排放增长。第二，城市经济发展方面，人均地区生产总值对解释交通碳排放的贡献度最大，产业结构的贡献度也较大，两个变量对交通碳排放均为正向驱动。这说明城市经济规模扩大、产业结构向第三产业倾斜等都会派生出交通需求的增长，带来交通碳排放的增加。第三，城市空间扩张方面，空间规模和基础设施建设均对解释交通碳排放的贡献显著，其中基础设施贡献

度略高。城市空间扩张正向驱动交通碳排放,城市在发展过程中,无序的扩张会导致交通供给不足、需求过剩;同时,北京市交通基础设施建设一直以小汽车为导向,加剧了城市交通的机动化,出现“当斯定律”,也就造成了道路越修越宽、交通效率越来越低,而交通能源消耗和碳排放越来越多的“恶性循环”局面。第四,能源技术对驱动交通碳排放的贡献度大,且为负向驱动,意味着能源技术发展、能源效率提高,可以对交通碳排放增速起到良好的抑制作用。

四、结论与讨论

本文以北京市为例,在掌握北京市交通碳排放现状的基础上,基于城市发展视角,对交通碳排放的驱动因素进行了分析,对于北京市交通低碳发展提出几点讨论。

(1) 在城市人口方面,北京市城市化进程推进和人口规模扩张均促进了交通碳排放的增加,有正向驱动作用;在众多因素中,城市化进程推进驱动交通碳排放效果最为显著。因此,实现交通低碳发展,需要保持适当的人口规模,并在城市化进程中加强对交通活动水平的控制。此外,北京市城市交通碳排放增速高于人口增速,交通碳排放相对于人口粗放增长;实现交通低碳发展,需要在控制人口增速的同时,引导交通主体选择低碳方式满足交通需求,向低碳集约化转变。

(2) 在城市经济方面,北京市城市经济增长与产业结构升级均正向驱动交通碳排放,经济增长对解释交通碳排放增长的贡献最大。因此,实现交通低碳发展,需要在保障经济发展和产业升级的同时,加大交通节能减排力度,提高交通碳排放经济效率。此外,北京市城市经济增速小于交通碳排放增速,交通碳排放相对于经济粗放增长;实现交通低碳发展,需要尽早实现城市经济与交通碳排放的“脱钩”。

(3) 城市空间方面,北京市建成区蔓延和道路基础设施建设均正向驱动交通碳排放,建成区蔓延速度与交通碳排放增长速度间的关系逐渐变为超线性关系。因此,实现交通低碳发展,需要遏制城市无序蔓延,降低城市空间扩张速度,减少由建成区扩大带来的长距离交通活动水平的增加;同时,合理利用城市土地资源,促进土地利用规划与交通规划协同进行,注重道路资源的有机整合,关注公共交通和慢行交通的需求。

(4) 城市能源利用方面,北京市能源技术进步能抑制交通碳排放增长。因此,实现交通低碳发展,需要促进能源技术发展,提高城市整体能源利用效率,降低城市交通能源消耗强度。此外,北京市用能结构调整还在进行中,对交通碳排放的影响尚不显著;实现交通低碳发展,需要加速完成能源结构调整,加快电力和清洁能源对传统化石能源的替代,尽快形成能源结构调整的规模效应。

参考文献

陈操操、刘春兰、汪浩等(2014):《北京市能源消费碳足迹影响因素分析——基于STIRPAT

模型和偏小二乘模型》，《中国环境科学》第6期，第1622~1632页。

陈珍启、林雄斌、李莉等（2016）：《城市空间形态影响碳排放吗？——基于全国110个地级市数据的分析》，《生态经济》第10期，第22~26页。

陈彦光（2013）：《城市异速标度研究的起源、困境和复兴》，《地理研究》第6期，第1033~1045页。

董磊、王浩、赵红蕊（2017）：《城市范围界定与标度律》，《地理学报》第2期，第213~223页。

冯旭杰、孙全欣、钱堃等（2012）：《区域综合交通运输需求与产业结构的协整关系分析》，《交通运输系统工程与信息》第6期，第10~16页。

高莹（2019）：《天津市交通碳排放核算及影响因素分析》，《再生资源与循环经济》第6期，第18~21页。

胡晓健（2014）：《交通出行选择行为分析与交通需求管理》，南京：东南大学出版社。

金雪涛（2010）：《城市交通的负外部性治理》，北京：经济科学出版社。

李佳佳（2016）：《城市空间形态与城市土地利用碳排放强度关系分析——以上海市为例》，《山西农业大学学报（社会科学版）》第2期，第110~114页。

李健、景美婷、苑清敏等（2018）：《绿色发展下区域交通碳排放测算及驱动因子研究——以京津冀为例》，《干旱区资源与环境》第7期，第36~42页。

李健、王铮、朴胜任等（2017）：《大型工业城市碳排放影响因素分析及趋势预测——基于PLS-STIRPAT模型的实证研究》，《科技管理研究》第7期，第229~234页。

刘承良、王涛、郭庆宾（2016）：《特大城市交通碳排放的异速生长分析——以武汉市为例》，《软科学》第12期，第49~53+79页。

刘晓红、江可申（2017）：《基于PLS-VIP方法的我国居民间接碳排放研究》，《环境工程》第2期，第168~173页。

满洲、赵荣钦、袁盈超等（2018）：《城市居住区周边土地混合度对居民通勤交通碳排放的影响——以南京市江宁区典型居住区为例》，《人文地理》第1期，第70~75页。

荣培君、张丽君、刘荣增等（2018）：《开封城市家庭日常出行碳排放空间分异研究》，《资源科学》第6期，第1307~1318页。

宋梅、郝旭光（2018）：《北京市交通运输业能源消费碳排放影响因素分析》，《中国能源》第2期，第42~47页。

唐葆君、周保进、张坤（2016）：《北京市能源消费影响因素分析及其节能减排研究——基于社会及私人交通视角》，《中国能源》第8期，第25~32页。

王长建、张虹鸥、叶玉瑶等（2017）：《广东省能源消费碳排放的多变量驱动因素——基于扩展的STIRPAT模型》，《科技管理研究》第3期，第210~214页。

王卫（2016）：《城市交通与城市经济发展》，南京：东南大学出版社。

王永刚、王旭、孙长虹等（2015）：《IPAT及其扩展模型的应用研究进展》，《应用生态学报》第3期，第949~957页。

王泳璇、张觉丹、丁哲等（2017）：《不同经济水平地区交通碳排放影响因素研究》，《生态经济》第12期，第28~33+40页。

席强敏、李国平（2018）：《超大城市规模与空间结构效应研究评述与展望》，《经济地理》第

1期,第61~68页。

徐慧智、裴玉龙、王连震等(2018):《城市客运交通引入电动汽车碳减排量研究——以哈尔滨市为例》,《交通信息与安全》第1期,第111~118页。

钟兴菊、龙少波(2016):《环境影响的IPAT模型再认识》,《中国人口·资源与环境》第3期,第61~68页。

Bettencourt, L. (2013), “The Origins of Scaling in Cities”, *Science*, 340 (6139), pp. 1438 – 1441.

Commoner, B. (1971), *The Closing Circle*, New York: Bantam Books, Inc.

Delgado, L. A. and E. P. Rosa (2017), “Driving Factors of GHG Emissions in EU-Transport Activity”, https://www.recercat.cat/bitstream/handle/2072/291458/dea17_02.pdf?sequence=1 [2019-03-29].

Dietz, T. and E. A. Rosa (1994), “Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence and Technology”, *Human Ecology Review*, 1, pp. 277 – 300.

Ehrlich, P. R. and J. P. Holden (1971), “Impact of Population Growth”, *Science*, 171, pp. 1212 – 1217.

Fan, F. and Y. Lei (2016), “Decomposition Analysis of Energy-related Carbon Emissions from the Transportation Sector in Beijing”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 42, pp. 135 – 145.

Guo, M. and J. Meng (2019), “Exploring the Driving Factors of Carbon Dioxide Emission from Transport Sector in Beijing-Tianjin-Hebei Region”, *Journal of Cleaner Production*, 226, pp. 692 – 705.

Hao, H., Y. Geng and H. Wang, et al. (2014), “Regional Disparity of Urban Passenger Transport Associated GHG (Greenhouse Gas) Emissions in China: A Review”, *Energy*, 68, pp. 783 – 793.

Peng, B. B., Y. Fan and J. H. Xu (2016), “Integrated Assessment of Energy Efficiency Technologies and CO₂ Abatement Cost Curves in China’s Road Passenger Car Sector”, *Energy Conversion and Management*, 109, pp. 195 – 212.

Wang, Y., L. Li and J. Kubota, et al. (2016), “Does Urbanization Lead to More Carbon Emission? Evidence from a Panel of BRICS Countries”, *Applied Energy*, 168, pp. 375 – 380.

Wang, Z. J., F. Chen and T. Fujiyama (2015), “Carbon Emission from Urban Passenger Transportation in Beijing”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, pp. 217 – 227.

West, G. B. (1997), “A General Model for the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology”, *Science*, 276 (5309), pp. 122 – 126.

York, R., E. A. Rosa and T. Dietz, et al. (2003), “STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts”, *Ecological Economics*, 46 (3), pp. 351 – 365.

Yuan, R. Q., X. Tao and X. L. Yang (2019), “CO₂ Emission of Urban Passenger Transportation in China from 2000 to 2014”, *Advances in Climate Change Research*, <https://doi.org/10.1016/j.accre.2019.03.005> [2019-05-15].

Driving Factors of Urban Transportation CO₂ Emission in Beijing —An Analysis Based on the Urban Development Perspective

SUN Yan^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, LIU Xue-min^{1,2}

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Research Center for Resource Economy and Policy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The coupling of urban transportation and urban development indicates that urban development can increase the demand for urban transportation and result in a lot of transportation emissions. Therefore, an in-depth understanding of the driving mechanism of urban development on transportation emissions is a crucial prerequisite for coordinated urban transportation and low carbon urban. Based on the oil product allocation method, this article estimated the urban transportation emission in Beijing from 1995 to 2016. Then the relationship between urban scale and transportation emission is analyzed based on the urban allometric scaling law. Finally, the driving mechanism is analyzed by the STRIPAT model. The results indicate that the total urban transportation emission in Beijing has increased, and its growth rate is higher than the urban expansion rate, which shows a superlinear relationship. Population size, urbanization process, economic scale, industrial structure, spatial scale and infrastructure construction are positive factors of transportation emission. Whereas energy technological advancement as a negative driving factor can restrain the growth of transportation emission. Urbanization process has the most significant impact on urban transportation emission, and economic scale has the greatest contribution to the growth of transportation emission. Based on the results, we make a few policy recommendations for low-carbon urban transportation emission, which include improving transportation efficiency, energy conservation and emission reduction, the decoupling of transportation emission and urban development, restriction of urban expansion, updating the concept of transportation infrastructure supply, developing energy technology and improving energy efficiency.

Key Words: urban transportation; urban development; carbon emission; STIRPAT model; Beijing

责任编辑：周枕戈