

区域交通碳排放相关指标测算及影响因素分析

陈亮¹, 何涛¹, 李巧茹¹, 田晓勇¹, 魏玮²

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 张家口通泰运输集团有限公司, 河北 张家口 075000)

摘要: 为了更好地掌握交通运输行业碳排放相关指标动态变化规律, 分析交通碳排放影响因素驱动力, 依据 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 清单指南提供的相关数据, 对区域交通碳排放相关指标进行测算; 建立改进的 STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population Affluence and Technology) 模型, 运用最小二乘回归和岭回归法对交通碳排放影响因素进行定量分析. 以北京市为例, 研究该地区 2005—2014 年交通碳排放情况, 得出区域交通运输业碳排放发展态势及各影响因素对碳排放总量的驱动力影响程度排序, 该研究结果可为其他省市交通运输业碳排放研究提供借鉴.

关键词: 交通; 碳排放; 改进 STIRPAT 模型; 岭回归

中图分类号: U 491; X 24

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)04-0631-07

doi: 10.11936/bjtu2016090025

Index Calculation and Effect Factor Study of Regional Transport Carbon Emission

CHEN Liang¹, HE Tao¹, LI Qiaoru¹, TIAN Xiaoyong¹, WEI Wei²

(1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Zhangjiakou Tongtai Transportation Group Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract: To master the law of dynamic changes of the transport sector emissions related indicators and analyze the effect factors of transport carbon emissions, indicators of regional transport carbon emissions were calculated firstly based on the related data of IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) guideline. Then the STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population Affluence and Technology) Model was modified with the introduction of carbon emission efficiency. Least squares regression and ridge regression method were adopted to analyze the factors of transport carbon emissions. Finally, transport carbon emissions were analyzed by numerical examples of Beijing from 2005 to 2014. The results demonstrate the developing state of regional transport carbon emissions and the sequence of influence degree of different factors. The research provides a reference for the transport carbon emission study of other provinces.

Key words: transport; carbon emissions; modified STIRPAT Model; ridge regression

近年来, 由于 CO₂ 等温室气体排放导致的全球气候变暖、恶劣天气频发问题, 正逐渐成为人类面临的主要世界性难题之一. 自改革开放至今, 我国经

济实现了跨越式发展, 但由此带来的巨大碳排放问题不容小觑. 交通运输业作为国民经济支柱性产业, 与工业和发电共同构成国家三大能源消耗碳排

收稿日期: 2016-09-09

基金项目: 北京城市交通协同创新中心资助项目; 河北省高等学校科学技术研究重点资助项目 (ZD 2014078)

作者简介: 陈亮 (1978—), 男, 副教授, 主要从事交通管理与安全技术、智能交通系统相关技术方面的研究, E-mail: karlchen@126.com

放源头产业^[1]. 纵观全球, 交通运输业能耗占世界能源消耗总量的 1/3, 已经成为位居第二的耗能产业, 仅次于工业^[2]. 我国交通运输业具有高能耗、高污染、低效率的特点, 因此, 致力于研究交通运输业能源消耗特性, 分析交通运输业碳排放影响因素, 对于早日实现节能减排目标, 构建资源节约型、环境友好型社会, 具有十分重要的现实意义.

目前, 针对碳排放影响因素的研究引起国内外学者的广泛关注. 国外方面, González 等^[3] 基于欧盟各国相关数据, 采用 LMDI (logarithmic mean division index) 分解法得出了影响欧盟碳排放量的主要因素; Mazzarino^[4] 通过定量分析法, 对意大利交通运输业 1980—1995 年能源消耗变化进行研究, 认为经济发展是促使交通运输业碳排放增加的主要原因. 国内方面, Lin 等^[5] 在 IPAT (impact population affluence and technology) 模型^[6] 的基础上引入城市化率和能源强度 2 个指标, 建立扩展 STIRPAT 模型, 发现对碳排放影响强度由大到小依次为人口、城市化率、工业发展水平和能源强度; 喻洁等^[7] 基于 LMDI 分解法, 较为全面地分析了经济、人口、能源种类、运输结构等因素对碳排放变化的影响; 武翠芳等^[8] 通过建立 STIRPAT 模型, 测算甘肃省交通运输业 2000—2013 年碳排放数据, 认为影响该地区碳排放的主要因素为城市化水平; 高标等^[9] 利用 STIRPAT 模型对吉林省交通行业 1999—2011 年数据进行研究, 通过观察数据的动态变化和 EKC 曲线图, 定量分析了该地区交通碳排放整体演变过程, 为低碳城市建设提出了相关建议.

综上所述, 大部分学者将研究重点放在对碳排放影响因素的研究上, 较少结合交通碳排放相关指

标的动态变化综合分析碳排放总量的变化规律, 这在一定程度上降低了分析结果的科学性和可靠性; 同时, 在影响因素分析方面, 对碳排放效率的研究相对较少, 而掌握其作用机理是交通节能减排的关键. 基于此, 本文研究了碳排放总量、人均碳排放量、交通运输行业能源利用结构、碳排放强度等相关指标的计算方法; 引入碳排放效率, 建立改进的 STIRPAT 分解模型; 以北京市为例, 对各相关指标进行测算, 对各影响因素进行定量分析; 并提出关于交通节能减排的建议与对策, 为构建新型绿色低碳城市交通体系提供科学的借鉴与参考.

1 区域交通碳排放

1.1 碳排放总量计算方法

目前, 关于碳排放总量计算方法主要有 2 种: 其一为“自上而下”的方法, 即利用各类能源消耗量乘以与之对应的碳排放系数; 其二为“自下而上”的方法, 即利用研究国家或地区交通部门各类交通方式行车里程数乘以与之对应的公里能源消耗量, 再乘以对应能源的碳排放系数. 考虑到车辆里程数据获取难度较大, 而且地域差异和收集数据的准确性较低等因素都会导致碳排放计算偏差较大, 本研究采取“自上而下”的方法计算交通运输业碳排放量(本研究主要指 CO₂ 排放量). 碳排放计算公式为

$$Q = \sum_i^n F_i E_i \quad (1)$$

式中: Q 代表能源消耗碳排放总量, t; F_i 代表第 i 种能源的碳排放系数(如表 1 所示); E_i 代表第 i 种能源的消耗量, t.

表 1 各种能源的碳排放系数

Table 1 Carbon emission coefficients of various fuels

能源种类	煤炭	焦炭	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	电力
碳排放系数	1.900 3	2.860 4	2.925 1	3.017 9	3.095 9	3.170 5	2.162 2	1.246 0

注: 该系数来源于 IPCC 清单指南, 其中天然气系数以 kg/m³ 计, 电力系数以 kg/(kW·h) 计, 其他能源系数以 t/t 计.

1.2 能源利用结构计算方法

关于交通运输部门能源利用结构, 本文借鉴产业结构指数构造法, 将其定义为不同能源消耗转换标准煤用量与行业消耗能源标准煤总量的比值, 计算公式为

$$M = \frac{E_i x_i}{\sum_i^n E_i x_i} \quad (2)$$

式中: M 表示不同能源消耗所占比例, %; E_i 代表第 i 种能源的消耗量, 万 t; x_i 代表第 i 种能源转换标准煤系数, t/t, 如表 2 所示.

1.3 碳排放强度计算方法

碳排放强度是单位 GDP 所产生的碳排放量, 用来反映经济增长与碳排放之间的关系. 碳排放强度代表了行业科技化发展水平, 它的降低是社会发展的一个主要趋势, 其计算公式为

表2 各种能源折算标准煤系数
Table 2 Coefficients of various fuels to standard coal

能源种类	煤炭	焦炭	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	电力
标准煤系数	0.741 3	0.971 4	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.330 0	0.122 9

注:该系数来源于 IPCC 清单指南,其中天然气系数以 kg/m^3 计,电力系数以 $\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计,其他能源系数以 t/t 计。

$$H = \frac{Q_t}{G_t} \quad (3)$$

式中: H 表示碳排放强度, $\text{t}/\text{万元}$; Q_t 表示历年交通运输行业碳排放总量, t ; G_t 表示历年经济生产总值, 万元。

2 改进 STIRPAT 模型建立

2.1 模型建立

STIRPAT 模型是由 York 等^[10]提出的关于人口、富裕和技术的随机影响模型,即用于分析人文因素对环境影响的恒等式^[11]

$$I = aP^b A^c T^d e \quad (4)$$

式中: I 、 P 、 A 、 T 分别代表环境影响、人口、富裕度和技术水平; a 为模型系数; b 、 c 、 d 分别为 P 、 A 、 I 的指数; e 为模型的随机误差。模型允许通过增减或分解因素进行扩展改进^[13],旨在提高模型的分析解释能力。因此,本文在前人的基础上建立改进的 STIRPAT 模型,引入碳排放效率这一指标,确定客货运周转量、人均 GDP、碳排放效率、能源利用结构和私家车保有量为主要影响因素,模型表达式为

$$Q = \alpha T^{\beta_1} A^{\beta_2} I^{\beta_3} E^{\beta_4} C^{\beta_5} \quad (5)$$

为了便于运用回归分析确定参数,对表达式两边分别取对数,可得

$$\ln Q = \ln \alpha + \beta_1 \ln T + \beta_2 \ln A + \beta_3 \ln I + \beta_4 \ln E + \beta_5 \ln C \quad (6)$$

式中: Q 为交通碳排放总量, t ; α 为常数项; T 为客货运周转量, $\text{亿 t}\cdot\text{km}$, 替代了原模型的人口项; A 为人均 GDP, 元, 替代原模型的经济项; I 为交通碳排放效率, $\text{万 t}\cdot\text{km}/\text{t}$, 即客货运周转量与碳排放总量的比值^[12]; E 为能源利用结构, %, 本文研究的是清洁能源(即天然气和电力 2 种能源转换为标准煤的总和)占能源消耗标准煤总量的百分比, 这两者替代原模型的技术项; C 为私家车保有量, 万辆, 为模型引入的社会影响因素; β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 为弹性系数, 表示当 T 、 A 、 I 、 E 、 C 变化 1% 时, 将分别引起 Q 的 $\beta_1\%$ 、 $\beta_2\%$ 、 $\beta_3\%$ 、 $\beta_4\%$ 和 $\beta_5\%$ 的变化。

2.2 参数分析

研究表明, 交通运输业碳排放影响因素主要包

括交通自身影响、经济发展和科学技术水平三方面^[14]。由于客货运周转量能直接影响交通碳排放总量的大小, 因此确定其为交通自身因素; 人均 GDP 能直接反映区域经济发展水平, 确定其为经济发展因素; 交通碳排放效率和清洁能源利用情况可以反映区域交通运输业技术发展水平^[12]; 私家车保有量为社会因素。

关于交通碳排放效率, 本文借鉴卢建峰等^[12]的研究内容, 将其定义为客货运周转量与碳排放总量的比值, 它反映了单位碳排放所带来的运输经济效益, 该比值的提高是交通运输业良性发展的重要标志。本文将交通碳排放效率引入 STIRPAT 模型, 分析该指标在多个参数共同影响下的驱动力作用^[15], 对于协调交通运输业增长与行业能源消耗碳排放之间的矛盾, 构建科学的交通运输业减排体系, 具有良好的现实意义。

3 实证分析

本研究所涉及到的数据均来源于《北京市统计年鉴(2005—2015)》, 包括交通运输、仓储及邮政业 3 个方面的能源消费、客货运周转量、人口数、GDP 总量和汽车保有量。其中能源种类主要包括煤炭、焦炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和电力等(此处不考虑热力、风能发电、太阳能发电及水电等能源利用情况)。

3.1 北京市交通碳排放相关指标分析

3.1.1 交通碳排放量数据分析

通过式(1)计算可得北京市 2005—2014 年交通碳排放总量和人均碳排放量, 结果如图 1 所示。由图 1 可知, 除个别特殊年份外, 2005—2014 年北京市交通碳排放总量和人均碳排放量均呈现出逐年上升的趋势。其中 2005—2008 年增长速度最快, 增长率为 88.9%, 究其原因为该时期北京市经济发展速度较快, 建筑行业迅速崛起, 大型货运机动车比例增加, 导致汽油、柴油等能源的消耗量较大; 受北京奥运会等重大国际事件影响, 2008—2010 年总体排放情况相对平稳, 碳排放总量与人均碳排放量呈缓慢上升趋势; 2012 年达到碳排放峰值, 排放总量为

2 901.4 万 t; 2013、2014 年碳排放总量稍有下降, 导致这一结果的主要原因有 2 点, 一是交通动力燃料转换和清洁能源用量的增加, 二是节能减排等相关政策的良性诱导. 综合分析可得, 北京市交通运输行业碳排放整体形势不容乐观, 社会仍然面临较大的节能减排压力.

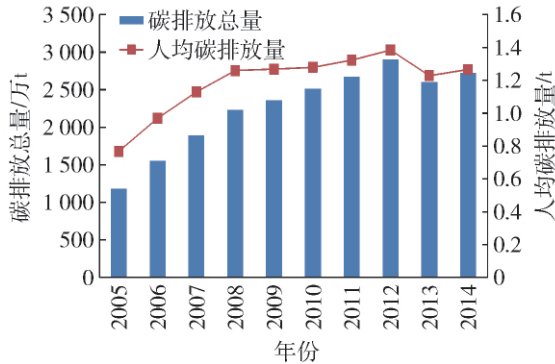


图 1 北京市 2005—2014 年碳排放变化

Fig. 1 Variation of total and per capita carbon emissions in Beijing province from 2005 to 2014

3.1.2 能源利用结构变化分析

由图 2 可知, 北京市 2005—2014 年能源消耗总量整体呈上升趋势, 2012 年达到峰值, 能源消耗总量为 1 235.05 万 t 标准煤. 由表 3 的数据可知, 北京市交通运输业能源消耗种类主要为柴油、煤油、汽油和清洁能源, 占能源消耗总量的比例整体呈上升趋势. 其中 2014 年比例最高, 为 91.31%, 2011 年

最低, 为 83.52%, 平均占据年消耗总量的 88.09%; 4 类主要能源中, 煤油的消耗比例最大, 由 2005 年的 49.37% 增长到 2014 年的 61.94%, 主要因为北京作为国家首都, 是民航航班和国际航班的重要枢纽. 2005—2014 年民航客货运周转量达 1 217.2 亿 t·km, 这一巨大的运输量要求大量的煤油作为燃料支持; 清洁能源的比例虽有所下降, 但其实际消费量却呈上升趋势, 这表明社会能源利用结构正在逐步向低碳趋势发展, 且态势良好; 与此同时, 由于社会油价调整和对大型客货运车辆的通行限制以及对高耗能机动车的淘汰机制, 北京市汽油的消耗比例呈下降趋势.

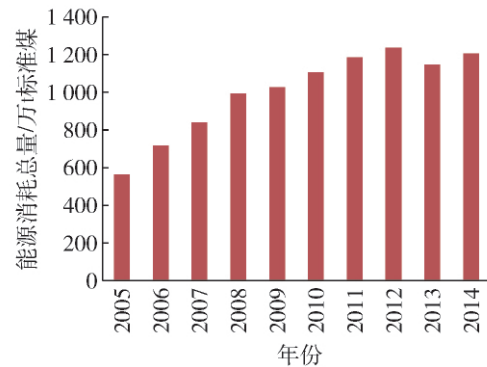


图 2 北京市 2005—2014 年能源消耗总量变化

Fig. 2 Variation of traffic energies to standard coal in Beijing province from 2005 to 2014

表 3 北京市 2005—2014 年各类交通能源消耗结构

Table 3 Construction of various traffic energies from 2005 to 2014

年份	柴油	煤油	汽油	清洁能源(天然气和电力)	其他	%
2005	14.63	49.37	12.26	11.50	11.84	
2006	16.49	47.82	11.41	12.19	12.09	
2007	17.79	48.40	9.20	12.75	11.86	
2008	18.85	47.05	6.87	13.75	13.47	
2009	18.30	49.00	6.27	14.63	11.80	
2010	16.78	52.23	5.47	14.00	11.52	
2011	16.45	52.03	5.58	9.46	16.48	
2012	13.84	52.75	5.25	16.12	12.04	
2013	15.81	61.21	5.83	7.79	9.36	
2014	15.31	61.96	5.68	8.63	8.69	

注: 本文研究的是各能源转换标准煤之后的比例结构, 转换系数如表 1 所示.

3.1.3 碳排放强度分析

碳排放强度计算方法见式(3),由图3可得,随着北京市经济水平的快速发展,交通碳排放强度整体呈下降趋势,由2005年的0.17 t/万元下降为2014年的0.13 t/万元。这一结果表明北京市交通碳排放技术在不断提高,能源利用效率大大提升,单位GDP的碳排放依赖程度逐渐降低;2005—2008年交通碳排放强度呈上升趋势,2008年达到峰值,为0.2 t/万元;虽然2008—2012年交通运输业碳排放总量呈上升趋势,但该时期GDP平稳增长,最终得

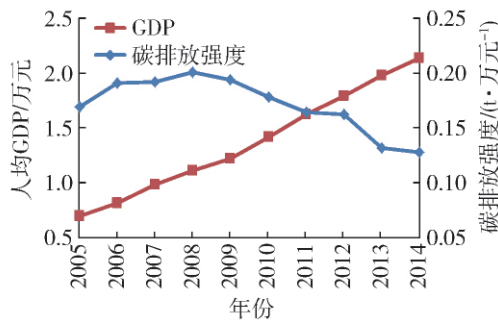


图3 北京市2005—2014年交通碳排放强度和GDP
Fig.3 Intensity of traffic carbon emissions and GDP in Beijing province from 2005 to 2014

到碳排放强度大幅降低的结果。这种情况也明确反映出北京市交通能源消耗结构的不断调整和探索。综合分析表明,北京市交通运输行业技术水平在不断提高,能源利用效率大大提升,单位GDP的碳排放依赖程度逐渐降低。

3.2 模型弹性系数的确定与分析

3.2.1 普通最小二乘回归分析

运用SPSS18.0软件对改进的STIRPAT模型进行普通最小二乘回归分析,结果如表4所示。得到回归方程为

$$\ln Q = 12.152 + 0.29 \ln T + 0.404 - 0.561 \ln I - 0.097 \ln E + 0.12 \ln C \quad (7)$$

由分析结果可知, F 值为547.207,对应的Sig.值为0.000,这说明总体回归方程显著性较好。此外 R 方及调整 R 方都是0.999,接近1,表明样本全部被回归方程解释且模型具有较高的拟合优度。但是模型 t 检验结果不理想,且模型的VIF值较大,说明模型结果存在明显的多重共线性问题,只有消除模型的多重共线性,才能保证交通碳排放与各影响因素之间关系的精确性。因此,模型采用岭回归法对数据加以分析。

表4 普通最小二乘回归结果

Table 4 Results of ordinary least square regression

变量	B	标准误差	t	Sig.	VIF
常量	12.152	1.250	9.719	0.001	
$\ln T$	0.290	0.190	1.523	0.203	51.327
$\ln A$	0.404	0.146	2.769	0.050	58.404
$\ln I$	-0.561	0.100	-5.593	0.005	16.583
$\ln E$	-0.097	0.038	-2.552	0.063	3.562
$\ln C$	0.120	0.104	1.147	0.315	36.104

注:检验水平为95%的置信区间。

3.2.2 岭回归分析

岭回归是一种专门用于共线性数据分析的有偏估计回归方法,其实质是一种改良版最小二乘估计法^[16-17]。它放弃最小二乘法的无偏性,通过损失部分信息、降低精度来获得更可靠的回归系数,对病态数据的拟合优于普通最小二乘法。

运用SPSS18.0软件对北京市交通碳排放诸影响因素进行岭回归分析。设定回归系数 K 的范围是(0,1),数据间隔为0.01,通过程序运算对模型系数进行估算,得到当 $K=0.18$ 时,岭迹图开始趋于平稳,此时的 R 方和调整 R 方分别为0.989和0.978,

模型具有较高的拟合优度,回归方程显著性较好。各项参数指标如表5所示,所得回归方程为

$$\ln Q = 12.661 + 0.17 \ln T + 0.302 \ln A - 0.344 \ln I - 0.065 \ln E + 0.272 \ln C \quad (8)$$

该结果表明,客货运周转量、人均GDP和私家车保有量与交通碳排放总量之间为正向相关关系,而交通碳排放效率和能源消耗结构与交通碳排放总量之间为负向相关关系。其中,北京市客货运周转量每增加1%,交通碳排放总量将增加0.17%;人均GDP每增加1%,促使交通碳排放总量增加0.302%;汽车保有量每增加1%,交通碳排放总量

将增加 0.272%; 当交通碳排放效率和清洁能源所占比例每增加 1%, 北京市交通碳排放量将分别降低 0.344% 和 0.065%。根据岭回归得出的模型系数来判断各影响因素对交通碳排放总量的驱动作用, 由大到小为: 交通碳排放效率、人均 GDP、汽车保有量、客货运周转量和能源利用结构。

由回归结果可知, 提高碳排放效率对交通节能减排体系建设有极其重要的推动作用。因此, 北京市一方面应大力发展公共电汽车、轨道交通的事业, 构建城市低碳公共交通体系; 另一方面要积极推广清洁燃料技术和节能减排技术, 扩大新能源交通方式适用范围; 与此同时, 要合理调整交通运输结构, 积极引导运输结构向低碳化方向转化, 提高运输装备本身的科技化水平, 保证社会整体运输行业碳排放效率大大提升。

表 5 岭回归结果

Table 5 Results of ridge regression

变量	B	标准误差	t	Sig.
常量	12.661	1.406	9.268	0.000
ln T	0.170	0.045	3.311	0.000
ln A	0.302	0.030	9.833	0.023
ln I	-0.344	0.049	9.028	0.000
ln E	-0.065	0.012	8.723	0.007
ln C	0.272	0.035	3.377	0.000

注: 检验水平为 95% 的置信区间。

4 结论

1) 碳排放总量与人均碳排放量呈缓慢上升趋势, 2012 年达到碳排放峰值, 由于交通动力燃料转换和清洁能源用量的增加以及节能减排等相关政策的良性诱导, 近两年年碳排放总量呈下降趋势; 清洁能源消耗总量呈上升趋势, 这表明社会能源利用结构正在逐步向低碳趋势发展; 随着经济水平的快速发展, 交通碳排放强度整体呈下降趋势, 由 2005 年的 0.17 t/万元下降为 2014 年的 0.13 t/万元。这一结果表明北京市交通碳排放技术在不断提高, 能源利用效率大大提升, 单位 GDP 的碳排放依赖程度逐渐降低。

2) 通过岭回归分析, 发现各影响因素对交通碳排放总量的驱动作用由大到小为: 交通碳排放效率、人均 GDP、汽车保有量、客货运周转量和能源利用结构, 这表明提高碳排放效率对交通节能减排体系

建设有极其重要的推动作用。

3) 本文在能源结构分析中将清洁能源定义为天然气和电力能源的总和, 未考虑新时代背景下社会对风能、地热、太阳能等能源的利用情况; 由于相关数据较难获取, 未对运输结构进行定量分析, 在以后的研究中将做进一步探索。

4) 我国各省市区域交通发展现状存在一定的差异性, 因此在以后的研究中要综合考虑区域的经济水平、地理气候条件及城市化程度等因素, 加强对模型的本地化研究, 以更好地为区域交通节能减排政策评估和趋势预测提供技术支持。

参考文献:

- [1] TIMILSINA G R, SHRESTHA A. Transport sector CO₂ emissions growth in Asia: underlying factors and policy options [J]. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4523-4539.
- [2] LIN B Q, XIE C P. Reduction potential of CO₂ emissions in China's transport industry [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 689-700.
- [3] GONZÁLEZ P F, LANDAJO M. Tracking European Union CO₂ emissions through LMDI (logarithmic mean division index) decomposition. The activity revaluation approach [J]. *Energy Policy*, 2009(8): 3259-3267.
- [4] MAZZARINO M. The economics of the greenhouse effect: evaluating the climate change impact due to the transport sector in Italy [J]. *Energy Policy*, 2000, 28(13): 957-966.
- [5] LIN S, ZHAO D, MARINOVA D. Analysis of the environment impact of China based on STIRPAT model [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2009, 29(6): 341-347.
- [6] EHRlich P R, HOLDREN J P. Impact of population growth [J]. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [7] 喻洁, 达亚彬, 欧阳斌. 基于 LMDI 分解方法的中国交通运输行业碳排放变化分析 [J]. *中国公路学报*, 2015, 10: 112-119.
YU J, DA Y B, OUYANG B. Analysis of carbon emission change in China's transportation industry based on LMDI decomposition method [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 10: 112-119. (in Chinese)
- [8] 武翠芳, 熊金辉, 吴万才, 等. 基于 STIRPAT 模型的甘肃省交通碳排放测算及影响因素分析 [J]. *冰川冻土*, 2015, 3: 826-834.
WU C F, XIONG J H, WU W C, et al. Calculation and effect factor analysis of transport carbon emission in Gansu province based on STIRPAT model [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 3: 826-834. (in

- Chinesse)
- [9] 高标,许清涛,李玉波,等. 吉林省交通运输能源消费碳排放测算与驱动因子分析[J]. 经济地理,2013,9: 25-30.
GAO B, XU Q T, LI Y B, et al. Calculation and driving factors analysis of carbon emissions from traffic and transportation energy consumption in Jilin province [J]. Economic Geography, 2013, 9: 25-30. (in Chinese)
- [10] YORK R, ROSA E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and ImpACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351-365.
- [11] 焦文献,陈兴鹏,贾卓. 甘肃省能源消费碳足迹变化及影响因素分析[J]. 资源科学,2012,34(3): 559-565.
JIAO W X, CHEN X P, JIA Z. Carbon footprint change of consumption in Gansu province and its influencing factors [J]. Resources Science, 2012, 34(3): 559-565. (in Chinese)
- [12] 卢剑锋,傅惠,王小霞. 区域交通运输业碳排放效率影响因素研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2016,16(2): 26-30.
LU J F, FU H, WANG X X. Research on the impact of regional transportation emissions efficiency factors [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(2): 26-30. (in Chinese)
- [13] 陈操操,刘春兰,汪浩等. 北京市能源消耗碳足迹影响因素分析——基于 STIRPAT 模型和偏小二乘模型[J]. 中国环境科学,2014,34(6): 1622-1632.
CHEN C C, LIU C L, WANG H. Examining the impact factors of energy consumption related carbon footprints using the STIRPAT model and PLS model in Beijing [J]. China Environmental Science, 2014, 34(6): 1622-1632. (in Chinese)
- [14] 杨足膺,赵媛,付武明. 基于弹性系数的江苏省能源生态足迹影响因素分析[J]. 生态学报,2010,30(24): 6741-6748.
YANG Z Y, ZHAO Y, FU W M. Influencing factors analysis of Jiangsu's energy ecological footprint upon coefficient elasticity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 6741-6748. (in Chinese)
- [15] 徐中民,程国栋. 中国人口和富裕对环境的影响[J]. 冰川冻土,2005,5: 767-773.
XU Z M, CHENG G D. Impacts of population and affluence on environment in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 5: 767-773. (in Chinese)
- [16] 史志伟,韩敏. ESN 岭回归学习算法及混沌时间序列预测[J]. 控制与决策,2007,3: 258-261,267.
SHI Z W, HAN M. Ridge regression learning in ESN for chaotic time series prediction [J]. Statistics and Decision, 2007, 3: 258-261, 267. (in Chinese)
- [17] 梁小珍,陆凤彬,李大伟,等. 工程建设标准对我国经济增长影响的实证研究——基于协整理论、Granger 因果检验和岭回归[J]. 系统工程理论与实践,2010,5: 841-847.
LIANG X Z, LU F B, LI D W, et al. Effect of chinese engineering construction standards on economic growth: empirical research based on cointegration test, granger casualty test and ridge regression [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 5: 841-847. (in Chinese)

(责任编辑 张 蕾)