

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

陈操操^{1,2*},刘春兰^{1,2},汪浩^{1,2},关婧^{1,2},陈龙^{1,2},王海华^{1,2},张继平^{1,2},李铮^{1,2},刘晓洁³ (1.北京市环境保护科学研究院,北京 100037; 2.国家城市环境污染控制工程技术研究中心,北京 100037; 3.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要: 为了量化人口、城市化和技术等因素对城市碳排放的影响,以北京市为研究对象,引入修正的碳足迹方法计算 1990~2011 年城市能源消费碳足迹,采用 STIRPAT 模型和偏小二乘模型对城市能源消费碳足迹的影响因素进行评估。结果显示,城市化、人均收入、人口是碳排放最主要的正向驱动因素,而能源消费强度、产业结构和研发投入比重等因素导致碳排放降低。北京市二氧化碳排放不存在环境库兹涅茨曲线,城市碳排放总量虽然整体状况还在增加,但增长速度在逐步放缓,经济发展与环境保护尚未实现协同。根据模拟结果,降低碳排放和建设低碳城市的建议是发展集中型和紧凑型的城镇功能组团,控制人口过快增长,合理引导居民绿色消费,依靠科技创新和技术进步。

关键词: 碳足迹; STIRPAT 模型; PLS 模型; 影响因素; 北京

中图分类号: X703.5 **文献标识码:** A **文章编号:**1000-6923(2014)06-1622-11

Examining the impact factors of energy consumption related carbon footprints using the STIRPAT model and PLS model in Beijing. CHEN Cao-cao^{1,2*}, LIU Chun-lan^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, GUAN Jing^{1,2}, CHEN Long^{1,2}, WANG Hai-hua^{1,2}, ZHANG Ji-ping^{1,2}, LI Zheng^{1,2}, LIU Xiao-jie³ (1.Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2.National Urban Environmental Pollution Control Engineering Research Centre, Beijing 100037, China; 3.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). *China Environmental Science*, 2014,34(6): 1622~1632

Abstract: To explore the effects of population, urbanization, and technology on metropolitan's CO₂ emissions, we examine Beijing city's carbon footprints of energy consumption during 1990-2011 using the revised footprint method. In particular, the influence factors of the carbon footprint of urban energy consumption are evaluated by STIRPAT model and PLS model. The results show that: urbanization, affluence, and population are the most important positive driving factors of Beijing city's CO₂ emissions, while the impacts of energy consumption intensity, industrial structure and R&D proportion in GDP are negative; the inverted U-shaped relationship between carbon footprints and affluence is not strongly supported by the estimation. The city's carbon footprints still increase, but the growing speed begins to slow down, which shows that the economic development and environment improvement have not achieved a coordinated effect.; simulation result further suggests that applied measures of integrated and compact urban function units, controlling excessive growth population, reasonable consumption for city dwellers, and technology innovation can help to reduce carbon dioxide emissions and develop the low-carbon city in Beijing.

Key words: carbon footprint; STIRPAT model; PLS model; impact factors; Beijing

气候变化是人类当今面临的最严峻挑战之一,由气候变化引发的“生态系统恶化”等问题严重威胁着人类的生存和发展。我国既是温室气体排放大国,也是发展中大国,随着能源消费的不断增长,温室气体总排放量将不可避免仍会有较大幅度增长,从发展低碳经济和应对气候变化的

内在需求出发,制定适当政策和采取有效措施,尽

收稿日期: 2013-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(41001380,41101116);北京市自然科学基金(8122023);北京市科技新星计划(2010B023);中国清洁发展机制基金(1213075)

* 责任作者, 副研究员, chencaocao@cee.cn

量减少温室气体排放的增速与增幅尤为重要.如何有效降低温室气体排放成为学术界研究的热点,关键问题之一在于对二氧化碳排放的影响因素及其效用分析,这直接关系到减排政策的制定与措施实施.

人类活动温室气体排放主要受到人口、富裕度及技术进步等驱动因素影响.围绕这一问题,IPAT 模型及其衍生的 STIRPAT 模型及变形是主流的研究手段之一.20 世纪 70 年代美国生态学家 Ehrlich 和 Holdren^[1]提出的 IPAT 模型($I=PAT$)以研究经济活动与环境压力之间的关系,模型表明人口(P)、人均财富(A)和技术(T)三者之间相互作用会对环境产生重要影响.IPAT 模型的分析框架简洁、直观而开放,涵盖了人口、经济和技术 3 个主要影响因素,因此在环境问题上被广泛应用^[2-3].IPAT 模型属于恒等式模型,驱动力或环境影响因素相互之间存在等比例的推导关系,无法说明单一因素对环境压力的影响,与模型的假设不符^[4-6].为了解决上述问题,基于 IPAT 模型的非线性随机回归 STIRPAT 模型被提出,并对其不断改进.例如,Dieta^[7]在 IPAT 模型的框架上增加了随机项误差,研究人口、富裕度和技术对 CO₂ 排放的影响,研究结果发现人口与富裕度对排放的弹性均略高于 1.Shi^[6]利用 STIRPAT 模型研究不同收入国家人口、富裕度、工业和服务业比重对 CO₂ 排放的影响,引入一阶自回归项以消除自相关,他发现人口对 CO₂ 的排放弹性在不同收入国家间存在异质性,平均弹性为 1.42,其中不发达国家人口弹性系数接近 2,发达国家则在 1 以下,其结论支持马尔萨斯人口论的观点.Poumanyong 等^[8]研究城市化对能源利用和 CO₂ 排放的效用,他使用 1975~2005 年 99 个国家的时间序列,发现在低收入国家城市化增加降低能源使用和 CO₂ 排放,但在中等和高收入国家,城市化水平与能源消费水平呈正相关关系.Lin 等^[9]采用 STIRPAT 模型研究 1978~2006 年期间中国人口、城市化水平、人均 GDP、工业化水平和能源密度等因素对环境的影响,结果发现人口和城市化水平是环境压力排放前两位的重要因素,相应弹性分别为 1.51 和 0.48.国内学者针对国家和区域也开展同类研究^[10-16].

通过已有文献可见,STIRPAT 被广泛应用于评估人口、富裕度和其他因素对环境的影响,大量的研究集中于讨论国家层面或跨国家层面研究范畴,但在区域和城市层面开展的相关研究较少,城市化与碳排放及城市不同发展阶段与碳排放之间关系仍不明确^[8,17-18].已有研究在碳排放因素选取方面,呈现不一致或不全面的特点,有必要选取更为全面的影响因素构建影响因素模型.

城市作为居民聚集地,是人类生产生活主要空间载体和碳排放关键地理单元,在碳减排和应对气候变化领域能够发挥重要的作用^[19-20].北京是中国的首都,亦是国际大都市,具有特殊的政治地位,开展北京市碳足迹及影响因素研究,探讨如何在响应国家的宏观政策的同时,有效控制碳排放增量,积极向低碳城市转型,为国内其他省市提供示范,具有重要的理论和现实意义.基于以上考虑,本研究以北京市为例,以能源消费碳排放表征城市碳足迹,选择一系列有代表性的典型影响因素指标,利用 1990~2011 年长时间序列,采用 STIRPAT 模型和偏小二乘模型(PLS)建立北京碳足迹和影响因素之间的量化模型,根据模型中回归系数大小考察评估因子和 CO₂ 排放的相互影响及大小排序,为城市碳减排对策提供建议.

1 研究方法

1.1 能源消费碳足迹

碳足迹揭示了终端消费领域人类活动对全球气候变化的影响,是近年学术界新兴的研究热点^[21].目前碳足迹缺乏学术上明确的定义,在许多情况下碳足迹被视为生产活动中直接和间接产生的 CO₂ 物理排放量或排放当量^[22].碳足迹主要的研究方法有三类:过程分析法、投入产出和混合法^[23-25].过程分析法基于生命周期评估方法和自下而上的研究思路,对数据的需求量很高;投入产出法依靠投入产出模型和自上而下的核算法则,适合于宏观区域产业分析,容易受到投入产出表数量限制;混合法是过程分析法和投入产出法的结合,目前的研究仍不多见^[22,26].

能源消费碳足迹能够反映一个地区环境压

力变化,为区域可持续发展提供决策依据^[13].本文参考联合国环境署(UNEP)和联合国人居署(UN-HABITAT)、本地可持续发展组织(ICLEI)及世界资源研究所(WRI)等制定的评估方法^[27-28].城市碳足迹可分为3个层次:层次1为发生在城市行政边界内部的直接碳排放,如工业和服务业生产排放;层次2为发生在城市行政边界外部由城市活动导致的非直接排放,仅限于电力和热力消费;层次3将非直接排放的范围扩展到发生在城市边界外部,除层次2外所有由于城市消费带来的蕴含的上下游碳排放.目前大多数国际大城市广泛采用的城市碳足迹评估方法评估范围为层次1和层次2^[29].根据数据的可得性和北京实际情况出发,本研究以城市能源直接消费和间接消费(外调电)所产生的CO₂排放作为城市碳足迹(层次1和层次2),评估1990~2011年北京市能源消费碳足迹.

1.2 STIRPAT 模型

本研究选择了Dietz等提出的改进后的非线性随机回归STIRPAT模型^[4,30].STIRPAT模型抛弃单位弹性的假设,加入随机性从而便于实证分析,并且能通过技术项的分解,实现对城市化、产业结构等各种类型驱动因素对环境压力影响的评估^[31].STIRPAT模型能够克服IPAT模型“各影响因素同比例影响环境压力”假设的不足,是对IPAT模型的修正和扩展^[4],具体公式表达如下.

$$I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i \quad (1)$$

式中: I 、 P 、 A 、 T 分别表示环境压力、人口数量、人均财富和技术; a 是模型系数; b 、 c 、 d 分别是人口数量、人均财富和技术等驱动因素的指数; e 为模型误差.下标 i 表明不同的观测单元各异的模型参数.假设 $a=b=c=d=e=1$,STIRPAT模型即还原为IPAT等式,保留了IPAT模型中人文驱动力的相乘关系.STIRPAT模型属于多自变量非线性随机模型,在对模型(1)两边同时对数变化处理后变为模型(2).

$$\ln I = \ln a + b(\ln P) + c(\ln A) + d(\ln T) + \ln e \quad (2)$$

以 $\ln I$ 为因变量, $\ln P$ 、 $\ln A$ 、 $\ln T$ 作为自变量, $\ln a$ 作为常数项, $\ln e$ 作为误差项.根据弹性系数概念,当其他影响因素保持不变时,驱动力影响因素(P

和 A)每变化1%,将分别引起 I 变化 $b\%$ 和 $d\%$.STIRPAT模型允许对模型扩展,通过增减或分解因素,提高模型的分析解释能力.

1.3 模型影响因子

城市碳足迹影响因素存在多个层次,基于已有研究成果,结合北京市具体情况,本文对STIRPAT模型因子进行了扩展,选取了人口因素(人口规模、城市化水平)、人均收入水平、技术进步水平(产业结构、单位GDP能耗、科技研发投入占GDP比重)等变量.

人口因素 P 分解为人口数量 P (万人)以及城市化率 $Ur(\%)$ 两项,城市化率虽然经常作为经济指标出现,但实际是一个综合体现城市人口密度、生活方式习惯的人口指标^[32],并最终影响城市碳排放,城市化率 Ur 采用城镇人口数占总人口数的比例表示,反映城市人口的环境影响.城市人口人均能源消费一般能达到农村人口的3.5~4倍,对城市整体碳排放影响很大^[33-34].

人均收入水平 A 分解为单位人均GDP(万元/人,2000年不变价)以及单位人均GDP平方两项,人均GDP是地区国民富裕程度的重要体现,也是导致环境问题的主要驱动力.许多研究成果显示,低收入国家人均富裕程度提高会增加碳排放量,然而高收入国家随着人均GDP增加会降低碳排放^[6].在本模型中加入人均GDP二次项,目的是分析随单位人均GDP的增加,北京市能否出现倒“U”型环境库兹涅茨曲线.

技术因子 T 的选取较为复杂,包括第二产业比重、第三产业比重、单位GDP能耗强度、研发经费占当年GDP比重.第二、三产业比重反映产业结构变化对城市碳排放的影响,以制造业为基础第二产业相比第三产业要消耗更多的自然资源,一般随着工业和服务业比重消长变化,碳排放将发生较大的改变.北京市第三产业比重自1994年开始已超过第二产业,但目前仍约占30%.本文将第二产业比重和第三产业比重均作为反映产业结构变化的技术指标纳入模型当中.单位GDP能耗强度反映区域能源集约利用水平,在已有研究中作为技术指标多次出现.研发经费占当年GDP比重指标衡量一个地区社会科技创

新能力的指标,北京市研发经费占 GDP 比重全国最高,2010 年已经达到 5.5%,与世界发达国家研发经费 5%的 GDP 占比持平,也纳入到本次模型的变量中来.

综合以上考量,最终得到的非线性城市碳足迹模型如式(3)所示.具体模型变量可见表 1.

$$\ln\text{CO}_2 = \ln a + b_1(\ln P) + b_2(\ln Ur) + c_1(\ln A) + c_2(\ln A)^2 + d_1(\ln \text{Ind}2) + d_2(\ln \text{Ind}3) + d_3(\ln E) + d_4(\ln \text{RD}) + \ln e \quad (3)$$

表 1 模型变量

Table 1 Description of variables in the model

变量符号	变量名称	变量说明	单位
<i>I</i>	二氧化碳排放量	城市范围 1 和范围 2 碳排放,包括外调电	万 t
<i>P</i>	城市人口规模	城市人口数据	万人
<i>Ur</i>	城市化率	城市人口占城市总人口的比重	%
<i>A</i>	人均 GDP	人均 GDP	元/人,2000 年不变价
<i>Ind2</i>	二产比重	第二产业占总 GDP 比重	%
<i>Ind3</i>	三产比重	第三产业占总 GDP 比重	%
<i>E</i>	单位 GDP 能耗	单位 GDP 标煤能耗量	t 标煤/千元,2000 年不变价
<i>RD</i>	研发费用比重	研发费用占 GDP 比重	%,2000 年不变价

1.4 数据来源

采用 1990~2011 年数据,能源消费实物量的数据源于北京市历年的能源平衡表以及分行业部门的能源消费量.人口总量、人均 GDP、城市化率、第二、三产业比重等所需数据源于《北京市统计年鉴》^[35].为剔除物价上涨因素,GDP 采取 2000 年不变价进行换算.为消除变量之间的量纲关系,使数据具有可比性,基于原始数据列的均值和标准差对数据进行标准化.

本研究的能源消费指能源的终端消费量,考虑到历史数据一致性和数据代表性,能源数据包括原煤、汽油、柴油、煤油、天然气和外调电力 6 种能源,能源消费的实物量来源于历年的《北京市统计年鉴》^[35].能源消费碳排放量采用《IPCC 国家温室气体排放清单指南》提供的排放系数法^[36],碳排放量等于各类能源消费量与相应排放因子的乘积.与前人研究有所区别,本文能源排放因子采用北京市本地能源消费的实测因子^[37].以往国内研究一般采用折标后的标煤计算碳排放^[11,13,38],本研究采用实物量进行评估,采取实物量作为活动水平数据与本地化排放因子匹配有助于提高评估精度,能够为后续统计实证模型提供更好的输入参数.

2 实证分析

2.1 城市碳足迹评估

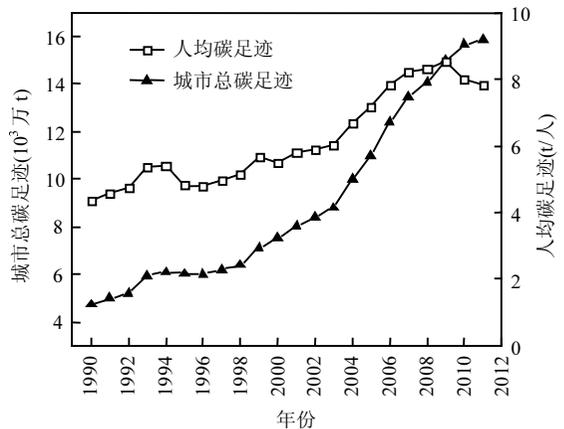


图 1 城市碳足迹和人均碳足迹变化(1990~2011)

Fig.1 Variation of city's total carbon footprints and per-capita footprints(1990~2011)

根据本文界定的碳足迹计算方法,北京市 1990~2011 年城市总碳足迹由 $4723.95 \times 10^4 \text{t}$ 上升到 $15830.62 \times 10^4 \text{t}$ 二氧化碳当量($\text{CO}_2\text{-eq}$),总碳足迹增加了 2.35 倍,年平均增长率为 6.09%.人均碳足迹由 4.35t/a 上升到 7.84t/a,人均碳足迹增加了 80.29%,年平均增长率为 3.00%.从总体变化趋势看,人均碳足迹增长速度低于城市总碳足迹的增幅.城市总碳足迹呈现两阶段明显的变化,1990~2002 年城市总碳足迹上升斜率较平缓,2002 年以后增长幅度明显加快,2008 年北京奥运会极大的带动了北京市基础设施建设,相关能源和物质消耗庞大,是此两阶段斜率变化主要原因.

人均碳足迹上升变化平缓,没有明显的阶段划分,北京市人口基数大,外来人口多增长快,导致人均碳足迹增长缓慢,近年由于北京市不断加强节能减排措施力度,城市总碳足迹增长放缓,人均碳足迹还出现了下降的势头。

2.2 最小二乘回归模型预评估

首先使用最小二乘回归模型法进行预评估(表 2),最小二乘回归模型的回归拟合优度 $R^2=0.996$,调整后拟合优度 $Adj R^2=0.989$,通过了 0.001 显著水平 F 检验,表明自变量和因变量的线性模型存在且拟合度较高。然而,lnUrb、lnE 等模

型自变量的回归系数无法通过 0.05 显著性水平的 t 检验。通过检验模型自变量相关关系矩阵,各变量之间存在较强的相关性,lnp,lnA,(lnA)²,lnUr,lnInd2,lnInd3 相互之间均能通过 0.01 显著性水平的相关分析检验,方程很可能存在多重相关性。目前对多重相关性常见诊断方法是方差膨胀因子(VIF),一般认为如果自变量最大 VIF 超过 10,表示多重相关性将严重影响最小二乘的估计值。计算结果显示 7 个自变量的 VIF 值均远大于 10。因此无法采用常见的最小二乘模型估计回归系数,必须消除自变量的多重共线性才能得到稳健的结果。

表 2 最小二乘回归模型的拟合结果

Table 2 Analysis results of OLS regression model

自变量	B	SE(B)	Beta	t	Sig	VIF
lna	9.613	6.764	-	1.421	0.177	-
lnP	0.817	0.419	0.382	1.952	0.071	73.956
lnA	1.266	0.407	1.648	3.107	0.008	544.765
(lnA) ²	-	-	-3.111 ^a	-1.603	0.133	8107.513
lnUr	-0.812	1.436	-0.111	-0.566	0.581	74.267
lnInd2	-0.863	0.417	-0.573	-2.069	0.058	148.450
lnInd3	-1.111	0.327	-0.570	-3.392	0.004	54.692
lnRD	-0.023	0.054	-0.032	-0.426	0.677	11.019

注:(lnA)²与lnA存在很强的相关性,其膨胀因子VIF高达10668.056,被最小二乘回归模型剔除

2.3 偏小二乘回归模型检验

偏小二乘回归模型(PLS)主要用于解决多元回归中变量多重相关性和样本容量较少、自由度较低等实际问题^[39]。偏小二乘回归的原理是将多元回归、主成分分析、典型相关分析结合起来,分别提取自变量 X 和因变量 Y 的成分因子 t_i 与 u_i ,各提取成分要求相互独立,尽可能大的反映 X 与 Y 变量的变异信息,同时自变量成分 t 对 u 又有很强的解释能力,从而建立成分因子与自变量的回归方程。首先需要将所有自变量和因变量原始数据标准化,其次提取第一个成分 t_1 与 u_1 ,建立 X 对 t_1 及 Y 对 t_1 的回归,如果回归方程达到满意的精度,算法终止,否则利用 X 和 Y 被 t_1 解释后残差信息进行第二轮成分提取,反复直至达到一个满意的模型精度。本文将重点考察人口规模、人均收入水平、城市化等影响因子对城市碳排放之间的相关性和回归关系,分析平台为 Simca-P。

首先通过 t_1/u_1 散点图和 t_1/t_2 散点图(或 T^2 椭圆图)两种方式判断 PLS 模型拟合的好坏。图 1 可见自变量提取的成分 t_1 与因变量提取成分 u_1 之间存在显著线性关系,线性拟合度 R^2 为 0.954,证明 t_1 和 u_1 能够很好的代表自变量 X 和因变量 Y ,采用 PLS 方法建立线性模型是合理的。 t_1/t_2 散点图被用来在平面上观察样本点的分布情况和相似性结构^[39],可见 PLS 模型的样本点分布在椭圆之内且基本均匀,并未发现奇异点,表明本研究模型样本取值合理。

通过交叉有效性评估提取自变量成分的数量,成分 t_i 的交叉有效性记为 Q_i^2 ,使用 m 个成分 t_1, t_2, \dots, t_m 建立偏小二乘模型的累积交叉有效项 $Q^2(\text{cum})$ 。从表 3 可以看出,当提取到第 3 个成分时, Q^2 已经为负值,其他第 1、2 成分 Q^2 均大于临界值 0.0975,累积交叉有效项在第二成分时达到 0.985,因此提取 2 个成分即可使模型达到

满意的精度.此时方程对城市碳排放的解释能力为 0.988,偏小二乘模型拟合达到了较高的精度.与此同时通过模型预测值与真实值的散点

图考察拟合效果(图 3),真实值与模型预测值显示出良好的线性关系,表明 PLS 模型的拟合非常理想.

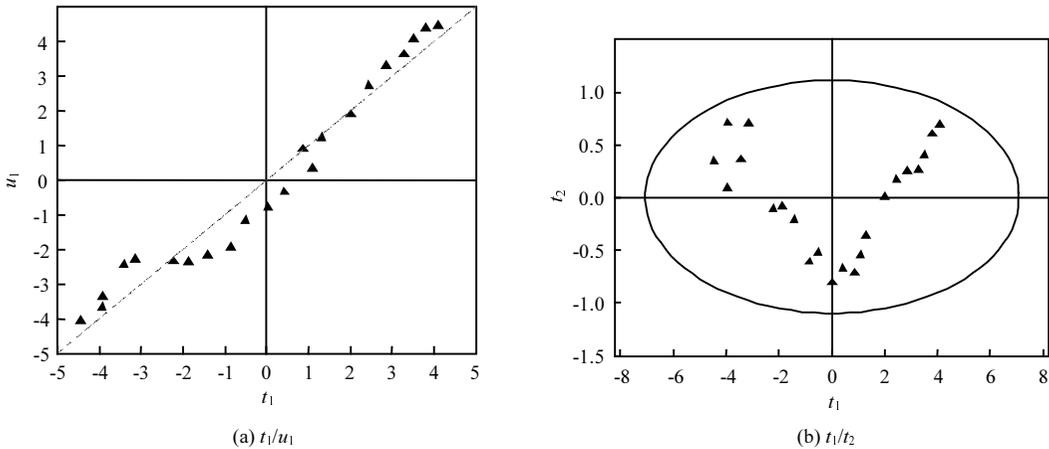


图 2 t_1/u_1 散点图与 t_1/t_2 散点图
Fig.2 Scatter plots of t_1/u_1 and t_1/t_2

表 3 最小偏二乘模型交叉有效性

Table 3 Results of cross validation by PLS model

成分数 m	交叉有效性 Q^2	累积交叉有效性 Q^2	方程拟合度 R^2
1	0.952	0.952	0.954
2	0.696	0.985	0.988
3	-0.003	0.985	0.990

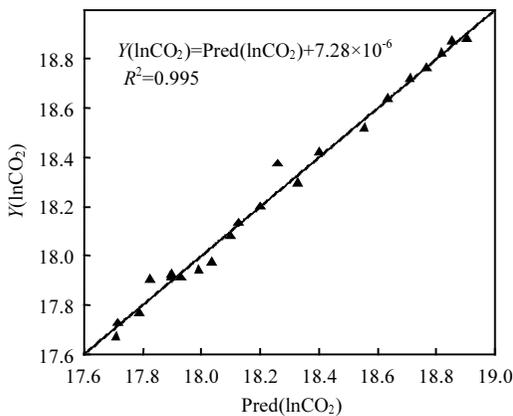


图 3 最小偏二乘模型城市碳排放预测值与真实值散点图
Fig.3 Scatter plots of predicted value and observed value of carbon footprint by PLS model

偏小二乘模型回归系数拟合结果如表 4 所示,各回归系数符号符合城市增长模式和经济学意义上检验.众多影响因子中人口、人均收入水平、城市化水平等增加会促进城市碳排放量扩大;而万元 GDP 能源强度、二产和三产比重以及研发投入比重升高会降低城市碳足迹.

从模型系数的大小上看,城市化水平是影响北京市能源消费碳排放量的最主要和关键正向因素,城市化水平对城市碳足迹弹性最高,北京市城市化水平每增加 1%,碳足迹将增加 2.20%.这表明国内大都市城市化水平提高是造成能源消费碳排放增加的重要诱因.如果按照城市发展与环境演化关系理论解释,城市化对环境影响的驱动与抑制作用并存.从城市化发展由初级到中级阶段,城市化导致的环境影响和压力会随之增加,但当城市化进一步发展到高级阶段时,居民环保意识不断增强,逐渐通过技术革新、集约化发展以及行业结构转型等方式,为碳排放集中控制提供了方便和可能,从而降低城市化产生的环境影响^[8].但在实证研究中,国内外学者存在不同的研究结论.例如,York 等^[4]发现城市化显著增加城市碳足迹,在其进一步研究中指出,即便在现代化都

2.4 偏小二乘模型回归结果分析

市地区,城市化仍会刺激能耗和碳排放增加^[41]. Boserup^[42]认为城市人口密度增长会带来城市文明传播和技术水平的提高,高素质人口增多对环境压力有正向的促进作用. Shi^[6]针对全球不同国家和地区样本研究,认为高收入地区城市化对碳排放影响要小于低收入地区.北京作为我国经济发达地区之一,2010年人均GDP突破10000美元,第三产业比重超过75%,按照世界银行的标准已属于中等富裕国家水平,达到城市化演进后期阶段.但是本研究模拟结果显示北京市城市化对碳排放推动作用依然非常明显,高级城市化阶段对碳排放抑制作用尚未体现.燕华^[10]对上海的研究,也有相似的结论,城市化仍是国内发达大都市碳排放最主要的驱动因素.这说明了国内大都市虽然城市化水平很高,居民收入或产业结构已接近国外中等富裕国家水平,但是城市化仍体现为碳排放的正向促进作用.一方面原因是国内城市持续以摊大饼的方式膨胀,城区空间持续增长,城市化推进导致基础设施需求继续增大,消耗大量的水泥和钢铁,刺激水泥、钢铁等一系列基础原材料行业碳排放增长^[43];另一方面城市中居民消费水平提高和生活方式改变,刺激住宅、交通、娱乐等能源消耗直接与间接需求增长^[34,44].

表4 最小二乘回归系数拟合结果

Table 4 Coefficients results of PLS regression model

变量	未标准化系数	标准化系数
常数项	1.211	45.528
人口 $\ln P$	0.493	0.230
富裕度 $\ln A$	0.134	0.175
富裕度平方项 $(\ln A)^2$	0.026	0.220
万元 GDP 能源强度 $\ln E$	-0.147	-0.150
城市化水平 $\ln Ur$	2.202	0.300
二产比例 $\ln Ind2$	-0.138	-0.092
三产比例 $\ln Ind3$	-0.104	-0.054
研发投入比重 $\ln RD$	-0.092	-0.129

人口数量对碳排放影响也较为显著,弹性系数达到0.493,仅次于城市化指标.北京人口总量已超过2000万,外来人口快速增长是推进北京人口总量增长和城市化进程的重要因素.1990~2011年北京市年均常住人口增长率达到3.05%,

总人口增加了87.85%.2000~2011年增加了637万人,是前一个10年增加人口数的两倍多.优势的区位和经济条件不断吸引大量外来人口涌入北京.外来人口增加为城市发展做出巨大贡献的同时,也对城市的资源、环境形成巨大的压力,庞大的城市人口基数必然导致城市碳排放总量的刚性增加.

人均收入水平是北京城市碳排放另一个重要指标,其对北京城市碳排放的弹性可以通过York^[4]提出的方法计算得到 $(0.134+0.052\ln A)$.按2011年人均GDP估算,人均GDP每增高1%,北京城市碳排放增加0.225%(2000年不变价计算).人均收入水平对应富裕程度,与消费模式及其随之的环境效应有关.通常富裕度高的城市在基础设施、交通及消费需求等比富裕度低的城市消耗的资源与能源强度更高,产生环境效应影响要大,因此碳排放量也更高.但在发达国家紧凑型城市也存在截然相反的情况,紧凑型城市人均收入水平较高,人口和城市规模低而聚居,出行距离短,热力和电力等供应损耗少,城市公共交通、教育等基础设施能够发挥较高的功效,并且高科技产业和第三产业的发展,以及相对清洁低碳的天然气等现代能源占据城市能源消费的主导地位,因此该类城市能够在收入水平提高的同时,拥有较低的环境影响^[45].北京市不属于紧凑型城市,本研究中人均收入对城市碳排放表现为促进作用.随着北京市人均收入不断攀升,城市碳排放并没有得到明显的缓解,但是城市碳排放的弹性系数增幅已经出现明显的减缓势头,多年平均增幅保持在0.006以下,且在最近5年增幅下降很快(表5).说明城市居民消费没有随收入水平提高而激增,正在向绿色消费和低碳消费等好的方向转变.

另外,偏小二乘模型中 $(\ln A)^2$ 的回归系数数值为正,意味着在研究时段内北京市碳排放不存在环境库兹涅茨曲线,经济发展并未带来城市碳足迹减少的拐点.此结论在对国内上海、沈阳、苏锡常地区等相似研究中存在相似情况^[11-12,14],反映出国内各省市经济发展与环境保护尚未达到协同发展.

表 5 不同人均 GDP 对城市碳排放的影响弹性系数

Table 5 The elasticity coefficients of city's carbon dioxide emissions for different units of per-capita GDP

A	10.215	11.144	12.313	13.704	15.401	15.511	16.795	18.781	20.472	22.494
EE_A	0.255	0.259	0.265	0.270	0.276	0.277	0.281	0.287	0.291	0.296
ΔEE_A		0.005	0.005	0.006	0.006	0.000	0.004	0.006	0.004	0.005
A	25.497	27.668	30.039	33.441	36.391	40.002	44.340	46.609	49.607	48.946
EE_A	0.302	0.307	0.311	0.317	0.321	0.326	0.331	0.334	0.337	0.336
ΔEE_A	0.005	0.004	0.004	0.006	0.004	0.005	0.005	0.003	0.003	-0.001

注: A 为人均GDP(千元/人,2000年可比价), EE_A 为弹性系数, ΔEE_A 为弹性系数变化值

负向因子体现为技术因素对碳排放反向抑制作用,回归系数绝对值从高往低排序为:万元 GDP 能耗强度(0.147),二产比重(0.138),三产比例(0.104),研发投入比重(0.092)。万元 GDP 能耗强度是反映地区能源消费构成、经济增长方式、设备技术装备水平及能源利用效率等的综合性指标,是二氧化碳减排的主要动力。得益于清洁能源改造工程的实施,以及落后产能退出、搬迁调整等工业政策的实施,北京城市万元 GDP 产值能耗下降幅度自“十一五”以来一直处于全国首位。但是能源强度对城市碳排放带来的负向作用明显不足以抵消城市化、人口、收入水平等其他因素引起的二氧化碳增长。

北京市第二、三产业对城市碳减排的影响作用仍比较低,第二产业对碳排放抑制作用要高于第三产业。与其他地区工业能耗居高不下不同,北京市拥有独特的区域特点。北京市第三产业在国民经济中比重远高于第二产业,但研究期间内第二产业节能降耗的措施和力度要大于第三产业。北京通过大力实施第二产业“以退促降”的产业政策,停产搬迁高耗能企业,淘汰生产落后工艺,工业等高耗能行业能耗和温室气体排放下降迅速,1990 年工业在能源终端消费中的比重 62%,到 2011 年下降到仅为 30.86%。自焦化厂、首钢和化工企业等主要“两高一资”企业实施搬迁或停产措施以后,未来北京市继续通过退出或调整第二产业来节能减排的空间已所剩无几。尤其传统的第二产业对能源消耗和使用,造成大量碳排放的情形,已经被北京市第三产业对能源大量需求和消费取代,因此第三产业碳排放变得异常突出^[46]。从国际经验看,第三产业消耗的能源和资

源比第二产业少,其比重上升有利于降低环境影响,北京市进一步推动产业结构优化,需要将工业制造业发展面向高端,重点依赖现代服务业和高新技术产业,作为节能减排的主要途径。

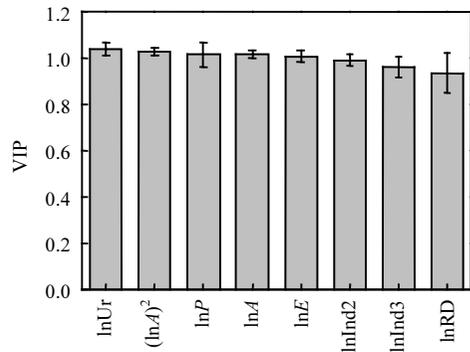


图 4 各模型变量的投影重要性指标 VIP

Fig.4 The VIP value of each variables in PLS model

从研发投入比重对城市碳排放影响看,在模型所有抑制因素中影响最低,表明科技进步对北京城市碳排放起到作用相对薄弱。北京市多年来一直是全国科技中心和技术创新基地,高校、科研院所和高端人才数量密集,科研设施先进,技术领域全面,研发经费及科技人员数量等都在全国名列前茅。但是北京市在科技创新方面存在一定问题,体现在缺乏协同创新机制,条块分割加剧了不同科研机构间的协调成本,企业不是创新的主体,科技创新的产业化效果不突出,重技术引进轻技术消化等^[47]。这些不利因素严重降低了科技创新在北京市节能降碳中发挥的作用。在全球范围内看,科技创新是节能减排的关键所在,从节能技术到新能源开发利用、节能产品和服务已经成为

各国低碳能源战略的重点.北京市应整合科技资源,加强并协调区域低碳技术创新要素间互动,推进产学研合作和技术转移,加强低碳产业布局和制度创新,提高低碳竞争力,使科技进步与城市低碳建设更紧密的结合.

为了更好的测度各个自变量 x_j 对偏小二乘模型因变量的作用,本研究采用变量投影重要性指标 VIP.VIP 反映每个自变量在解释因变量时作用的重要性,如果某自变量拥有相对较小的 VIP 指数值(小于 0.8),认为该变量对模型的解释度不高,可考虑剔除该自变量,VIP 指数表达式定义如下.

$$VIP_j = \sqrt{\frac{p}{Rd(Y;t_1, \dots, t_m)} \sum_{h=1}^m Rd(Y;t_h) w_{hj}^2} \quad (1)$$

式中:VIP_{*j*} 为 x_j 变量的重要性指数;Rd($Y;t_1, \dots, t_m$) 为偏小二乘模型的累积解释能力, t_1, \dots, t_m 为自变量提取出的成分; w_{hj} 为轴 w_h 的第 j 个分量,被用于测量 x_j 对构造 t_h 成分的边际贡献.图 3 为偏小二乘模型各个系数的 VIP 值图.VIP 计算模型解释能力结果与回归系数拟合拥有较好的一致性.可见每个变量的 VIP 均大于 0.9,变量在解释因变量北京城市碳排放能力作用较强.所有变量中,城市化拥有最高的解释力度,其次为富裕度指标、人口、单位 GDP 能耗、二产比重、三产比重和研发投入比重.

3 讨论

本文采用城市直接能源消费碳排放和基于外调电力的间接能源碳排放估算的城市碳足迹,评估范围和计算结果比以往基于直接排放评估大,与国际通行规则一致,在国内外近期研究得到越来越多的应用^[20,37,48].在模型模拟方面,对 STIRPAT 模型因子进行了扩展,将人口因素(人口规模、城市化水平)、人均收入水平、技术进步水平(产业结构、单位 GDP 能耗、科技研发投入占 GDP 比重)等变量纳入驱动变量范围,扩充了碳排放影响驱动力指标体系,考虑更为全面.

本文在诸多方面值得进一步探讨.一个值得深入研究的问题是技术因素因子的选择,一方面不同研究者对技术因子选取的具体指标不同,可

能对研究结果产生一定的影响;另一方面由于 STIRPAT 模型扩展度高,有研究者提出将技术因素 T 归并到误差项 e 中成为涵盖文化、制度、组织等综合因素,而不进行单独估计^[6-7,30].采取后一种方法的优点是以误差项简化模型因子,缺点是无法区分细微因素的影响.本文是在总结前人研究成果的基础上提出技术因子指标,下一步的改进方向是利用不同的技术因素指标集合来筛选和研究其与城市碳足迹的相互关系.

4 结论

4.1 基于已有研究成果和北京市具体情况,对常规 STIRPAT 模型因子进行了扩展,选取了人口因素、人均收入水平、技术进步水平等变量,建立了改进后的北京市非线性碳足迹 STIRPAT 模型.偏小二乘模型的应用既保证了回归变量的充分利用,又避免了多重共线性的产生.

北京市 1990~2011 年城市总碳足迹由 $4723.95 \times 10^4 \text{t}$ 上升到 $15830.62 \times 10^4 \text{t}$ 二氧化碳当量($\text{CO}_2\text{-eq}$),总碳足迹增加了 2.35 倍,年平均增长率为 6.09%.人均碳足迹由 4.35t/a 上升到 7.84t/a,人均碳足迹增加了 80.29%,年平均增长率为 3.00%.

4.2 基于 PLS 模型和 STIRPAT 模型的拟合结果通过了各项显著性检验,北京城市碳足迹主要驱动因子包括城市化水平、人均收入、人口、能源消费强度、产业结构和研发投入比重等,各驱动因子系数符号与大小满足城市增长模式和经济学意义上的检验,与北京城市发展实际情况吻合.

4.3 从驱动因子影响程度和方向上看,城市化水平、人口、人均收入水平等增加会促进城市碳排放量扩大.其中城市化水平对促进北京市能源消费碳排放量作用最大,其次为人均收入水平和人口,对城市碳排放的弹性系数分别为 2.20、0.493 和 0.225.就北京而言,尚未扭转传统摊大饼式城市发展思路,快速的城市化过程加大的基础设施建设和能源需求,外来人口涌入城市增加了资源环境压力,另外生活水平和人均消费水平提高等诱因都在推动北京市碳排放水平持续增高.从城市碳排放与人均收入水平关系发现,研究期

内北京市二氧化碳排放不存在环境库兹涅茨曲线,与国内其他省市已有研究结论相似,经济发展与环境保护尚未实现协同.需要指出北京城市碳排放总量虽然整体状况还在增加,但增长速度在逐步放缓.

4.4 万元 GDP 能源强度、二产和三产比重以及研发投入比重等驱动因子能够抑制城市碳足迹增加.其中万元 GDP 能耗强度负向影响力最高,二产比重、三产比重和研发投入比重影响程度依次降低,它们对城市碳排放的弹性系数分别为 0.147、0.138、0.104 和 0.092.代表地区能源消费构成、经济增长方式、设备技术装备水平及能源利用效率等综合性指标的单位能耗强度,对北京市碳减排的作用最大,但仍不足以抵消城市化、人口、收入水平等其他因素引起的二氧化碳增长量.此外过去的十几年,因奥运年份等短期政策强化导致城市二产比重降低,对碳减排起到了积极的作用,但炼焦、钢铁、化工等行业从首都搬迁或停产后,继续通过二产减排的空间和潜力不大.未来相当长一段时期,提高以现代服务业为代表的第三产业比重,提升质量,培育发展高新技术产业和节能环保产业,鼓励和扶持低碳产业发展应当得到更多的重视.

4.5 提出以下政策化建议.第一,控制城市化速度与水平对影响北京城市碳排放具有重要意义,有必要科学合理规划低碳城市,在城市化空间结构方面,大力发展集中型、紧凑型及组团型的城镇空间布局模式来减少碳排放,同时打造低碳建筑和低碳交通体系.第二,北京人口基数巨大,在未来一段时期内,城市人口总量仍会保持增长,人口对资源、能源需求和相应的碳排放也会相应增长.因此在生育自愿的情况下,适当的控制人口对于减少城市碳排放压力有所帮助,其中重要措施之一是完善户籍制度,发挥制度在引导、服务和管理外来人口方面的作用,另外通过产业转移,向周边地区疏导人口,控制城市人口总量.第三,合理引导居民消费,鼓励居民向绿色消费和低碳消费发展.第四,依靠科技创新和技术进步来建设低碳城市,北京市需要发挥本地科技资源优势,吸收和开发先进低碳环保技术,加强并协调区域低碳

技术创新要素间互动,推进产学研合作和技术转移,提高低碳竞争力.

参考文献:

- [1] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth [J]. *Science*, 1971,171(3977):1212-1217.
- [2] Stern P C, Young O R, Druckman D. Global environmental change: Understanding the human dimensions [M]. Washington, D.C.: National Academies Press, 1991.
- [3] Raskin P D. Methods for estimating the population contribution to environmental change [J]. *Ecological Economics*, 1995,15(3): 225-233.
- [4] 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.
- [5] York R, Rosa E A, Dietz T. Bridging environmental science with environmental policy: plasticity of population, affluence, and technology [J]. *Social Science Quarterly*, 2002,83(1):18-34.
- [6] Shi A. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975-1996: evidence from pooled cross-country data [J]. *Ecological Economics*, 2003,44(1):29-42.
- [7] Dietz T, Rosa E A. Effects of population and affluence on CO₂ emissions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997,94(1):175-179.
- [8] Poumanyong P, Kaneko S. Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions? A cross-country analysis [J]. *Ecological Economics*, 2010,70(2):434-444.
- [9] Lin S, Zhao D, Marinova D. Analysis of the environmental impact of China based on STIRPAT model [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2009,29(6):341-347.
- [10] 燕华,郭运功,林逢春.基于 STIRPAT 模型分析 CO₂ 控制下上海城市发展模式 [J]. *地理学报*, 2010,65(8):983-990.
- [11] 卢娜,曲福田,冯淑怡,等.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.
- [12] 任婉侠,耿涌,薛冰.中国老工业城市能源消费碳排放的驱动力分析——以沈阳市为例 [J]. *应用生态学报*. 2012,23(10): 2829-2835.
- [13] 黄蕊,王铮.基于 STIRPAT 模型的重庆市能源消费碳排放影响因素研究 [J]. *环境科学学报*, 2013,33(2):602-608.
- [14] 何强,吕光明.基于 IPAT 模型的生态环境影响分析——以北京市为例 [J]. *中央财经大学学报*, 2008(12):83-88.
- [15] Du L, Wei C, Cai S. Economic development and carbon dioxide emissions in China: Provincial panel data analysis [J]. *China Economic Review*, 2012,23(2):371-384.
- [16] Li H, Mu H, Zhang M, et al. Analysis of regional difference on impact factors of China's energy-Related CO₂ emissions [J].

- Energy, 2012,39(1):319-326.
- [17] Martínez-Zarzoso I, Maruotti A. The impact of urbanization on CO₂ emissions: Evidence from developing countries [J]. *Ecological Economics*, 2011,70(7):1344-1353.
- [18] Wang P, Wu W, Zhu B, et al. Examining the impact factors of energy-related CO₂ emissions using the STIRPAT model in Guangdong Province, China [J]. *Applied Energy*, 2013,106:65-71.
- [19] IEA. World energy outlook 2010 [M]. Paris: IEA Publication, 2008.
- [20] Dodman D. Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories [J]. *Environment and Urbanization*, 2009,21(1):185-201.
- [21] Hammond G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue [J]. *Nature*, 2007,445(7125):256.
- [22] Wiedmann T, Minx J. A definition of 'carbon footprint' [J]. *Ecological Economics Research Trends*, 2007,1:1-11.
- [23] Matthews H S, Hendrickson C T, Weber C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008,42(16):5839-5842.
- [24] Wiedmann T. EDITORIAL: Carbon footprint and input-output analysis-an introduction [J]. *Economic Systems Research*, 2009, 21(3):175-186.
- [25] Virtanen Y, Kurppa S, Saarinen M, et al. Carbon footprint of food - approaches from national input - output statistics and a LCA of a food portion [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011,19(16): 1849-1856.
- [26] 王 微,林剑艺,崔胜辉,等.碳足迹分析方法研究综述 [J]. *环境科学与技术*, 2010,33(7):71-78.
- [27] ICLEI. GLOBAL PROTOCOL FOR COMMUNITY-SCALE GHG EMISSIONS (GPC) [R]. 2011. <http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/GPC%20v9%2020120320.pdf>
- [28] UNEP. International Standard for Determining Greenhouse Gas Emissions for Cities [R]. 2010. http://www.unep.org/urban_environment/PDFs/InternationalStd-GHG.pdf
- [29] Dodman D. Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories [J]. *Environment and Urbanization*, 2009,21(1):185-201.
- [30] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology [J]. *Human Ecology Review*, 1994,1:277-300.
- [31] 许 泱,周少甫.我国城市化与碳排放的实证研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2011,20(11):1304-1309.
- [32] Barnes D F, Krutilla K, Hyde W F. The urban household energy transition: social and environmental impacts in the developing world [M]. Rff Press, 2005.
- [33] Wang Z, Yin F, Zhang Y, et al. An empirical research on the influencing factors of regional CO₂ emissions: Evidence from Beijing city, China [J]. *Applied Energy*, 2012,100:277-284.
- [34] 林伯强,刘希颖.中国城市化阶段的碳排放:影响因素和减排策略 [J]. *经济研究*, 2010(8):66-78.
- [35] 北京市统计局.北京市统计年鉴 1991-2012 [M]. 北京:中国统计出版社, 2012.
- [36] Houghton J T. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [M]. IPCC WGI Technical Support Unit, 1997.
- [37] 陈操操,刘春兰,田 刚,等.城市温室气体清单评价研究 [J]. *环境科学*, 2010,31(11):2780-2787.
- [38] 李国志,李宗植.中国二氧化碳排放的区域差异和影响因素研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2010,20(5):22-27.
- [39] Wold S, Ruhe A, Wold H, et al. The collinearity problem in linear regression. The partial least squares (PLS) approach to generalized inverses [J]. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 1984,5(3):735-743.
- [40] 王惠文,吴毅斌,孟 洁.偏最小二乘回归的线性与非线性方法 [M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
- [41] York R. Demographic trends and energy consumption in European Union Nations, 1960-2025 [J]. *Social Science Research*, 2007,36(3):855-872.
- [42] Boserup E. Population and technological change: A study of long-term trends [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1981.
- [43] 彭希哲,朱 勤.我国人口态势与消费模式对碳排放的影响分析 [J]. *人口研究*, 2010,34(01):48-58.
- [44] 孙昌龙,靳 诺,张小雷,等.城市化不同演化阶段对碳排放的影响差异 [J]. *地理科学*, 2013(03):266-272.
- [45] Burton E. The compact city: just or just compact? A preliminary analysis [J]. *Urban Studies*, 2000,37(11):1969-2006.
- [46] 朱远程,张士杰.基于 STIRPAT 模型的北京地区经济碳排放驱动因素分析 [J]. *特区经济*, 2012(1):77-79.
- [47] 张 耘.北京科技创新能力还须提升 [J]. *中国改革*, 2007(9): 40-42.
- [48] 林剑艺,孟凡鑫,崔胜辉,等.城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例 [J]. *生态学报*, 2012,32(12):3782-3794.

作者简介: 陈操操(1980-),男,广东湛江人,副研究员,博士,主要从事城市温室气体排放/城市生态学研究.发表论文 15 篇.