

引用格式:袁长伟,张帅,焦萍,等. 中国省域交通运输全要素碳排放效率时空变化及影响因素研究[J]. 资源科学, 2017, 39(4): 687-697. [Yuan C W, Zhang S, Jiao P, et al. Temporal and spatial variation and influencing factors research on total factor efficiency for transportation carbon emissions in China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(4): 687-697.] DOI: 10.18402/resci.2017.04.10

中国省域交通运输全要素碳排放效率时空变化及影响因素研究

袁长伟¹, 张 帅¹, 焦 萍¹, 武大勇²

(1. 长安大学经济与管理学院, 西安 710064;

2. 德克萨斯理工大学土木与环境工程系, 德克萨斯卢伯克 TX79409)

摘 要:正确、客观地测算交通运输全要素碳排放效率有利于推动技术进步与制定差异化碳减排政策。基于2004-2013年交通运输碳排放数据,采用考虑非期望产出超效率SBM模型测度中国省域交通运输全要素碳排放效率,探讨中国省域及东、中、西部交通运输碳排放效率空间分布及趋势变动,分析中国交通运输全要素碳排放效率的空间聚集特性及其主要影响因素。研究结果显示:①中国交通运输全要素碳排放效率变动趋势随发展阶段符合典型的环境库兹涅茨曲线,呈现2005-2009年下降,2009-2013年效率缓慢上升的趋势;②交通运输全要素碳排放效率呈现东部、中部和西部依次递减的空间规律,且相邻省份之间存在明显的空间正相关关系;③中国交通运输全要素碳排放效率在空间上存在明显的聚集状态,其中河北、山东、江苏、天津等东部沿海省份形成“H-H”聚集区;广东、江西、湖南、湖北等中南华南地区和东北地区普遍形成“L-L”聚集区;④通过空间计量模型,发现影响交通运输碳排放效率的主要因素为人口规模、收入水平、交通运输强度、要素禀赋、交通运输结构和节能技术水平,其中节能技术水平与碳排放效率呈现正相关关系,其它与碳排放效率呈现负相关关系。

关键词:全要素碳排放效率;交通运输碳减排;超效率SBM模型;空间相关分析;空间计量模型

DOI: 10.18402/resci.2017.04.10

1 引言

交通运输行业是主要的化石能源的消耗行业,同时也是主要的碳排放来源,在全球范围内交通运输业碳排放量占全球碳排放总量的1/4^[1]。据国际能源署(International Energy Agency, IEA)测算,2009年全球交通运输石油消耗量占总消耗量的23%,2030年和2050年这一比例将分别达到53%和80%。中国自1985年以来交通运输能源消耗量年平均增长率接近8%,远高于同期能源消耗总量年平均增长5.7%的速度。伴随着交通运输能源消耗的快速增长,交通运输碳排放同样日益快速增长。而在快速机动化、城镇化过程中,交通运输又是难

以找到有效碳减排政策的行业之一。此外,在中国,各地区之间经济发展阶段、城镇化发展水平、人口分布、产业阶段等差距迥异,碳减排政策工具设计需针对具体的地方特性区别实施。因此,测度交通运输全要素碳排放效率,探讨中国省域及区域交通运输碳排放的空间差异特性,明晰交通运输碳排放效率的空间聚集状态,识别碳排放的影响因素,对于制定差异化交通运输碳排放政策,推进碳减排具有重要的意义。

国内外学者针对交通运输碳排放做了众多的研究。其中,在交通运输碳排放效率测度上,目前主要采用的是单位换算周转量碳排放量、单位交通

收稿日期:2016-09-18;修订日期:2016-11-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51278057);霍英东青年教育基金(151075);中央高校基本科研费项目创新团队项目(310823160103)。

作者简介:袁长伟,男,湖南邵阳人,博士,教授,主要研究方向为交通-能源-环境复杂作用机制。E-mail: yuanchangwei@126.com

通讯作者:张帅, E-mail: cd_zhangshuai@163.com

运输行业增加值碳排放量等单要素指标,如Greening通过自适应权重方法分析了10个OECD国家单位货运周转量碳排放量的时间变化规律^[2]。池熊伟以单位周转量碳排放量为碳排放效率,分析发现目前铁路碳排放效率最高,公路运输碳排放效率低于发达国家^[3]。卢建锋等定义换算周转量与二氧化碳排放量之比作为交通运输业碳排放效率,在此基础上,利用分解模型探究了区域交通碳排放效率的影响因素^[4]。少数学者采用全要素碳排放效率进行测度分析,如兰梓睿等基于数据包络分析法(DEA)测度了中国各省交通运输碳排放全要素效率^[5]。在中国交通运输碳排放的空间特性分析上,王建伟等通过建立碳减排水平评价指标体系,将中国分为优化区域、重点区域、积极区域和规划区域^[6]。兰梓睿等通过对比分析了中国东、中、西部交通运输全要素碳排放效率的差异性^[5]。杨彬等运用ESDA(探索性空间数据分析)和GIS(地理信息系统)相结合的空间分析方法,探索了中国交通运输碳排放的空间差异性和空间聚集规律^[7]。高洁等通过引入“重心”概念和重心计算模型,研究分析了1996-2010年间中国全社会和交通运输碳排放重心演化轨迹及特征,分析发现两者重心变动存在差异,全社会碳排放重心呈现向西南移动的趋势,交通运输碳排放重心无明显方向性发展趋势^[8]。在交通运输碳排放影响因素的研究领域,Scholl基于OECD客运交通碳排放量数据,研究了交通量、能源强度、交通结构、能源结构与碳排放量之间的关系,发现交通量、能源强度、交通结构、能源强度是其主要影响因素^[9]。Tae-Hyeong Kwon使用IPAT恒等式等分解方法分析了英国小汽车碳排放的影响因素^[10]。Timilsina等在亚洲和拉丁美洲20个国家交通运输碳排放量数据基础上,分析发现人均GDP、人口增长、能源强度、能源结构、碳排放效率都是影响碳排放的主要因素^[11]。Lisa Ryan在测算碳排放强度的基础上,发现车辆和车辆能源税能够对碳排放强度产

生显著的影响^[12]。徐雅楠等测度了1995-2008年中国交通运输碳排放量,并运用STIRPAT模型研究了人口和经济因素与交通运输碳排放之间的关系^[13]。俞洁等基于LMDI模型定量分析得到,人均GDP增加对交通运输碳排放量增长起推动作用,而交通运输能源强度、交通运输强度的下降起抑制作用,公路运输对交通运输碳排放量具有显著的影响^[14]。

以往的研究从不同的视角探索了交通运输碳排放规律,但是,提升碳排放效率是碳减排行动的关键所在^[15-17]。对中国而言,一方面,中国的工业化、城镇化、机动化过程交织进行,影响交通碳排放的因素纷繁复杂、相互作用,正如杨红亮所指,单要素指标的测算难以充分反映碳排放效率的多维度特征,同时能源结构、产业结构、技术水平等都是影响碳排放的要素,单要素指标无法反映各种要素之间的替代、诱导等复杂作用^[18]。另一方面中国各省域交通运输发展存在明显差异,存在着明显的空间相关性,但是从碳排放效率去研究交通运输碳排放时空特性方面存在不足。另外,以往研究主要基于IPAT等式、STIRPAT和分解模型研究交通运输碳排放的影响因素,较少考虑空间因素,从而在测度交通运输碳排放的影响因素方面存在一定偏差。

由此,本文基于2004-2013年的交通运输碳排放数据,采用非期望产出超效率SBM模型(Slack Based Measure, SBM)测度中国各省域交通运输全要素碳排放效率¹⁾,研究中国省域及东、中、西部地区效率的差异性及变动趋势,结合空间分析法探讨效率的空间特性,运用空间计量经济模型分析各种影响因素对中国交通运输全要素碳排放效率的影响程度,为国家制定有针对性的交通碳减排方案提供决策依据。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 非期望产出的超效率SBM模型

全要素碳排放效率的测算方法分为非参数的数据包络(Data Envelopment Analysis, DEA)和参数

1) 通过DEA测度全要素碳排放效率的方法有两种:最优碳排放量与实际碳排放量的比值;直接采用DEA测算的生产技术效率作为全要素碳排放效率。在多要素的投入产出生产过程中,其它要素的改进同样意味着碳排放效率的相对提高,且一般多个要素存在改进空间。考虑到本文旨在重点研究中国30个省(直辖市、自治区)全要素碳排放效率的空间差异和聚集特性,采用前者可能存在部分省份碳排放量未改进而导致的效率相同、对比性不足的状况,且存在对比口径不同的嫌疑,因而,本文采用DEA测算的生产技术效率作为交通运输全要素碳排放效率进行后续研究。

2017年4月

的随机前沿分析(Stochastic Frontier Analysis, SFA)两种。其中,DEA方法能够有效解决多投入多产出的问题,SFA方法只能解释单产出的生产过程。在交通运输碳排放生产过程中,存在着复杂的投入产出要素,采用DEA方法更为合适。对于传统的CCR-DEA、BCC-DEA等径向DEA模型,一方面没有充分考虑投入产出的松弛性问题,不能准确度量存在非期望产出时的效率值,因而难以准确评价决策单元(Decision Making Unit, DMU)的效率;另一方面由于效率值具有截尾性,使得测度的交通运输全要素碳排放效率值并不适用于探讨其影响因素的空间计量模型。而超效率SBM模型能有效地避免此类问题。因而,本文将交通运输碳排放量作为非期望产出,采用超效率SBM模型测算交通运输全要素碳排放效率。

假设交通运输碳排放生产过程中有 n 个决策单元,每个决策单元包含 m 个生产投入要素、 q_1 个期望产出要素和 q_2 个非期望产出要素。本文中 n 表示中国30个省(直辖市、自治区),投入要素为交通运输业资本存量、劳动力、能源消耗,期望产出为交通运输业增加值,非期望产出为交通运输碳排放量,则测度交通运输全要素碳排放效率的非期望产出超效率SBM模型^[19]为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \rho = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{s}_i^- / x_{ik}}{1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} \bar{s}_r^- / y_{rk} + \sum_{t=1}^{q_2} \bar{s}_t^+ / y_{tk}^b \right)} \\ s.t. \quad \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - \bar{s}_i^- \leq x_{ik} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{ij}^b \lambda_j - \bar{s}_r^+ \leq y_{rk} \\ 1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} \bar{s}_r^- / y_{rk} + \sum_{t=1}^{q_2} \bar{s}_t^+ / y_{tk}^b \right) > 0 \\ \lambda, \bar{s}^-, \bar{s}^+ \geq 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中 ρ 为测度的交通运输全要素碳排放效率; x_{ik} 、 y_{rk} 和 y_{tk}^b 分别表示第 k 个省份第 i 个投入要素、第 b 个期望产出和第 t 个非期望产出; $i=1, 2, 3, \dots, m$; $t=1, 2, 3, \dots, q_2$; $k=1, 2, 3, \dots, n$; \bar{s}_i^- 、 \bar{s}_r^+ 和 \bar{s}_t^+ 分别表示投入要素、期望产出和非期望产出的松弛变量; λ_j 为约束条件。

2.2 空间自相关分析

空间自相关分析能够有效表示各地区交通运输全要素碳排放效率在空间上的分布特性及地区间依赖性,包含全局空间自相关和局部空间自相关两种方法。全局空间自相关一般采用空间自相关指数Moran's I衡量,反映的是整个空间交通运输碳排放效率的空间聚集状态,但无法准确反映各省份间空间关系,因此,研究中一般结合空间关联局部LISA (Local Indications of Spatial Association, LISA)分布图来分析空间相关性^[20]。其中,Moran's I计算公式为:

$$Moran's I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (2)$$

式中 $s^2 = 1/n \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 为中国各省交通运输全要素碳排放效率的方差; w_{ij} 为空间权重矩阵的(i ; j)元素,本文采用二进制权重,即当 i 和 j 地区相邻时,权重矩阵元素取1,否则取0; $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$ 为所有空间权重之和;Moran's I取值区间为 $[-1, 1]$,越接近于1,表明空间正相关性越强;越接近于-1,空间负相关性越强;Moran's I接近于0,说明空间分布是随机的,不存在相关性。

2.3 空间计量模型

传统经济计量模型对研究对象存在空间均质性、独立同分布等严格的前提条件,且在呈现明显空间相关性的情况下,往往导致估计结果不准确,与实际存在较大偏差。而空间计量模型能够充分考虑经济社会中地区之间的空间依赖性和空间相关性,准确反映交通运输全要素碳排放效率的影响因素。典型的空间计量模型包含空间滞后模型(Spatial Lag Model, SLM)和空间误差模型(Spatial Errors Model, SEM)。其中,SLM主要探讨周边地区经济行为直接对系统中某地区交通运输碳排放效率产生的影响,即是否存在空间溢出效应;SEM主要研究地区间的相互关系通过误差项的结构关联来实现的情况。

根据Anselin提出的判定准则^[21],本文最终选择构建SLM模型研究交通运输碳排放效率的影响因素,为消除异方差的影响,建立双对数空间计量模型为:

$$\begin{aligned} \ln cte_{i,t} = & \alpha_i + \beta_1 \ln pop_{i,t} + \beta_2 \ln inc_{i,t} + \beta_3 \ln int_{i,t} \\ & + \beta_4 \ln \ln t_{i,t} + \beta_5 \ln fac_{i,t} + \beta_6 \ln pst_{i,t} \\ & + \delta \sum_j W_{ij} \ln(cte_{i,t}) + \mu_{i,t} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $cte_{i,t}$ 为第 i 省份 t 年的交通运输全要素碳排放效率; α_i 为常数项; β 为回归参数,反映了各影响因素对交通运输碳排放全要素效率的影响程度; $pop_{i,t}$ 、 $inc_{i,t}$ 、 $int_{i,t}$ 、 $fac_{i,t}$ 、 $pst_{i,t}$ 分别表示人口规模、收入水平、交通运输强度、节能技术水平、要素禀赋及交通运输结构; δ 为空间回归相关系数,反映的是交通运输碳排放全要素效率的空间依赖性,即相邻区域对本区域的影响程度; $\mu_{i,t}$ 为随机扰动项。

2.4 变量选取与数据来源

由于西藏、香港、澳门及台湾数据缺失,未作考虑。同时考虑到能源数据的欠缺,本文选取2004-2013年中国30个省(自治区、直辖市)为研究单元。在投入指标方面,选取交通运输业资本存量、劳动力、能源消耗为投入要素,其中交通运输资本存量参考张军^[22]、单豪杰^[23]的研究,采用“永续盘存法”估算;劳动力选用各省交通运输行业从业人员数来表示;依据交通运输业煤炭、汽油、柴油和天然气等各种能源的消耗总量,采用标准煤系数统一折合为标准煤,以此表示能源消耗总量。在产出指标方面,选取交通运输业增加值和二氧化碳排放量作为产出要素,其中二氧化碳排放量为非期望产出,根据联合国政府间气候变化专门委员会2006年公布的二氧化碳排放量估算方法进行计算。

在空间计量模型中,本文在以往研究的基础上^[9-14,27],选取人口规模、收入水平、交通运输强度、节能技术水平、要素禀赋和交通运输结构6个指标作为中国交通全要素碳排放效率的影响因素。其中,收入水平采用各省人均收入表示;交通运输强度,采用交通运输行业综合换算周转量与各省地区生产总值的比值表示,反映该省交通运输行业效率。综合换算周转量根据中国统计制度规定的客货换算系数进行换算,换算系数如表1,其中,考虑到数据的可获得性,水运统一采取“1/3”进行换算;节能技术水平,用能源强度倒数表示,表示交通运输行业能源利用效率;要素禀赋采用资本和从业人员比值衡量;交通运输结构采用旅客换算周转量比

表1 综合换算周转量换算系数

Table 1 Conversion coefficients of comprehensive

converted turnover volume				
方式	铁路	公路	水路	航空
换算系数	1	1/10	1/3(座位) 1(卧铺)	1/13

重表示。

本文能源数据均来源于2005-2014年《中国能源统计年鉴》^[24],增加值数据均来源于《中国国内生产总值核算历史资料1952-1995》^[25]和2005-2014年《中国统计年鉴》^[26],其它相关数据均来源于2005-2014年《中国统计年鉴》^[26]。其中,为消除价格因素的影响,价值量数据均采用第三产业增加值平减指数调整为以1978年为基期的不变价格数据。

3 碳排放效率时间趋势与空间特征分析

3.1 碳排放效率空间差异与趋势变动

通过MAXDEA软件测算中国各省2004-2013年交通运输全要素碳排放效率值。

表2中给出了各省10年间平均全要素碳排放效率值,全国碳排放效率平均值为0.731,最低为0.437,最高为1.227,两者相差2.8倍。从区域上看,东部各省平均值为0.797,中部碳排放效率平均值为0.694,西部为0.692,东部交通运输碳排放效率高

表2 2004-2013年中国各省(自治区、直辖市)交通运输平均全要素碳排放效率

Table 2 The average total factor efficiency of provincial transportation carbon emissions in China from 2004 to 2013

省域	排放效率	排名	省域	排放效率	排名
河北	1.227	1	辽宁	0.672	16
山东	1.058	2	湖南	0.668	17
江苏	1.044	3	广东	0.655	18
青海	1.000	4	黑龙江	0.653	19
宁夏	1.000	4	贵州	0.651	20
天津	0.824	6	吉林	0.627	21
甘肃	0.823	7	上海	0.612	22
安徽	0.814	8	广西	0.606	23
河南	0.787	9	山西	0.598	24
内蒙古	0.763	10	重庆	0.590	25
山西	0.729	11	浙江	0.583	26
江西	0.714	12	四川	0.583	27
海南	0.713	13	湖北	0.580	28
福建	0.707	14	新疆	0.548	29
北京	0.677	15	云南	0.437	30

2017年4月

于中、西部。交通运输碳排放效率排名前5的省份为河北、山东、江苏、青海和宁夏,且都处于生产前沿面及以上;排名后5位的省份依次为浙江、四川、湖北、新疆和云南。其中,接近前沿的以沿海东部省份为主,处于效率低端的主要分布在西部。可以看出中国各区域间全要素碳排放效率差异显著,存在明显的空间异质性。值得注意的是,位于中国西部的青海和宁夏的碳排放效率一直处于生产前沿。青海和宁夏人口规模一直处于最低水平,同时由于其地理资源环境限制,交通运输资源禀赋同样处于较低水平且较为稳定,这可能是其交通运输碳排放效率高的主要原因;河北省处于生产前沿面以上是因为河北能源消耗主要来源于以矿产开发为主的工业行业,单位生产总值生产的碳排放量较小,交通运输碳排放强度一直处于全国较低水平。而近几年湖北省公路客、货周转量分担率均呈现持续上升趋势,铁路运输周转量呈下降趋势,交通结构的持续变化是导致湖北交通碳排放效率走低的重要原因。

从时间上看,2004-2013年中国及东、中、西部交通运输全要素碳排放效率的变化趋势如图1所示。可以看出,整体上中国交通运输全要素碳排放效率变化趋势符合典型的环境库兹涅茨曲线(Environ-mental Kuznets Curve, EKC),2005年前交通运输碳排放效率增加,随着中国经济快速增长,2005-2009年碳排放效率逐渐降低,2009-2013年交通运输碳排放效率逐渐缓慢上升,总体表现为“U”

型变化特征。区域间空间差异性呈现东部大于中西部的态势。

具体而言,各省交通运输碳排放效率基本符合“U”型特征。2005-2009年,交通运输碳排放效率上升的省份有河北、贵州,下降幅度较大有北京和云南。2009-2013年,碳排放效率上升幅度较大的有上海、新疆,下降幅度较大的为海南和甘肃(见图2)。

3.2 空间相关性分析

根据2004-2013年全国全要素碳排放效率,在二进制权重矩阵基础上,运用GEODA软件计算Moran's I,如表3。可以看出大部分年份的Moran's I在10%显著性水平下通过检验,且Moran's I ≥ 0 ,说

表3 2004-2013年全国交通运输全要素碳排放效率
Moran's I值

Table 3 The Moran's I of total factor efficiency for transportation carbon emissions in China from 2004 to 2013

年份	Moran's I	E[I]	Sd[I]	p 值
2004	0.121	-0.035	0.114	0.097
2005	0.215	-0.035	0.119	0.023
2006	0.200	-0.035	0.113	0.028
2007	0.183	-0.035	0.119	0.050
2008	0.179	-0.035	0.120	0.054
2009	0.074	-0.035	0.112	0.153
2010	0.123	-0.035	0.114	0.082
2011	0.131	-0.035	0.113	0.084
2012	0.127	-0.035	0.118	0.093
2013	0.130	-0.035	0.116	0.097
平均效率	0.177	-0.035	0.113	0.040

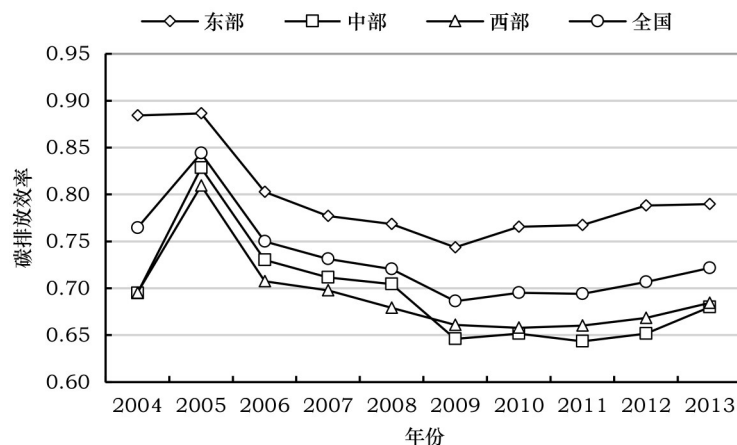


图1 2004-2013年全国及东、中、西部交通运输全要素碳排放效率变动趋势

Figure 1 Change tendency of total factor efficiency for transportation carbon emissions in nationwide and three regions from 2004 to 2013

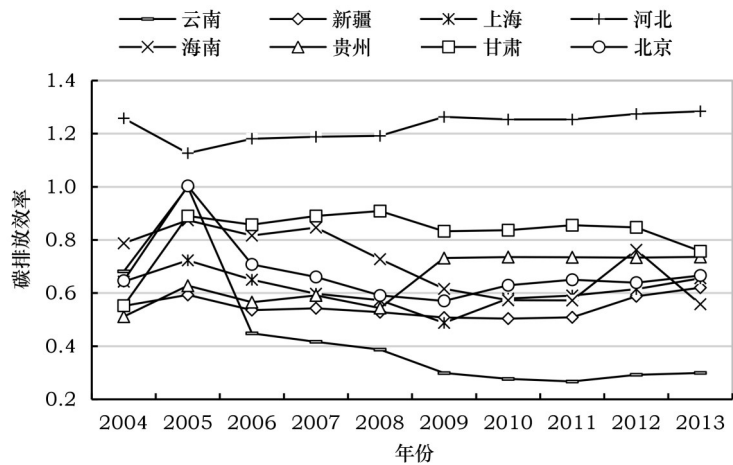


图2 2004–2013年中国部分省(自治区、直辖市)交通运输全要素碳排放效率变动趋势

Figure 2 Change tendency of total factor efficiency for transportation carbon emissions in same provinces from 2004 to 2013

明相邻地区之间存在空间聚集现象。同时,全要素碳排放效率空间正相关性整体上呈现递减趋势,Moran’s I适中,说明相邻地区之间的空间相关性较为显著。

为准确测度各省份交通运输全要素碳排放效率的空间聚集状态及时间变化特征,利用GEODA绘制2004年、2007年、2010年和2013年LISA图,如图3。可以看出,中国各省交通运输全要素碳排放效率主要分布在“低-低”(L-L)象限,少量分布在“高-低”(H-L)象限,说明中国大部分区域呈现“低-低”聚集。2004年、2007年、2010年和2013年中,分布于“H-H”(H-H)和“L-L”象限的省份数量和占总省份数量的比重分别为65.51%、68.97%、72.41%和62.07%,表明2004年至2013年中国交通运输全要素碳排放效率在空间上主要体现为“H-H”和“L-L”聚集,即相邻省份碳排放效率呈现空间正相关,且这种正相关关系呈先上升后下降的趋势。

通过LSIA分析可看出:中国各省交通运输碳排放效率空间分布特性基本处于稳定状态。H-H主要分布在河北、山东、江苏、天津等东部沿海省份;L-L的分布于广东、江西、四川、湖南、湖北、云南等中南华南片区和吉林、黑龙江等东北地区。H-L的主要分布于青海和宁夏,呈现明显的区间异质性、区内同质性特征。

4 空间计量模型分析

4.1 模型结果

为科学选择SLM和SEM空间计量模型,通过

MATLAB软件对不考虑空间效应和时间效应的普通面板数据模型进行估计及检验,如表4所示。结果显示,LM-lag显著性水平大于LM-err,且Robust LM-lag在1%显著性水平下显著,而Robust LM-err在5%显著性水平下不显著,依据Anselin等的判别准则^[21],因此采用SLM模型。

通过空间相关性分析和LM检验,可以发现普通面板数据滞后项存在着明显的空间相关性,空间因素对模型产生了重要影响。在此基础上,本文采用无固定效应、空间固定效应、时间固定效应、双固定效应和随机效应SLM模型分别进行估计和统计

表4 OLS估计及检验结果

Table 4 Estimation and test results of ordinary least squares			
变量	系数	t统计量	p值
α	1.101	3.654	0.000
lnpop	-0.072	-3.650	0.000
lninc	-0.151	-3.886	0.000
lnint	-0.222	-4.244	0.000
ln t	0.328	9.653	0.000
lnfac	-0.088	-3.402	0.001
lnpst	-0.027	-0.836	0.404
Log-L	32.209		
R-squared	0.313		
Durbin-Watson	2.268		
LM-lag	12.377***		
Robust LM-lag	10.684***		
LM-err	5.114**		
Robust LM-err	3.420*		

注: *、**和***分别表示10%、5%和1%的显著性水平,模型估计使用Matlab2015a。

2017年4月

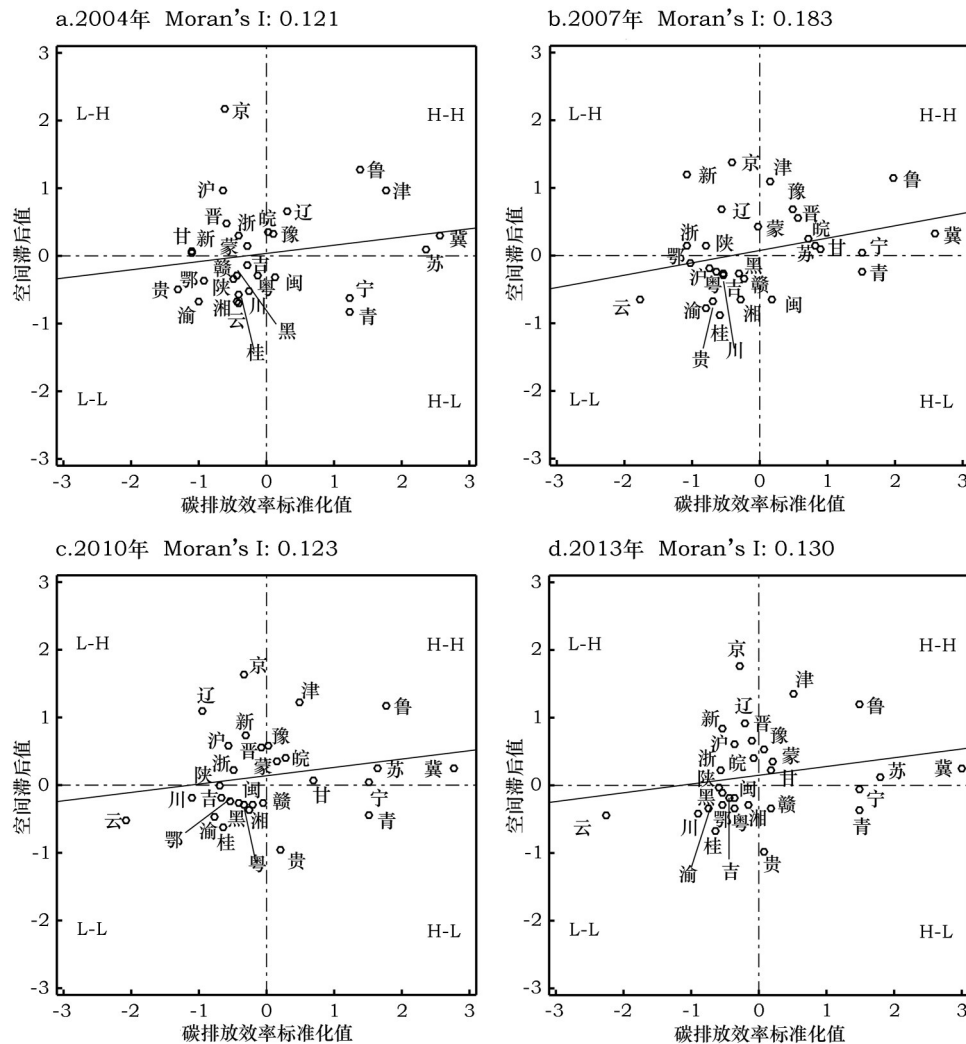


图3 2004年、2007年、2010年、2013年中国各省(自治区、直辖市)交通运输业全要素碳排放效率值分布

Figure 3 The distribution of Chinese provincial total factor efficiency for transportation carbon emissions in 2004, 2007, 2010 and 2013

注:由于地理位置海南省在陆地上与其他省份不相连,因此在LISA分析及空间分析中未包含海南省。

检验,通过对比分析选取最优模型,定量甄别交通运输碳排放效率的主要影响因素。表5(见694页)是嵌套各种效应的估计和检验结果,从中可以看出,空间固定效应、双固定效应和随机效应的判定系数明显高于无空间效应的SLM模型和时间固定效应的SLM模型,且双固定效应SLM模型拟合程度最好(0.898);从对数似然函数值(\log -likelihood, \log -L)来看,无空间效应的SLM模型 \log -L值为38.946,加入双固定效应后, \log -L值达到最高(314.935),这也说明双固定SLM模型的拟合结果最好;同时,双固定SLM模型中 $W \cdot \text{dep. var}$ 在1%的显著性水平下通过了检验,说明相邻省份之间存在着显著的空间依赖性。因此,本文依据双固定SLM

模型分析交通运输全要素碳排放效率的影响因素。

4.2 碳排放效率主要影响因素分析

双固定SLM模型估计结果显示,人口规模 pop 和收入水平 inc 的系数分别为-0.442和-0.470,且分别在5%和1%的显著性水平下通过检验,这说明人口规模、收入水平与交通运输碳排放效率之间存在显著负相关关系。随着人口规模的增加和收入水平的提升,社会经济活动和出行需求随之增加,私家车数量急剧增长,交通运输全要素碳排放效率降低。交通运输强度 int 在1%的显著性水平上对全要素碳排放效率的影响是负的。交通运输强度的增大,会相应地带来碳排放效率的降低。节能技术水平表示交通运输能源利用效率,估计结果显示,交

表5 SLM模型估计及检验

Table 5 Estimation and test results of SLM model

变量	无空间效应	空间固定效应	时间固定效应	双固定效应	随机效应
α	1.254*** (4.340)	— —	— —	— —	— —
$\ln pop$	-0.076*** (-4.029)	-0.288 (-1.534)	-0.079*** (-4.114)	-0.442** (-2.438)	-0.088 (-1.440)
$\ln inc$	-0.166*** (-4.449)	-0.143*** (-3.125)	-0.130** (-2.376)	-0.470*** (-6.126)	-0.388*** (-5.321)
$\ln int$	-0.230*** (-4.573)	-0.346*** (-5.125)	-0.229*** (-4.514)	-0.206*** (-3.140)	-0.195*** (-3.182)
$\ln t$	0.318*** (9.753)	0.095*** (2.841)	0.326*** (9.870)	0.119*** (3.851)	0.142*** (4.548)
$\ln fac$	-0.059** (-2.030)	-0.212*** (-7.553)	-0.038 (-1.094)	-0.229*** (-8.057)	-0.204*** (-7.416)
$\ln pst$	-0.024 (4.073)	-0.255*** (-3.846)	-0.014 (-0.413)	-0.116* (-1.836)	-0.113** (-2.098)
$W*dep.var$	0.259*** (4.073)	0.036 (0.490)	0.204*** (3.065)	-0.291*** (-3.820)	-0.284*** (-3.453)
$R-squared$	0.354	0.861	0.375	0.898	0.878
$log-likelihood$	38.946	271.206	44.737	314.935	73.818

注:表中*、**和***分别表示10%、5%和1%显著性水平;()中数据表示相应的t统计量;其中随机效应SLM模型未列出 $W*Variable$ 。

通运输节能技术水平与全要素碳排放效率呈显著正相关关系,节能技术水平每上升1%,全要素效率将提高11.86%。目前中国交通运输依旧以汽油、柴油等化石燃料消耗为主,纯电动、混合动力、氢能源和生物燃料等新能源应用有待推广,节能技术水平的提升有利于提升中国交通运输碳排放效率。估计结果也表明随着要素投入的增大,全要素碳排放效率将会降低。交通运输是高投入行业,要素投入的增加可能导致投入的无效性增加,从而全要素碳排放效率降低。交通运输结构对交通运输全要素碳排放效率的影响为负。从交通运输结构来看,2004年公路换算周转量比重占总换算周转量的11.44%,2013年为31.56%,增长迅速,这表明中国公路在交通运输中占有重要份额,且呈现逐渐上升趋势。2004-2013年航空旅客周转量比重增加9.59%,同时借鉴国外航空运输的发展经验,未来航空运输也将会以更快的速度发展。但是公路和航空运输相较于铁路、水路运输方式,能源消耗强度高,碳排放效率相对较低,因而,未来交通运输碳减排的一个重要方向将是交通运输方式结构的优化。

5 结论及政策建议

5.1 结论

本文基于非期望产出的超效率SBM模型测度了中国各省交通运输全要素碳排放效率,分析了碳排放效率的时空特征,并基于双固定SLM模型探讨了中国交通运输全要素碳排放效率的主要影响因素。具体结论如下:

(1)交通运输全要素碳排放效率测算结果显示,中国交通运输碳排放效率存在明显的空间差异性,表现为东部高于中、西部。从时间变化上来看,整体上呈现典型的环境库兹涅茨曲线,2005-2009年呈现碳排放效率下降趋势,随着各种交通运输碳减排政策的推行、交通运输方式结构的优化、相关技术的推广应用等,2009-2013年交通运输碳排放效率呈现缓慢上升的态势。

(2)Moran's I说明中国交通运输全要素碳排放效率整体上呈现明显的空间正相关性。通过LISA图分析,得出中国交通运输全要素碳排放效率在空间上存在明显的聚集状态。其中,河北、山东、江苏、天津等东部沿海省份体现为“H-H”聚集;广东、

2017年4月

江西、四川、湖南、湖北、云南等中南华南地区和东北地区普遍表现为“L-L”聚集;同时青海和宁夏地区表现为“H-L”聚集现象。

(3)双固定SLM模型估计结果显示,人口规模、收入水平、交通运输强度、要素禀赋和交通运输结构对交通运输碳排放效率的影响为负,节能技术水平对交通运输碳排放效率的影响为正。

5.2 政策建议

通过以上分析,未来中国交通运输全要素碳排放效率提升应注重如下方面:

(1)继续大力推进纯电动、混合动力、氢能源等新能源汽车产业的发展,推动新能源在公共交通、大型客车货车等领域的应用。

(2)优化运输组织方式,提高运输组织效率,推进多式联运、甩挂运输等新型运输组织方式,推广集装箱运输、箱式货运等运输形式,降低单位交通运输强度,提升全要素碳排放效率。

(3)优化交通运输结构,大力发展水路运输、重载铁路货运,大力推动轨道交通、大容量公交等低碳环保交通方式,推进低碳交通运输体系建设。

(4)中国各地区交通运输碳排放效率存在显著的差异性,需要综合考虑各地区经济发展阶段、产业结构、资源禀赋、交通运输结构等因素,制定差别化的交通运输碳减排政策。

参考文献(References):

[1] 陈露露,赵小凤,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. [Chen L L, Zhao X F, Lai L. Forecast of transportation carbon emissions and scenario analysis in Jiangsu Province[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(10): 13-17.]

[2] Greening L A, Ting M, Davis W B. Decomposition of aggregate carbon intensity for freight: Trends from 10 OECD countries for the period 1971-1993[J]. *Energy Economics*, 1999, 21(4): 331-361.

[3] 池熊伟.中国交通部门碳排放分析[J].潘阳湖学刊,2012(4): 56-62. [Chi X W. Analysis of Chinese transportation sector carbon emissions[J]. *Journal of Poyang Lake*, 2012(4): 56-62.]

[4] 卢建锋,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):25-30. [Lu J F, Fu H, Wang X X. Research on the impact of regional transportation emissions efficiency factors[J]. *Journal of transport-*

ation systems engineering and information technology, 2016, 16(2): 25-30.]

[5] 兰梓睿,张宏武.中国交通运输业碳排放效率的省际差异研究[J].物流技术,2014,33(4):132-135. [Lan Z R, Zhang H W. Study on inter-provincial different in carbon emissions efficiency of traffic and transportation industry in China[J]. *Logistics Technology*, 2014, 33(4): 132-135.]

[6] 王建伟,李娉,高洁.中国交通运输碳减排区域划分[J].长安大学学报(自然科学版),2012,32(1):72-79. [Wang J W, Li P, Gao J. Region division in China for transportation carbon emission reduction[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2012, 32(1): 72-79.]

[7] 杨彬,宁小莉.新型城镇化视角下中国交通运输碳排放测度及其空间格局分布[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2015,(5):667-673. [Yang B, Ning X L. Measurement and spatial pattern of transportation carbon emission in China under the perspective of new urbanization[J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, (5): 667-673.]

[8] 高洁,张晓明,王建伟,等.中国碳排放与交通运输碳排放重心演变及对比分析[J].生态经济,2013,(8):36-40. [Gao J, Zhang X M, Wang J W, et al. Evolvement and comparative analysis of the carbon emission gravity center and the transportation carbon emission gravity center in China[J]. *Ecological Economy*, 2013, (8): 36-40.]

[9] Scholl L, Schipper L. CO₂ emissions from passenger transport: A comparison of international trends from 1973 to 1992[J]. *Energy Policy*, 1996, 24(1): 17-30.

[10] Kwon T H. Decomposition of factors determining the trend of CO₂ emission from car travel in Great Britain (1970-2000)[J]. *Ecological Economics*, 2005, 53(2): 261-275.

[11] Timilasina G R, Shrestha A. Transport sector CO₂ emissions growth in Asia: Underlying factors and policy options[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4523-4539.

[12] Ryan L, Ferreira S, Convery F. The impact of fiscal and other measures on new passenger car sales and CO₂ emissions intensity: Evidence from Europe[J]. *Energy Economics*, 2009, 31(3): 365-374.

[13] 徐雅楠,杜平志.我国交通运输业的碳减排测度及因素分解[J].物流技术,2011,30(6):16-18. [Xu Y N, Du P Z. Measurement and factor analysis of carbon emissions of transportation industry of China[J]. *Logistics Technology*, 2011, 30(6): 16-18.]

[14] 俞洁,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,2015,28(10):112-119. [Yu J, Da Y B, Ou Y B. Analysis of carbon emission changes in China's transportation industry based on LMDI decomposition method[J]. *China Journal of Highway and*

- Transport*, 2015, 28(10): 112-119.]
- [15] 李健, 邓传霞. 基于SDDF的中国省区二氧化碳排放效率及减排潜力测度[J]. 中国软科学, 2015, 29(3): 70-73. [Li J, Deng C X. Study on carbon dioxide emission performance and reduction potential of Chinese provinces based on SDDF[J]. *China Soft Science*, 2015, 29(3): 70-73.]
- [16] 张金灿, 仲伟周. 基于随机前沿的我国省域碳排放效率和全要素生产率研究[J]. 中国软科学, 2015, 29(6): 105-109. [Zhang J C, Zhong W Z. Research of Chinese provincial carbon efficiency and total factor productivity based on SFA[J]. *China Soft Science*, 2015, 29(6): 105-109.]
- [17] 马大来, 陈仲常, 王玲. 中国省际碳排放效率的空间计量[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1): 67-77. [Ma D L, Chen Z C, Wang L. Spatial econometrics research on inter-provincial carbon emissions efficiency in China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2015, 25(1): 67-77.]
- [18] 杨红亮, 史丹. 能效研究方法和中国各地区能源效率的比较[J]. 经济理论与经济管理, 2010, (3): 12-20. [Yang H L, Shi D. Energy-efficiency methods and comparing the energy efficiencies of different areas in China[J]. *Economic Theory and Business Management*, 2010, (3): 12-20.]
- [19] 成刚. 数据包络分析方法与Max DEA软件[M]. 北京: 知识产权出版社, 2014. [Cheng G. Data Envelopment Analysis: Methods and Max DEA Software[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2014.]
- [20] 刘佳, 赵金金, 张广海. 中国旅游产业集聚与旅游经济增长关系的空间计量分析[J]. 经济地理, 2013, 33(4): 186-192. [Liu J, Zhao J J, Zhang G H. Spatial econometric research on the relationship between tourism industry agglomeration and tourism economic growth in China[J]. *Economic Geography*, 2013, 33(4): 186-192.]
- [21] Anselin L, Florax R, Rey S J. Advanced in Spatial Econometrics: Methodology Tools and Applications[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2004.
- [22] 张军, 章元. 对中国资本存量K的再估计[J]. 经济研究, 2003, (7): 35-43. [Zhang J, Zhang Y. Dynamic inefficiency in China's economy since 1990s[J]. *Economic Research Journal*, 2003, (7): 35-43.]
- [23] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952-2006年[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, (10): 17-31. [Shan H J. Reestimating the capital stock of China: 1952-2006[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2008, (10): 17-31.]
- [24] 国家统计局工业交通统计司. 2004-2014年中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2015. [National Bureau of Statistics of Industrial Transportation. Chinese Statistics Yearbook[M]. Beijing: China Statistics, 2005-2015.]
- [25] 中国国家统计局国民经济核算司. 中国国内生产总值核算历史资料[M]. 大连: 东北财经大学出版社, 1997. [Department of National Economics Accounting States Statistical Bureau. The Gross Domestic Product of China[M]. Dalian: Dongbei University of Finance and Economics Press, 1997.]
- [26] 国家统计局. 2004-2014年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2015. [National Bureau of Statistics of China (NBSC). Chinese Statistics Yearbook[M]. Beijing: China Statistics, 2005-2015.]
- [27] Yuan C, Wu D, Liu H. Energy Consumption, CO₂ Emissions, and Growth Patterns in China's Provincial Transport Sectors: A Grey Relational Analysis[C]. Washington: Transportation Research Board annual meeting, 2017.

Temporal and spatial variation and influencing factors research on total factor efficiency for transportation carbon emissions in China

YUAN Changwei¹, ZHANG Shuai¹, JIAO Ping¹, WU Dayong²

(1. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, Texas Tech University, Lubbock, Texas TX79409, USA)

Abstract: Measuring the correct and objective total factor efficiency of provincial transportation carbon emissions in China promotes technological progress and helps to develop differentiated carbon emission reduction policies. Using data of transportation carbon emissions from 2004 to 2013, we measure provincial total factor transportation carbon emissions efficiency by the model of superefficient-SBM-undesirable output. On this basis, we research the spatial difference and change trend changing of transportation carbon emission efficiency in china and three regions, and analyze space clustering characteristics and influencing factors of efficiency. The results show: ① The tendency of total factor efficiency on transportation carbon emissions fits the tendency of typical Environment Kuznets Curve, during 2005-2009 efficiency quickly being declined, and then rising slowly from 2009-2013. ② Average efficiency in the eastern regions is significantly higher than be in the central regions and western regions. The carbon emission efficiency has the relation of spatial autocorrelation between close provinces. ③ Obvious spatial aggregation features on China's transportation total factor efficiency of carbon is existing. Among these, the eastern regions exhibit a H-H assembly of carbon efficiency, including Hebei, Shandong, Jiangsu and Tianjin. The central southern, southern and northeast regions exhibit L-L assemblies of efficiency, Guangdong, Jiangxi, Hunan and Hubei included. ④ According to the spatial econometric model, the main factors influencing transportation carbon emissions efficiency are population size, income level, transport intensity, elements endowment, transportation structure and the level of energy-saving technology. Among these, the level of energy-saving technology has positive impact on efficiency, and others have negative impact on efficiency.

Key words: total factor carbon emissions efficiency; transport carbon reduction; supper efficient-SBM model; spatial autocorrelation analysis; spatial econometrics model