

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)¹

蒋自然^{1, 2}, 金环环¹, 王成金^{2*}, 叶士琳³, 黄艳豪¹

(1. 浙江师范大学经济与管理学院, 金华 321004; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350117)

【摘要】: 采用“自上而下”的方法测度了长江经济带 1985-2016 年交通碳排放量并分析其空间格局和时序演化特征; 在考虑非期望产出的基础上, 剔除外部环境变量和随机误差的影响, 构建了三个阶段 DEA 模型进行长江经济带交通碳排放效率值的评价与比较。结果发现: ①长江经济带交通碳排放总量呈不断上升趋势, 其中石油类能源消费产生的排放量占比最大, 四川、两湖地区和苏浙沪地区分别是长江上、中、下游交通碳排放的高值区。②从东西方向看, 交通碳排放重心总体上呈现先东移、后西移的变动轨迹; 从南北方向看, 在空间上突出表现为越来越向长江沿岸集中分布的特征。③不同省份的交通碳排放效率值存在明显的空间分异现象; 2007~2016 年东部地区的效率值始终最高, 但中部地区的效率值由高于西部地区演变为低于西部地区。④外部环境因素对交通碳排放效率具有显著性影响, 其中产业结构优化始终有利于交通碳排放效率提升, 而政府干预的影响则由“创新补偿”效应转变为“遵循成本”效应。

【关键词】: 交通碳排放; 长江经济带; 空间格局; 三段 DEA; 效率分析

DOI:10.13227/j.hj.kx.201910221

从 1992 年巴西里约热内卢《联合国气候变化框架公约》达成至 2018 年德国波恩新一轮气候谈判“塔拉诺阿对话”开启, 气候问题早已成为全球共同关注与环境科学研究的热点。截至 2018 年末, 我国一次能源消耗总量达 37.7 亿 t 标准煤, 占全球消费总量的 23.6%, 超排名第二的美国 7 个百分点, 其中交通运输业是社会碳排放流动的重要源头之一^[1, 2]。随着经济水平的提高和城市化进程的深入推进, 我国交通运输业保持高速发展, 私人汽车由 2000 年的 625.33 万辆增长至 2017 年的 18515.11 万辆; 另外, 全社会对铁路、航空等交通运输的需求亦大大增加, 导致其能源消耗呈不断上升的趋势。目前, 交通运输业能源消费量已占到全国 9% 以上。因此, 在“一带一路”倡议和长江经济带建设不断推进的背景下, 剖析交通碳排放效率格局及其时空演化规律, 可为我国经济社会可持续发展提供科学依据和战略支撑。

¹收稿日期: 2019-10-29; 修订日期: 2020-01-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801111, 41901138); 浙江省自然科学基金项目(LY18D010004); 中国博士后科学基金项目(2018M630195)

作者简介: 蒋自然(1983~), 男, 博士后, 讲师, 主要研究方向为交通地理和环境经济, E-mail: jzr729@zjnu.cn
通信作者, E-mail: cjwang@igsrr.ac.cn

国内外学者围绕交通碳排放的研究主要集中在如下4个方面：其一，考虑到国内外尚未建立统一的交通碳排放核算指标体系，学者们尝试采用多重方法对交通碳排放强度进行间接测度，如左大杰等^[3]和陶玉国等^[4]先后运用“自上而下”法和“自下而上”法进行区域交通碳排放强度测算；Sim^[5]基于系统动力学模型构建了集装箱码头交通碳排放的测度模型，并以韩国釜山港的某码头为案例进行验证和预测；另还有郝旭等^[6]以上海市为例，研究了基于插电式混合动力汽车实际运行数据的碳排放估计方法。其二，关于交通碳排放影响因素的研究，最常见的是运用LMDI分解及相关定量分析不同尺度交通碳排放的影响因素^[7-13]，Kimbrough等^[14]通过实验数据和多元回归模型研究发现交通量、风速、气温以及日期等因素对美国高速公路碳排放有显著性影响，张宏钧等基于贡献率残值分配的Laspeyres指数法研究中国和澳大利亚等其他6国公路与铁路交通碳排放的影响因素；其三，关于碳排放与经济、环境的关系的研究成果也较丰富，如Raza等^[16]利用小波分析技术研究美国交通碳排放与能源消费、经济增长之间的关系，认为技术投入和适度规制有利于交通碳排放较少，盖美^[17]运用三元耦合系统研究碳排放效率、经济及环境的耦合协调关系；其四，探讨碳排放的效率问题，如华坚等^[18]将Fried提出的三阶段DEA模型运用到中国碳排放效率中，更加客观地反映了我国各升级行政单元能源碳排放绩效^[19,20]，王白雪等^[21]利用超效率SBM模型分析北京市公共交通碳排放效率，并基于ML指数研究碳排放效率的动态变化；Cucchiella等^[22]使用ZSG-DEA模型对欧盟国家能源效率进行测度，并分配各国的二氧化碳的排放限额，以期提高欧盟整体的能源消费效率。综上所述，目前学术界对于交通碳排放的研究侧重于强度测算、因素分析或效率评价单方面评价，缺乏将三者纳入统一的分析框架；同时，从空间视角对评价结果进一步挖掘的分析文献仍较少^[25-28]；另外，现有研究对象多为发达地区，鲜有对横贯我国东西部的长江经济带的大尺度研究。为此，本文基于省域单元尺度，首先测算出长江经济带1985-2016年各省域单元的交通碳排放强度，分析其时空演化特征；其次建立考虑非期望产出的DEA_BCC模型测算碳排放的初始效率值；然后分析影响交通碳排放效率的外部环境因素，剔除外部环境和随机干扰项的影响，得出最终效率值并进行空间异质性分析；最后在全文小结的基础上提出相关政策建议。

1 研究区范围

长江经济带自西向东横贯重庆至上海11个省市，是我国的经济重心所在和中华民族发展的生命河，在长江经济带经济实力快速提升的同时，必须从长远利益考虑，把环境保护摆在压倒性位置。与此同时，交通运输是长江经济带的重要职能和长久发展的关键保障，研究长江经济带交通碳排放强度以及在既定投入条件下增加期望产出、降低非期望产出的碳排放效率，不论在理论还是实践上都显得刻不容缓。长江经济带交通碳排放强度有何分布规律和演化趋势？其效率具有何种空间分布特征？哪些外部因素会影响交通碳排放效率值？回答这些问题对我国推进长江经济带环境保护和健康高质量发展具有重要价值。

2 材料与方方法

2.1 交通碳排放测算

由于二氧化碳主要由煤炭等一次能源消耗而产生，我国目前尚没有直接体现碳排放量的指标数据，因此关于碳排放量的测度方法主要是通过对能源消费的计算间接推算获取，学界目前主要采用如下四类方法进行度量：“自上而下”法、“自下而上”法、生命周期评估法和“总量-结构”法。其中，“自下而上”法需要确定各种交通方式的车辆保有量及其行驶里程数、燃料单位耗量等，目前统计很难做到如此有效细分；生命周期法则统计各种交通工具整个有效寿命中的能源消耗，计算异常复杂；“总量-结构”法需获取交通年出行方式及总量，其数据量十分庞大。因此，综合考虑数据的可获取性及操作的可行性，本文采用“自上而下”的方法来测算长江经济带交通碳排放量，具体计算公式为：

$$C = \sum E_i \times F_i \times K_i$$

式中，C为交通碳排放总量，万t； E_i 为第i类能源的实物消费量，万t； F_i 为第i类能源折算标准煤系数，t标准煤/t； K_i 为第i类能源碳排放系数，t碳/t； $i=1, 2, \dots, 7$ ，分别为原煤、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和电力。其中，折算标准煤系数参照最新版文献^[29]中附录(表1)；各类能源碳的排放系数主要借鉴吴开亚等^[30]的研究结果(表2)。

表 1 各种能源折标准煤系数

能源	F _i	能源	F _i
原煤	0.7143	燃料油	1.4286
汽油	1.4714	天然气	1.3300
煤油	1.4714	电力	0.1229
柴油	1.4571		

表 2 各类能源的碳排放系数

能源	K _i	能源	K _i
原煤	0.7329	燃料油	0.5574
汽油	0.5574	天然气	0.4226
煤油	0.5574	电力	0.000
柴油	0.5574		

DEA (data envelopment analysis)测度模型由美国著名运筹学家 Charnes 等^[31]于 1978 年提出, 在处理多指标投入和产出方面体现了良好的效果, 被各行业广泛应用。本文在传统 DEA 模型的基础上, 引入随机前沿分析模型(stochastic frontier analysis, SFA)来剔除环境因素及随机误差带来的影响, 通过多阶段分析得出更准确的结果。具体做法如下:

第一阶段: 传统 DEA 模型。将原始投入和产出数据输入模型进行初始的效率评价, 同时得出相应的投入松弛变量。考虑到投入要素相对于产出要素更加容易控制, 本文选择投入导向、规模报酬可变的 BBC 模型进行分析。在此基础上, 将综合技术效率(TE)分解为纯技术效率(PTE)和规模效率(SE)进行进一步分析。由于该模型是 DEA 模型中的成熟模型, 其原理和数学公式本文不再赘述。

第二阶段: SFA 回归模型。根据 Fried 等^[23]的思想, 第一阶段计算出的松弛变量受管理无效率、环境因素和统计噪声的共同影响, 因此可以借助 SFA 模型分离出环境因素和随机误差的影响, 即构建松弛变量与环境因素、随机因素以及管理无效率项的回归方程:

$$S_{ni} = f(Z_i; \beta_n) + v_{ni} + \mu_{ni}; i = 1, 2, \dots, I; n = 1, 2, \dots, N$$

式中, S_{ni}是长江经济带第 i 个省级行政单元第 n 项投入的松弛值; Z_i是环境变量, β_n是环境变量的系数; v_{ni}+μ_{ni}是混合误差项, v_{ni}表示随机干扰项且服从 V~N(0, σ²)分布; μ_{ni}是管理无效率项且服从在零点截断的正态分布, 即 μ_{ni} ∼ N(μ, σ²); v_{ni}和 μ_{ni}独立不相关。这里, 当 γ=σ_μ²/(σ_μ²+σ_v²)趋向于 1 时, 说明管理因素的影响占主导地位; 当 γ=σ_μ²/(σ_μ²+σ_v²)趋向于 0 时, 说明随机误差占主导地位。

进一步利用 SFA 模型的回归结果对原始省域单元的投入进行调整, 将所有省域单元调整到相同的环境条件下, 同时考虑随机干扰项的影响。调整方式如下:

$$X_{ni}^* = X_{ni} + [max(f(Z_i; \hat{\beta}_n)) - f(Z_i; \hat{\beta}_n)] + [max(v_{ni}) - v_{ni}] \quad i = 1, 2, \dots, I; n = 1, 2, \dots, N$$

式中, X_{ni}^* 是调整后的投入; X_{ni} 是调整前的投入; $[\max(f(Z_{ij}; \hat{\beta}_n)) - f(Z_{ij}; \hat{\beta}_n)]$ 是对外部环境因素进行调整; $[\max(v_m) - v_m]$ 是将所有省域单元置于相同运气水平下。

第三阶段: 调整后的 DEA 模型。第二阶段已将环境因素及随机误差的影响剔除, 此时用调整后的投入数据代替原始的投入数据, 再次构建 DEA 模型计算相对效率值, 得到的结果能更加客观准确地反映各决策单元的效率状况。

2.3 数据来源与处理

长江经济带的交通能源消耗数据来源于文献^[29]; 用于 SFA 随机前沿分析的经济数据来源于 11 个省级行政单元相应年份的统计年鉴。考虑到数据收集的连续性和 1997 年前重庆隶属四川管辖, 本文在分析长江经济带交通碳排放的效率格局时, 主要测度了 1997-2016 年的效率值。在第一和第三阶段 DEA 模型中, 选取资本、劳动力、能源作为 3 个投入变量, 分别将交通运输业生产总值、二氧化碳排放量作为期望产出和非期望产出变量。其中, 资本要素采用参考张军等^[32]的研究方法, 由固定资本形成量表征; 对非期望产出的处理, 本文参考华坚等^[20]的研究方法, 用线性数据转换函数法进行处理。线性数据转换法是通过一种线性的数据转化函数 $f(x) = v - x$ 将非期望产出转化为期望产出的方法: 为保证 v 是一个足够大的量使得所有转化得出的期望产出均为正数, 设第 i 个决策单元在第 j 年的二氧化碳排放量为 C_{ij} , 记作: $C_{ij} = (C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{ij})^T > 0$, ($i = 1, 2, \dots, n$), 设 $v = \frac{\max_{1997 \leq j \leq 2016} \{C_{ij}\}}{\gamma} + \gamma$, 其中 γ 为任意大于零的常数。很明显, 转换后得到的新期望产出可以表示为 $C_{ij}' = -C_{ij} + v$, 不难发现 C_{ij}' 必定为正数, 转变为同国内生产总值一样越大越好的期望产出。

另外, 在第二阶段 SFA 模型中, 为使研究更具针对性, 本文在参考已有文献的基础上, 主要考虑两方面的外部环境因素, 即产业结构和政府影响。一般认为, 产业结构优化程度越高, 越有利于交通碳排放效率提升。关于政府影响方面, 一种观点是以新古典经济学思想为基础的传统学派, 认为政府干预会导致企业环境治理成本增高, 不利于交通碳排放效率提升,

即“遵循成本”效应; 另一种观点是以波特为代表的修正学派, 合适的政府干预不仅能弥补企业环境治理成本, 还能激发企业的创新能力、提高企业生产率和竞争力, 即著名的“波特假说”或称为“创新补偿”效应^[33]。借鉴已有研究的做法, 本研究的产业结构由第三产业占 GDP 比重表示^[34], 政府影响由各地区财政支出占 GDP 比重表示^[35], 数据来自 1998-2017 年国家及地方统计年鉴。

3 结果与分析

3.1 交通碳排放强度格局及演化特征

由公式 (1) 测算 1985-2016 年长江经济带 11 省市交通碳排放强度 (表 3), 结果表明, 1985-2016 年长江经济带的交通碳排放总量总体上呈显著的增长趋势, 由 1985 年的 570.27 万 t 增加到 2016 年的 7744.88 万 t, 年均涨幅 12.58%。其中, 一次能源中石油类能源消耗产生的碳排放量最大, 天然气产生的碳排放量最小。从时序演化看 (图 1), 长江经济带交通碳排放大体上可分为 3 个时期: 第一阶段为 1985-2003 年, 碳排放量呈现波动上升的趋势, 这一时期我国长江经济带所在地区处于快速工业化发展阶段, 各个行业领域在不断开发且尚处于以煤炭为主的能源结构, 同时交通运输业得到空前的发展, 因此交通碳排放量逐年增长, 增速在 2003 年达到最大值。这其中 1997 年增速的减缓主要与我国“九五”期间实行的限期达标排放措施, 强制整改甚至关闭了一批能耗高和污染大的工业企业有关。第二阶段为 2003-2013 年, 碳排放量仍然在不断增加, 但是增速开始明显放缓, 期间国家先后出台了《中华人民共和国清洁生产促进法》和《能源中长期发展规划纲要》等, 强调大力调整和优化能源结构, 综合考虑能源生产、运输和消费的合理配置, 促进能源与交通运输协调发展, 使得排放增速在 2003 年后开始不断下降。第三阶段为 2013 年以后, 尽管受环境规制强化、“不搞大开放”、“绿水青山就是金山银山”等理念的深刻影响, 长江经济带交通碳排放增速处于近 20 年的低值区间, 但随着私家车等交通工具的普及化, 尤其对经济相对富裕的长江经济带而

言，2013 年以来交通碳排放总量又呈现增长态势，此现象应引起国家及长江沿岸地区 相关部门的注意。

表 3 长江经济带交通运输能源消费碳排放量/万 t

年份	交通碳排放总量	煤炭	石油类能源碳排放				天然气
			汽油	煤油	柴油	燃油	
1985	570.27	217.12	140.94	11.04	201.11	0.00	0.06
1995	1014.32	157.85	372.68	65.23	351.03	67.22	0.31
2000	1630.46	134.54	562.64	115.17	597.20	220.58	0.34
2004	3059.29	123.81	1055.03	255.64	1210.18	413.63	1.01
2008	4894.77	183.34	1398.49	528.90	2122.77	658.41	2.86
2012	6164.08	275.73	1646.85	744.99	2806.52	675.17	14.82
2016	7744.88	151.52	2174.31	1176.46	3463.03	757.02	22.54

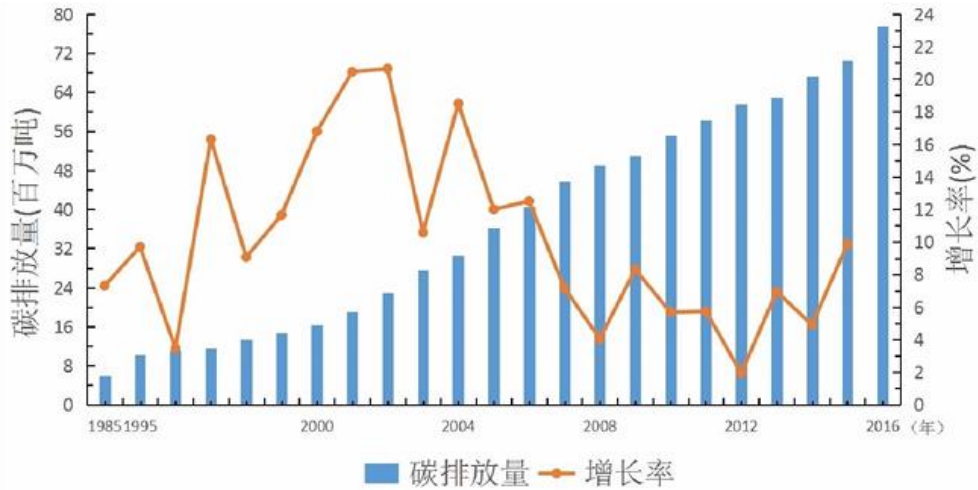


图 1 1985-2016 年长江经济带碳排放及年增速图

为了清晰揭示长江经济带交通碳排放强度的空间格局，本文基于 ArcGIS 软件平台对 1985-2016 年各省级行政区的交通碳排放强度进行可视化表达，并运用自然断裂点法将各省市划分为低碳排放区、中度排放区、较高排放区和高碳排放区 4 种类型（图 2）。

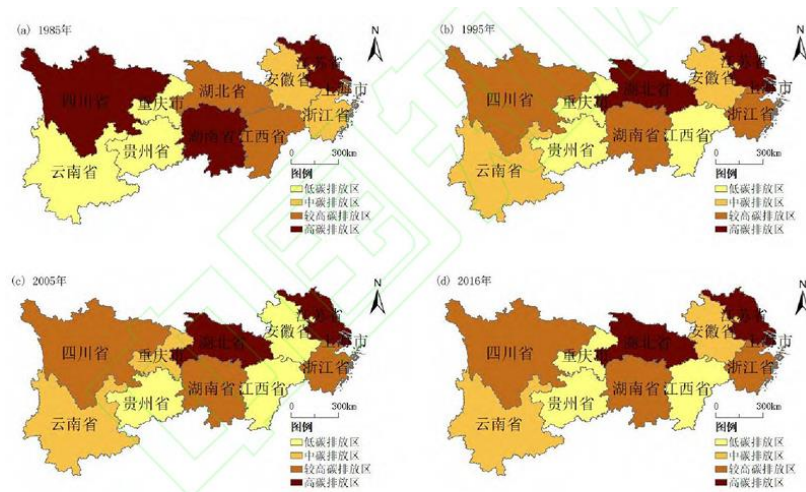


图2 1985~2016年交通碳排放强度等级划分

由图2看出，长江经济带下游的苏浙沪地区、中游的两湖地区以及上游四川的交通碳排放量始终较大，在空间上形成3个明显的高值区域。苏浙沪地区历来人口众多、经济发达和路网密集，尽管各级政府十分重视减排工作并取得了一定效果，但由交通运输业产生的碳排放总量在长江经济带仍然处于前列。湖南、湖北两省位于长江中游，具有天然的航运优势，交通便利且地势平坦、区位良好、工农业发达，很多高耗能、高污染和高耗水的大型工业企业及其配套物流体系分布在该地区，同时在中部崛起战略和长江中游城市群建设等重大区域战略的影响下，两湖地区的交通碳排放总量也一直处于较高水平。作为中国西部地区的经济强省和人口大省，四川具备门类齐全的工业体系和优势突出的物流业、旅游业和商贸零售业等，随着西部大开发、长江经济带等国家战略先后深入推进，四川在其交通运输优势得到明显提升的同时，交通碳排放压力也在相应增加，不论重庆是否归其管辖，四川交通碳排放量始终位居西部地区的首位。另外，安徽、江西、重庆和贵州这4个省份的交通碳排放强度始终较为稳定，总体上在长江经济带处在较低排放水平。

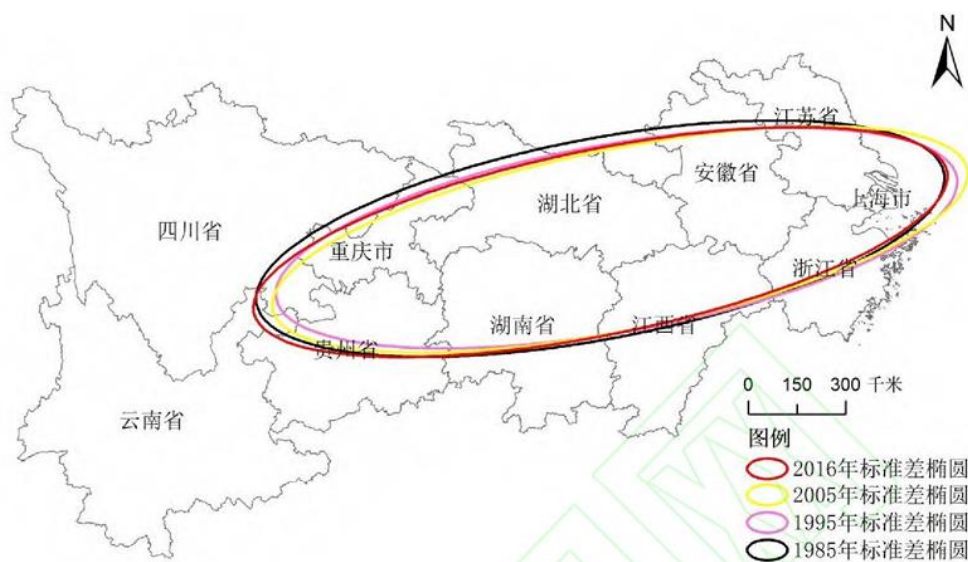


图3 1985~2016年交通碳排放标准差椭圆分析

以每个年份交通碳排放强度值为权重，运用标准差椭圆法分析长江经济带交通碳排放的方向分布特征及其演化规律。可以发现：①从椭圆中心性看，交通碳排放的重心集中分布在长江经济带的东部区域；1985~2005年椭圆中心自西北向东南方向偏

移,说明该时期交通碳排放中心仍在不断地向东迁移,同时也表明南部的云南、贵州等省份的交通碳排放量增长得更明显;2005年以后,椭圆中心开始向西回移,表征中西部地区的交通碳排放量开始更快增长。②从椭圆展布性看,椭圆的长轴逐渐变长、短轴不断变短、分布面积缩小,表明交通碳排放的空间分布更加集中,空间上越来越倾向于在长江沿岸地区分布。③从椭圆方向性看,椭圆的转角由1985年的79.2。逐渐减小至2016年的78.4。反映其正由南-北方向分布往东-西方向分布转型,也进一步证实了长江经济带交通碳排放空间分布的临江区位指向不断增强。

3.2 交通碳排放效率分析及时空分异

首先,利用Deap2.1软件对1997-2016年长江经济带11省级行政单元交通碳排放效率值进行初步测算(表4),并把整个区域交通碳排放的效率值进行均值化处理;然后,将投入变量的松弛变量作为被解释变量,将政府影响力和产业结构2个环境变量作为解释变量,运用Frontier4.1软件进行SFA回归分析,考虑到文章篇幅及可比较性,这里仅列出2007年和2016年的回归结果(表5);最后,依据SFA分析结果调整投入变量值,将所有研究单元置于相同的环境因素和运气水平下,并再次对长江经济带交通碳排放的效率值及其规模报酬状态进行估计(表6)。

表4 第一阶段长江经济带交通碳排放效率¹⁾

地区	2007年				2016年			
	TE	PTE	SE	RS	TE	PTE	SE	RS
上海	1	1	1	—	1	1	1	—
江苏	0.981	1	0.981	drs	1	1	1	—
浙江	1	1	1	—	0.967	0.973	0.995	drs
安徽	0.967	1	0.967	drs	0.884	0.901	0.98	drs
江西	1	1	1	—	1	1	1	—
湖北	0.881	0.881	1	—	0.8	0.814	0.983	irs
湖南	0.998	1	0.998	drs	0.844	0.85	0.993	irs
重庆	1	1	1	—	1	1	1	—
四川	0.875	0.888	0.985	drs	0.865	0.9	0.962	drs
贵州	1	1	1	—	1	1	1	—
云南	0.819	0.838	0.977	irs	0.607	0.724	0.839	irs

1) TE表示综合技术效率, PTE表示纯技术效率, SE表示规模效率, RS表示规模报酬状态, irs表示规模报酬递增, drs表示规模报酬递减, —表示规模报酬不变

在不考虑环境和随机误差的影响下,从第一阶段的测度结果看出,长江经济带交通碳排放平均技术效率在20年间呈现先递增后递减的趋势,综合技术效率的年平均值为0.943,即与生产前沿面相差约16个百分点,仍有较大的提升空间。另外,还可以发现,不论2007还是2016年,各省域单元规模效率均值明显高于纯技术效率均值,说明纯技术效率可能是引起长江经济带效率损失的主要原因。

表5 随即前沿分析(SFA)回归结果¹⁾

参数	2007年			2016年		
	资本存量 松弛量	劳动力 松弛量	能源 松弛量	资本存量松 弛量	劳动力 松弛量	能源 松弛量
常数值	47.43***	1012.59***	2018.94***	12.55***	271.59***	73.75***
政府影响力	-40.30***	-794.51***	-1891.32***	76.16***	821.08***	344.09***
产业结构	-1.16***	-25.13***	-49.03***	-0.82***	-12.23***	-4.11***

sigma-squared	1183.44***	375548.68***	2229659.20***	434.12***	160046.46***	10931.82***
γ	0.99***	1.00***	1.00***	0.99***	1.00***	1.00***
log likelihood function	-45.76	-77.65	-87.15	-41.59	-72.51	-58.71
LR test of one-sided error	7.32***	6.90***	7.50***	4.62***	7.81***	5.88***

1) ***表示通过显著性水平为1%的检验

然而，不考虑外部环境及随机误差的干扰是无法反应效率的真实情境，因此需经过第二阶段 SFA 回归进行调整，由表 5 可知， γ 值均大于 0.9 且 2 个环境因素对投入松弛的影响都较为显著，说明对环境与随机误差进行剔除很有必要。进一步分析环境变量对投入松弛的影响，发现在 2007 年产业结构和政府影响力对 3 个因变量的影响都为负向，即产业结构的优化和政府交通运输业上的财政支出会减少不变产量的投入浪费，有利于提高交通碳排放效率；而到了 2016 年，产业结构对 3 个因变量的负向抑制作用不变，但政府影响力的作用变为显著正向，即由“创新补偿”效应转为“遵循成本”效应，此时政府影响力的提升会导致交通运输业在资本、劳动力和能源消费投入上的浪费，不利于交通碳排放效率的提高，这让“波特假说”在中国是否成立的疑点凸现，即当环境规制水平超过一定的范围，其对交通碳排放效率的提升反而会起抑制作用 [36, 37]。

在剔除环境影响和随机误差的干扰后，可以发现，调整后的交通碳排放效率值与第一阶段的效率值之间存在显著差异（表 6）：长江经济带交通碳排放的纯技术效率和规模效率普遍得到提高，其中综合技术效率的均值由原来的 0.943 上升为 0.951，纯技术效率由 0.957 到 0.965，规模效率从 0.981 上升为 0.985。由此可见，在未剔除环境影响和随机因素的情况下，长江经济带的纯技术效率值和规模效率值被低估。同样考虑到文章篇幅和可对比性，表 6 仅列出 2007 年和 2016 年长江经济带第三阶段交通碳排放效率的测算结果及其规模报酬状态。从具体省域看，调整后的效率值中，除了浙江 2016 年的规模效率有所降低以外，其他各项效率值均在提高或保持不变，说明外部环境和随机误差总的来说对长江经济带交通碳排放效率产生负向干扰。从效率结构变动看，2007 年规模效率均值为 0.995，明显高于纯技术效率均值的 0.969，这与第一阶段分析的结论一致；但 2016 年规模效率均值降为 0.959，低于纯技术效率的 0.986，表明 2016 年除了纯技术效率影响效率损失之外，规模不经济也成为掣肘长江经济带交通碳排放效率的另一重要因素。

表 6 第三阶段长江经济带交通碳排放效率¹⁾

地区	2007 年				2016 年			
	TE	PTE	SE	RS	TE	PTE	SE	RS
上海	1	1	1	—	0.965	1	0.965	irs
江苏	1	1	1	—	1	1	1	—
浙江	1	1	1	—	0.965	0.976	0.988	irs
安徽	0.998	1	0.998	drs	0.941	0.951	0.990	irs
江西	1	1	1	—	1	1	1	—
湖北	0.892	0.897	0.994	irs	0.829	0.996	0.832	irs
湖南	1	1	1	—	0.923	0.995	0.927	irs
重庆	1	1	1	—	1	1	1	—
四川	0.888	0.895	0.992	drs	0.921	0.949	0.971	irs
贵州	1	1	1	—	1	1	1	—
云南	0.841	0.875	0.961	irs	0.859	0.986	0.872	irs

1) TE 表示综合技术效率，PTE 表示纯技术效率，SE 表示规模效率，RS 表示规模报酬状态，irs 表示规模报酬递增，drs 表示规模报酬递减，—表示规模报酬不变

以第三阶段的测算结果为最终效率值，进一步分析长江经济带交通碳排放的效率格局。从东、中、西三大地区分异看，2007 年长江经济带交通碳排放效率均值在空间上呈现东部 > 中部 > 西部的特征，这与东、中、西三大地带的经济发展水平相匹配，

表征 2007 年长江经济带经济系统与交通碳排放系统具有高度的相关性；但到了 2016 年，东部地区的交通碳排放效率依然最高，而中部地区由于规模效率相对较低而使得其综合技术效率均值小于西部地区。

从省域单元分异看，2007~2016 年江苏、江西、重庆和贵州四省的交通碳排放效率始终处于效率前沿面，这些省份十分重视环境保护和减排工作，并将交通运输业作为碳排放重点治理行业；同时，在长江经济带“共抓大保护，不搞大开发”的发展理念下，结合自身发展现状，从省级层面先后颁布了一系列政策文件^[39]，为推动其交通碳排放效率提升起到积极效果。上海和湖北由于规模效率下降导致它们综合技术效率偏离随机前沿面，规模报酬递增表明它们仍存在进一步增加规模投入的空间。浙江、安徽和湖南的纯技术效率与规模效率同步下降，其中安徽和湖南作为中部地区省份，两省先后成立了国家级产业转移示范区，在承接了东部沿海地区大量转移产业的同时，也促进交通运输相关行业的迅猛发展，然而面对交通运输业发展所带来的大量碳排放，两省采取的限制技术及相关制度安排均不能迅速适应这一形势变化，进而导致纯技术效率和规模效率双双下降；而浙江交通碳排放效率下降与人口增长、私家车拥有量持续上升以及近年浙江沿海、内河航运的快速发展等多种因素密切相关。四川和云南的各类效率均呈明显的增长态势，它们的主导产业并非耗能最大的第二产业，农业与旅游业在其国民生产总值中占重要份额，加上对碳排放控制工作的重视以及减排技术的进步，四川和云南两省的交通碳排放效率得到了有效的提升。

4 结论

(1) 长江经济带碳排放强度上升趋势明显，其中石油类能源消耗产生的碳排放贡献最大，长江上、中、下游排放高值区分别是四川、两湖以及苏浙沪地区；交通碳排放分布中心呈先东后西移动规律，并且越来越集中于长江沿岸分布。

(2) 交通碳排放效率存在明显的空间分异，其中东部地区的效率值始终高于中西部地区，中部地区的效率值在 2007 年高于西部地区，但 2016 年较西部地区低。

(3) 外部环境因素影响交通碳排放效率，其中产业结构优化总是有利于效率提升，但政府干预的影响则由正向效应转向负向作用。

(4) 鉴于研究结果，从以下 4 个方面提出政策建议：①建立交通碳排放协同调控机制。从国家层面做好顶层设计，强化长江经济带治理的全局意识。②优化综合运输结构和产业结构。一方面大力推行公共交通先行政策或电动汽车的使用，另一方面进一步升级产业结构，加强交通减排技术研发和推广。③提升政府引导和服务职能。发挥政府的舆论宣传和科学引导作用，避免直接规制带来的“遵循成本”效应，大力践行绿色出行理念，完善长江经济带物流网络建设。④注重交通碳排放差异化治理。结合本地实际有针对性地制定科学减排政策，特别要加快“高排放、低效率”地区的治理工作，注重“低排放、高效率”地区治理模式推广，强化区域之间交通碳排放信息共享和治理经验交流。

参考文献：

[1] 赵巧芝, 闫庆友. 基于投入产出的中国行业碳排放及减排效果模拟[J]. 自然资源学报, 2017, 32(9):1528-1541. Zhao Q Z, Yan Q Y. Simulation of industrial carbon emissions and its reduction in China based on input-output model[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(9):1528-1541.

[2] Zhang L, Long R, Chen H, et al. A review of China's road traffic carbon emissions [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 569-581.

[3] 左大杰, 戴文涛, 熊杰, 等. 基于 EKC 视角的四川省交通碳排放和行业增长关系的实证研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(4): 129-136. Zuo D J, Dai W T, Xiong J, et al. Empirical study on relationship between traffic carbon emission and industry

growth in Sichuan province based on EKC perspective [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35(4): 129-136.

[4]陶玉国,黄震方,史春云.基于替代式自下而上法的区域旅游交通碳排放测度[J].*生态学报*,2015,35(12):4224-4233.Tao Y G, Huang Z F, Shi C Y. Carbon dioxide emissions from regional tourism transport: A substitutional bottom-up analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 4224-4233.

[5]Sim J. A carbon emission evaluation model for a container terminal [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 526-533.

[6]郝旭,王贺武,李伟峰,等.基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的PHEV二氧化碳排放分析[J].*环境科学*,2019,40(4):1705-1714.Hao X, Wang H W, Li W F, et al. Analysis of PHEV CO₂ emission based on China's grid structure and travelling patterns in mega cities [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4): 1705-1714.

[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*,2015,28(10):112-119.Yu B, DaY 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.

[8]Wang B, Sun Y, Chen Q, et al. Determinants analysis of carbon dioxide emissions in passenger and freight transportation sectors in China[J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2018, 47: 127-132.

[9]Guo M, Meng J. Exploring the driving factors of carbon dioxide emission from transport sector in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 692-705.

[10]Sim J. A carbon emission evaluation model for a container terminal [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 526-533.

[11]卢愿清,史军.中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析[J].*环境科学*,2012,33(7):2528-2532.Lu Y Q, Shi J. Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7): 2528-2532.

[12]吕倩.京津冀地区汽车运输碳排放影响因素研究[J].*中国环境科学*,2018,38(10):3689-3697.Lv Q. Study on the driving factors of vehicle transport carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(10): 3689-3697.

[13]De Oliveira-De Jesus P M. Effect of generation capacity factors on carbon emission intensity of electricity of Latin America & the Caribbean, a temporal IDA-LMDI analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 101: 516-526.

[14]Kimbrough S, Hanley T, Hagler G, et al. Influential factors affecting black carbon trends at four sites of differing distance from a major highway in Las Vegas[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2018, 11(2): 181-196.

[15]张宏钧,王利宁,陈文颖.公路与铁路交通碳排放影响因素[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2017,57(4):443-448.Zhang

H J, Wang L N, Chen W Y. Decomposition analysis of CO₂ emissions from road and rail transport systems [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(4): 443-448.

[16]Raza S A, Shah N, Sharif A. Time frequency relationship between energy consumption, economic growth and environmental degradation in the United States: Evidence from transportation sector [J]. Energy, 2019,173: 706-720.

[17]盖美, 张福祥. 辽宁省区域碳排放-经济发展-环境保护耦合协调分析[J]. 地理科学, 2018, 38(5):764-772. Gai M, Zhang F X. Regional carbon emissions, economic development and environmental protection coupling in Liaoning Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(5): 764-772.

[18]华坚, 任俊, 徐敏, 等. 基于三阶段 DEA 的中国区域二氧化碳排放绩效评价研究[J]. 资源科学, 2013, 35(7): 1447-1454. Hua J, Ren J, Xu M, et al. Evaluation of Chinese regional carbon dioxide emissions performance based on a three-stage DEA model [J]. Resources Science2013, 35(7): 1447-1454.

[19]Zhou Z, Liu C, Zeng X, et al. Carbon emission performance evaluation and allocation in Chinese cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,172: 1254-1272.

[20]Xie C, Bai M, Wang X. Accessing provincial energy efficiencies in China' s transport sector [J]. Energy policy, 2018, 123: 525-532.

[21]王白雪, 郭琨. 北京市公共交通碳排放效率研究——基于超效率 SBM 模型和 ML 指数[J]. 系统科学与数学, 2018, 38(4): 456-467.

Wang B X, Guo K. The efficient of carbon emissions efficiency of Beijing public transportation system: Based on super -efficiency SBM model using Malmquist-Luenberger Index[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2018, 38(4): 456-467.

[22]Cucchiella F, D'Adamo I, Gastaldi M, et al. Efficiency and allocation of emission allowances and energy consumption over more sustainable European economies[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,182: 805-817.

[23]Fried H O, Lovell C A K, Schmidt S S, et al. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment [J]. Journal of Productivity Analysis, 2002, 17(1): 157-174.

[24]Wang B X, Guo K. The Efficient of carbon emission efficiency of Beijing public transport system: Based on super-efficiency SBM model using Malmquist-luenberger index[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2018, 38(4): 456-467.

[25]赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫. 泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究[J]. 环境科学, 2014, 35(11): 4387-4394. Zhao H X, Jiang X W, Cui J X. Shifting path of industrial pollution gravity centers and its driving mechanism in Pan-Yangtze River Delta[J]. Environmental Science, 2014, 35(11): 4387-4394.

[26]张诗青, 王建伟, 郑文龙. 中国交通运输碳排放及影响因素时空差异分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4787-4797. Zhang S Q, Wang J W, Zheng W L. 2017. Spatio-temporal difference of transportation carbon emission and

its influencing factors in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 37(12): 4787-4797

[27]张永年, 潘竟虎. 基于 DMSP/OLS 数据的中国碳排放时空模拟与分异格局[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1436-1446. Zhang Y N, Pan J H. Spatio-temporal simulation and differentiation pattern of carbon emissions in China based on DMSP/OLS nighttime light data[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(4): 1436-1446.

[28]孙秀锋, 施开放, 吴健平. 县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2971-2981. Sun X F, Shi K F, Wu J P. Spatiotemporal dynamics of CO₂ emissions in Chongqing: An empirical analysis at the county level[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2971-2981.

[29]国家统计局能源统计司, 国家能源局综合司. 中国能源统计年鉴[M]. 中国统计出版社, 1986-2017.

[30]吴开亚, 何彩虹, 王桂新. 上海市交通能源消费碳排放的测算与分解分析[J]. *经济地理*, 2012, 32(11): 45-51. Wu K Y, He C H, Wang G X. Measurement and decomposition analysis of carbon emissions of transportation industry in Shanghai[J]. *Economic Geography*, 2012, 32(11): 45-51.

[31]Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.

[32]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. Recalculating the capital of China and a review of Li and Tang's article [J]. *Economic Research Journal*, 2003, 7: 35-43.

[33]张华, 王玲, 魏晓平. 能源的“波特假说”效应存在吗?[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(11): 33-41. Zhang H, Wang L, Wei X P. Is there really a “Porter Hypothesis,, effect of energy? [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(11): 33-41.

[34]方敏, 杨胜刚, 周建军, 雷雨亮. 高质量发展背景下长江经济带产业集聚创新发展路径研究[J]. *中国软科学*, 2019, 5: 137-150. Fang M, Yang S G, Zhou J J, Lei Y L. The innovative development path of industry agglomeration in Yangtze River Economic Belt under the background of high-quality development[J]. *China Soft Science*, 2019, 5: 137-150.

[35]肖磊, 鲍张蓬, 田毕飞. 我国服务业发展指数测度与空间收敛性分析[J]. *数量经济技术经济研究*, 2018, 35(11): 111-127. Xiao L, Bao Z P, Tian B F. Study on the development index and spatial convergence of service industry in China[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2018, 35(11): 111-127.

[36]张英浩, 陈江龙, 程车玉. 环境规制对中国区域绿色经济效率的影响机理研究——基于超效率模型和空间面板计量模型实证分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(11): 2407-2418. Zhang Y H, Chen J L, Cheng Y. Study on the influence mechanism of environmental regulation on green economy efficiency in China—empirical analysis based on super efficiency model and spatial panel metering model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(11): 2407-2418.

[37]陶静, 胡雪萍. 环境规制对中国经济增长质量的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(6): 85-96. Tao J, Hu X P. Research on the effects of environmental regulation on the quality of China's economic growth[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(6): 85-96. 18.

[38] 江苏省人民政府. 关于加快绿色循环低碳交通运输发展的实施意见 [EB/OL]. http://www.jiangsu.gov.cn/art/2015/12/24/art_46645_2556747.html, 2015-12-24.

[39] 江西省交通运输厅. 关于印发江西省公路水路交通运输“十二五”节能减排规划的通知 [EB/OL]. http://www.jiangxi.gov.cn/art/2012/9/10/art_5157_281253.html, 2015-06-18.

[40] 重庆市人民政府. 关于印发“十二五”控制温室气体排放和低碳试点工作方案的通知 [EB/OL]. <http://www.cq.gov.cn/publicity/cxjshjbh/jnyzyzhly/2453>, 2012-09-08.

[41] 贵州省交通运输厅. 贵州省绿色交通行动方案(2014-2017年) [R]. 贵阳, 2014.