

长江经济带交通运输与碳排放耦合协调度分析^{*}

方晨晨, 蒋惠园, 王艳秋, 陈琼蓉

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘要:为实现长江经济带交通运输与碳排放协调发展,对交通运输与碳排放耦合协调性进行分析。将由非期望 Super-SBM 模型测算所得碳排放效率作为碳排放系统指标,构建交通运输与碳排放综合评价指标,并通过熵权法确定指标权重,基于 2005—2016 年长江经济带九省二市数据,测算交通运输与碳排放的耦合度和耦合协调度。结果表明,长江经济带交通运输与碳排放的耦合度平均值大于 0.920,两系统具有较大互动作用;耦合协调度在时间上呈先升后降态势,整体处于勉强协调状态;在空间分布上存在差异,上游省市低于中下游省市,个别省份未达到协调状态;上游省市更应注重交通运输的发展,中下游省市在交通运输发展的同时应加大节能减排力度,提高碳排放效率。

关键词: 交通运输;碳排放;耦合协调度;长江经济带;非期望 Super-SBM

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)02-0019-06

目前,中国正在推动长江经济带上中下游地区协调发展和沿江地区高质量发展,同时注重区域协调和生态文明建设。交通运输业是国民经济发展的重要产业,也是碳排放占比第一、能源消耗第二大产业,其发展势必加剧碳排放,导致生态环境破坏。实现长江经济带交通运输与碳排放协调发展已成为不容忽视的问题。

已有学者通过传统计量模型对交通运输与碳排放关系进行了研究,如吴继贵、蔡婉华等分别采用 VAR、PVAR 模型对交通运输、经济增长和碳排放的互动作用进行了研究,李灵杰等采用 STIRPAT 模型和马尔科夫链分析了交通运输与碳排放的动态转移规律,陈思茹等通过 RAM 模型分析了交通运输行业经济、碳排放及联合效率的分布特征和变动规律。总结以上研究结论,交通运输对碳排放的刺激总体表现为倒 U 形收敛路径,碳排放对交通运输业的短期发展贡献效应突出;东中西的交通运输经济效率、碳排放效率呈现梯度分布特性,交通运输与碳排放具有较强的互动作用。耦合理论不仅能评价系统之间的互动作用强弱,还能评价作用的协调状态。戢晓峰、汪德根等针对公路运输系统与城镇化发展,余菲菲等针对旅游经济系统和交通系统,蒋玲茜等针对县域交通优势度与经济发展进行了耦合协调度分析;姜磊、李雪松等分别对经济发展—资源禀赋—生态环境和经济—社会—环境进行了耦合协调

度分析。上述耦合研究多集中在交通运输和碳排放各自系统,且多为交通运输与经济发展或碳排放与经济发展关系上,缺少对交通运输与碳排放作用关系的研究。事实上,交通运输与碳排放具有较大互动作用。该文以 2005—2016 年长江经济带数据为基础,引入耦合理论,分析交通运输发展与碳排放耦合协调程度。

1 耦合关系与模型

1.1 交通运输与碳排放耦合关系

耦合作为一种动态关联关系,指 2 个或 2 个以上系统之间或某一系统内部要素之间互动作用和影响的整个过程。交通运输快速发展加剧了碳排放,同时受到日益严峻的碳排放约束,两系统间互动作用,属于耦合范畴。一方面,交通基础设施供给为交通运输运行提供必要条件,带动居民出行需求和货物运输需求增长,运输的供给和需求反映交通运输发展水平,影响碳排放数量。单位生产总值消耗的能源是能源利用效率的反映,影响碳排放效率。另一方面,日益严峻的能源短缺和环境污染制约经济发展,并促使相关部门制定政策,进行交通需求管理、调整运输结构、提高能源利用效率。过去一段时间,长江经济带交通运输发展是以能源消耗、环境污染为代价,碳排放作为环境污染的重要指标,实现交通运输与碳排放系统相协调,对于推动长江经济带

^{*} 基金项目: 武汉理工大学自主创新研究基金项目(195202001)

高质量发展具有重要意义。

1.2 耦合协调度模型

1.2.1 耦合度

耦合度是描述系统或系统内部要素之间互动作用、彼此影响程度的参数,其函数表达如式如下:

$$CD = \left[\frac{X_1 \times X_2 \times \cdots \times X_n}{\left(\frac{X_1 + X_2 + \cdots + X_n}{n} \right)^n} \right]^{1/n} \quad (1)$$

式中: CD 为耦合度, $CD \in [0, 1]$, 其值越大, 表明系统之间耦合度越大, 系统之间的发展从无序逐渐转变为有序; X_i 为系统 i 的综合评价指数。

根据交通运输系统和碳排放系统两者关系构建两系统耦合度模型如下:

$$CD = \frac{\sqrt{\frac{f(t) \times f(c)}{\left[\frac{f(t) + f(c)}{2} \right]^2}}}{\sqrt{\frac{f(t) \times f(c)}{\left[\frac{f(t) + f(c)}{2} \right]^2}}} = 2 \frac{\sqrt{f(t) \times f(c)}}{f(t) + f(c)} \quad (2)$$

式中: $f(t)$ 、 $f(c)$ 分别为交通运输系统和碳排放系统综合评价指数, 通过线性加权法计算。

设 t_{ij} 为交通运输系统中 i 省的 j 指标, 则 i 省的交通运输系统综合评价指数 $f(t_i)$ 按下式计算:

$$f(t_i) = \sum_{j=1}^n t_{ij}^{\Delta} \times w_{ij} \quad (3)$$

式中: t_{ij}^{Δ} 为 t_{ij} 标准化值; w_{ij} 为 i 省的 j 指标的权重。

为使评价权重更具客观性, 采用熵权法确定各指标权重。

1.2.2 耦合协调度

协调是 2 个或 2 个以上系统或系统内部要素之间一种良性的互动关系, 并且是这种良性关联性持续发展的集中体现。但耦合度仅能反映两系统互动作用程度的大小, 互动作用大可能是良性关系也可能是恶性关系。耦合协调度兼顾了互动作用大小和协调水平两个分析维度。为更好地反映两系统的协

调发展水平, 构建交通运输系统与碳排放系统耦合协调度模型如下:

$$CCD = \sqrt{CD \times F(t, c)} \quad (4)$$

$$F(t, c) = \alpha f(t) \times \beta f(c) \quad (5)$$

式中: CCD 为耦合协调度; $F(t, c)$ 为系统综合协调系数; α 和 β 为待定系数, 考虑到交通运输与碳排放协调过程中两者具有相同的地位, 且作用程度相同, 令 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

为更好地理解交通运输与碳排放协调发展状况, 以十分法对两系统耦合协调等级进行划分(见表 1)。

表 1 耦合协调度等级划分

协调度	协调等级	协调度	协调等级
[0.00, 0.10]	极度失调	(0.50, 0.60]	勉强协调
(0.10, 0.20]	严重失调	(0.60, 0.70]	初级协调
(0.20, 0.30]	中度失调	(0.70, 0.80]	中级协调
(0.30, 0.40]	轻度失调	(0.80, 0.90]	良好协调
(0.40, 0.50]	濒临失调	(0.90, 1.00]	优质协调

2 指标体系与数据测算

2.1 指标评价体系

根据交通运输与碳排放的耦合关系, 参考相关研究成果, 从运输供给、运输需求和能源利用效率三方面选取 7 个交通运输系统评价指标, 由于航空与管道运输数据获取难度大且对碳排放系统作用较小, 不予以考虑; 从数量状态选取人均碳排放、排放密度、排放强度、碳生产力作为碳排放系统评价指标, 考虑到仅从数量状态不能真实反映碳排放情况, 引入碳排放效率状态。由此构建的交通运输与碳排放综合评价体系见表 2。

表 2 交通运输—碳排放综合评价体系

系统	一级指标	二级指标	指标类型	系统	一级指标	二级指标	指标类型
交通运输	运输供给	铁路营业里程	+	碳排放	数量状态	人均碳排放	—
		公路里程	+			排放密度	—
		内河航道里程	+			排放强度	—
	运输需求	客运量	+		效率状态	碳生产力	+
		旅客周转量	+			综合技术效率	+
		货运量	+			纯技术效率	+
	能源利用效率	货物周转量	+			规模效率	+
		能源强度	—				

注: + 表示越大越优型, — 表示越小越优型; 数据来源于各省市统计年鉴、《中国能源统计年鉴》及国家统计局统计资料。

能源强度表示单位生产总值所需消耗的能源,为交通运输业消耗的标准煤与交通运输业生产总值的比值;碳排放总量根据全社会能源消耗数据及IPCC公布的碳排放因子,通过式(6)累加各能源碳排放量得到。

$$\text{碳排放量} = \text{能源消耗量} \times \text{能源碳排放因子} \quad (6)$$

2.2 碳排放效率测算

碳排放效率广义上表示单位碳排放带来的生产效益。考虑到从单要素角度评价碳排放效率不全面,从全要素角度进行测算。DEA方法可用于全要素即多项投入与多项产出的效率评估,且不受投入、产出量纲的影响,在效率评估中应用广泛。但传统的DEA忽视了投入、产出变量松弛性问题,且不能处理具有非期望产出(二氧化碳)问题。同时,为进一步区分碳排放效率值为1的DMU,构建考虑非期望产出的Super-SBM模型:

$$\begin{aligned} \min \rho = & \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{ik}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{rk}^g} + \sum_{t=1}^{s_2} \frac{s_t^b}{y_{tk}^b} \right)} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} x_{ik} = X\lambda + s_i^- \\ y_{rk}^g = Y^g\lambda - s_r^g \\ y_{tk}^b = Y^b\lambda + s_t^b \\ s_i^-, s_r^g, s_t^b, \lambda \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: ρ 为碳排放效率; s_i^- 和 s_t^b 分别为投入、非期望产出的冗余; s_r^g 为期望产出的不足。

以资本、劳动力、能源3个指标变量作为投入变量,地区GDP作为期望产出,二氧化碳排放量作为非期望产出。资本数据通过永续盘存法及文献[25]中计算基年资本存量的方法进行处理,得到2005—2016年长江经济带九省二市的资本存量;劳动力为各省市的年末从业人数;能源为能源消费总量;期望产出GDP通过平减指数转换成2005年不变价格,调整为实际GDP;非期望产出二氧化碳排放量通过2.1节所述方法得出。

3 测算结果与分析

3.1 碳排放效率分析

通过MaxDea7软件,采用式(7),分别在CRS与VRS条件下得到碳排放综合技术效率与纯技术效率,相除得到规模效率。综合技术效率是表示决策单元效率高低的综合指标,受决策单元的管理、技术水平及规模等因素影响;纯技术效率是指在一定规模水平下受自身管理和技术水平等因素影响的效率;规模效率指受生产规模影响的效率。2005—2016年长江经济带碳排放三类效率的均值见图1。

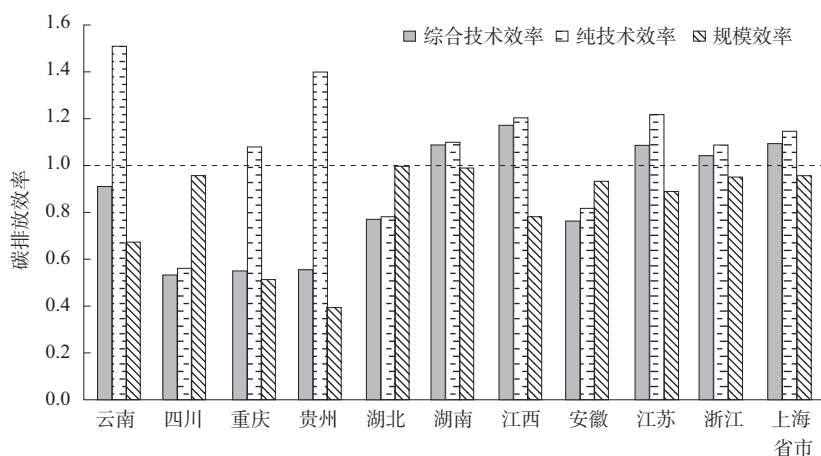


图1 长江经济带2005—2016年碳排放效率平均值

从综合技术效率来看,仅湖南、江西、江苏、浙江和上海的效率值达到1以上,处于生产前沿面,且其纯技术效率处于1以上,说明碳排放纯技术效率拉动了综合技术效率,技术进步在提升碳排放效率上具有关键作用。综合技术效率未达到1的省市中,云南、重庆、贵州的纯技术效率大于1且高于规模效率,说明规模效率限制了碳排放效率,需扩大生产规模;而四川、湖北、安徽的纯技术效率未达到1且低

于规模效率,说明纯技术效率限制了碳排放效率,需提高自身管理、技术水平,从而提高碳排放效率。

3.2 交通运输与碳排放综合情况分析

以长江经济带2005—2016年数据为基础,通过熵权法确定指标权重,按式(3)分别得到2005—2016年各省市交通运输系统与碳排放系统的综合指数(见图2、图3)。为更好地分析地缘差异,将长江经济带分为上中下游,其中上游包括云南、四川、

重庆、贵州,中游包括湖北、湖南、江西、安徽,下游包括江苏、浙江、上海。

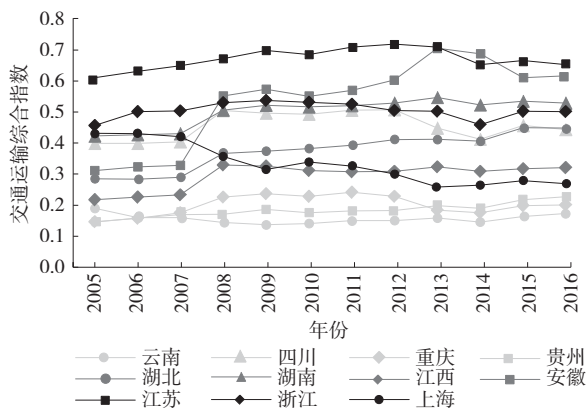


图2 长江经济带交通运输系统的综合指数

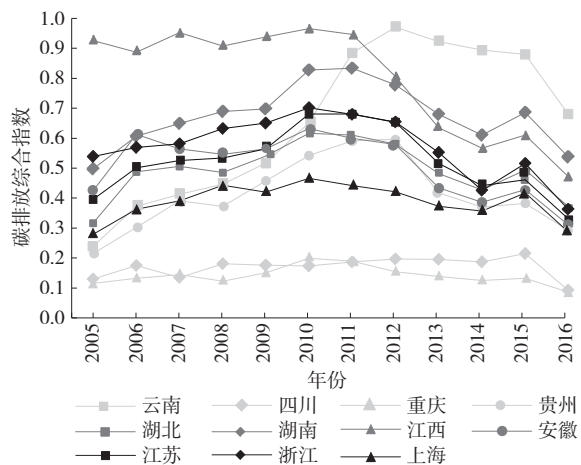


图3 长江经济带碳排放的综合指数

从图2可看出:2005—2016年,长江经济带各省市交通综合指数变化趋势有所差异,下游省市交通运输综合指数总体高于上中游省市,且上游省市维持较稳定的趋势,中游省市呈现稳步上升趋势,下游省市则有所下降。江苏交通运输综合指数处于较高水平,维持在0.60左右;贵州及重庆则处于较低水平,维持在0.150左右;安徽交通运输综合指数增长最快。

从图3可看出:2005—2016年,总体上长江经济带各省市碳排放综合指数呈先增长后下降趋势。中游省市碳排放综合指数高于上游和下游省市;四川、重庆碳排放综合指数低于其他省市;江西省高于其他省市,但下降幅度最大;云南省呈较大增长趋势,在2011年开始回落。

根据交通运输与碳排放系统的指标类型,交通运输综合指数与碳排放综合指数均为越大越优型,即指数越大,交通运输业发展水平越高或产生更大效益的同时产生更少碳排放。上述计算结果说明长江经济带交通运输业正不断发展,水平越来越高;各省市碳排放系统综合指数呈下降趋势,减排形势依然严峻。

3.3 耦合协调性分析

根据式(2)计算长江经济带九省二市2005—2016年交通运输系统与碳排放系统间的耦合度,结果见表3。

表3 2005—2016年长江经济带交通运输与碳排放的耦合度

省市	各年度耦合度											
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
云南	0.994	0.917	0.898	0.859	0.813	0.764	0.704	0.680	0.708	0.694	0.728	0.804
四川	0.860	0.920	0.866	0.881	0.878	0.877	0.887	0.897	0.920	0.926	0.933	0.753
重庆	0.993	0.996	0.995	0.954	0.975	0.998	0.993	0.981	0.990	0.986	0.980	0.915
贵州	0.981	0.950	0.919	0.929	0.907	0.859	0.847	0.847	0.934	0.947	0.962	0.992
湖北	0.999	0.965	0.962	0.990	0.983	0.972	0.976	0.985	0.997	1.000	0.999	0.996
湖南	0.997	0.985	0.979	0.988	0.989	0.973	0.973	0.982	0.994	0.997	0.992	1.000
江西	0.785	0.804	0.795	0.884	0.875	0.859	0.860	0.895	0.946	0.956	0.949	0.981
安徽	0.988	0.951	0.964	1.000	1.000	0.998	1.000	1.000	0.971	0.960	0.985	0.944
江苏	0.977	0.993	0.994	0.993	0.994	1.000	1.000	0.999	0.988	0.981	0.983	0.945
浙江	0.997	0.998	0.997	0.996	0.995	0.990	0.992	0.992	0.999	0.999	1.000	0.987
上海	0.977	0.996	0.999	0.994	0.990	0.988	0.989	0.986	0.984	0.989	0.980	0.999
平均值	0.959	0.952	0.943	0.952	0.945	0.934	0.929	0.931	0.948	0.949	0.954	0.938

从表3可看出:耦合度平均值在0.920以上,耦合程度大,说明长江经济带九省二市交通运输与碳排放存在较强的互动作用。

为进一步研究两系统互动作用的好与坏,从时间演化和空间分布两方面比较耦合协调度差异。

3.3.1 时间演化特性

2005—2016年长江经济带交通运输与碳排放耦合协调度随时间的变化见图4。从表4可看出:2005—2016年,长江经济带交通运输与碳排放耦合协调度呈现先增长后下降趋势,总体处于勉强协调与中级协调之间。2005—2010年,耦合协调度呈递增趋势,增长范围为0~0.150,波动较小;2010—2016年,耦合协调度呈递减趋势,至2016年下降到2005年的水平。长江经济带交通运输与碳排放的耦合协调度不升反降,交通运输业的发展水平与节能减排力度还有待提高。

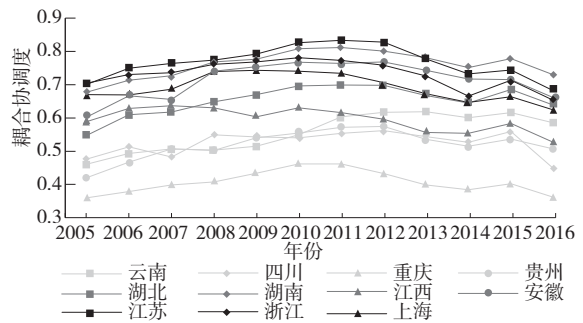


图4 2005—2016年长江经济带交通运输与碳排放耦合协调度的时间演化

3.3.2 空间分布特性

考虑到2005、2010、2015年为国家“五年计划”末,2016年距当前最近(考虑数据可得性),以这4个年份为代表年份,通过Arcgis分析长江经济带九省二市交通运输与碳排放耦合协调度空间分布,结果见图5。



图5 长江经济带交通运输与碳排放耦合协调度的空间分布

从图5可看出:长江经济带中下游省市交通运输与碳排放的耦合协调度比上游省市高。2005—2015年,上游省市总体处于濒临失调和勉强协调之间,中游省市处于初级协调和中级协调之间,下游省

市处于中级协调状态;重庆市一直处于失调状态,云南省处于增长状态,其余省市均为先增长后下降状态,但变化幅度不大。至2016年,九省二市耦合协调度均有所下降,除四川、重庆处于失调状态外,其

余省市均处于协调状态;中游省市中湖南省的耦合协调度最高,为0.730,处于中级协调状态;下游省市中上海市的协调水平最低,为0.527,处于勉强协调状态。长江经济带交通运输与碳排放两系统多数省市呈耦合良性态势,少数省市尚未达到临界水平,且各地区耦合协调水平存在差异。

4 结论与建议

根据2005—2016年长江经济带数据对交通运输与碳排放进行耦合分析,得到以下主要结论:1)长江经济带碳排放效率存在差异,多数省市综合技术效率未达到有效,需从管理、技术和规模上提高碳排放效率。2)长江经济带下游省市交通运输发展水平高于上中游省市,中游省市交通运输正稳步发展;碳排放综合指数呈先增长后下降趋势,长江经济带节能减排形势依然严峻。3)交通运输与碳排放的耦合度大,两者存在较大的互动作用;两系统的耦合协调度在时间上先增后减,在空间上各省市存在差异,上游省市低于中下游省市。

长江经济带实现交通运输与碳排放协调发展的形势依然严峻,上游省市在交通运输发展和减少碳排放方面均有较大提升空间,中下游省市则应注重提高碳排放效率,减少碳排放。在交通强国、长江经济带高质发展的引导下,未来一段时间内长江经济带交通运输基础设施将不断完善,交通运输规模将持续扩大。为保护环境、减少碳排放,交通运输需改变以往以环境污染为代价的发展模式,从绿色交通着手,调整运输结构,加强对清洁能源的利用,并加快节能减排技术创新,在实现国民经济快速发展的同时,提高能源利用效率和碳排放效率。

参考文献:

- [1] 吴继贵,叶阿忠.交通运输、经济增长和碳排放的动态关系研究:基于1949—2012年数据的实证分析[J].交通运输系统工程与信息,2015,15(4).
- [2] 蔡婉华,叶阿忠.交通运输、经济增长与碳排放之间的互动关系研究:基于PVAR模型[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(3).
- [3] 李灵杰,吴群琪.中国省域交通运输经济发展与碳排放的联合动态性分析[J].西安财经学院学报,2017,30(6).
- [4] 陈思茹,张帅,袁长伟.中国交通运输经济发展与碳排放效率评价[J].中国公路学报,2019,32(1).
- [5] 戢晓峰,李武,欧思嘉.云南省公路运输系统与城镇化的空间耦合及作用机理[J].经济地理,2018,38(11).
- [6] 汪德根,孙枫.长江经济带陆路交通可达性与城镇化空间耦合协调度[J].地理科学,2018,38(7).
- [7] 余菲菲,胡文海,荣慧芳.中小城市旅游经济与交通耦合协调发展研究:以池州市为例[J].地理科学,2015,35(9).
- [8] 蒋玲茜,张培林,莫杨辉.长三角县域交通优势度与经济发展关系分析[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2017,41(6).
- [9] 姜磊,柏玲,吴玉鸣.中国省域经济、资源与环境协调分析:兼论三系统耦合公式及其扩展形式[J].自然资源学报,2017,32(5).
- [10] 李雪松,龙湘雪,齐晓旭.长江经济带城市经济—社会—环境耦合协调发展的动态演化与分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(3).
- [11] 张丛,彭辉.基于运输化理论的区域交通运输与社会经济发展耦合关系研究[J].湖南大学学报:社会科学版,2012,26(2).
- [12] Vefie L. The penguin dictionary of physics[M]. Beijing: Foreign Language Press, 1996.
- [13] 袁长伟,张倩,芮晓丽.中国交通运输碳排放时空演变及差异分析[J].环境科学学报,2016,36(12).
- [14] 李玮,孙文.省域交通运输业碳排放时空分布特征[J].系统工程,2016,34(11).
- [15] 卢升荣,蒋惠园,刘瑶.交通运输业CO₂排放区域差异及影响因素[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(1).
- [16] 魏庆琦,赵嵩正,肖伟.我国交通运输结构优化的碳减排能力研究[J].交通运输系统工程与信息,2013,13(3).
- [17] 张赫,苏启明,朱婷.四川省综合交通系统碳排放驱动因子测算分析[J].综合运输,2018,40(3).
- [18] 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).
- [19] 陈亮,何涛,李巧茹,等.区域交通碳排放相关指标测算及影响因素分析[J].北京工业大学学报,2017,43(4).
- [20] 郭炳南,曹国勇.中国各省份碳排放效率与减排潜力测度研究:基于Undesirable—SBM超效率模型的实证分析[J].生态经济,2017,33(8).
- [21] 孙秀梅,张慧,王格.基于超效率SBM模型的区域碳排放效率研究:以山东省17个地级市为例[J].生态经济,2016,32(5).
- [22] Nengcheng Chen, Lei Xu, Zeqiang Chen. Environmental efficiency analysis of the Yangtze River Economic Zone using super efficiency data envelopment analysis (SEDEA) and tobit models[J]. Energy, 2017, 134.
- [23] 潘丹,应瑞瑶.中国农业生态效率评价方法与实证:基于非期望产出的SBM模型分析[J].生态学报,2013,33(12).
- [24] Tone K. Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks-based measure (SBM) approach [A]. GRIPS Research Report Series I [C]. 2003.
- [25] 张军,吴桂英,张吉鹏.中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J].经济研究,2004(10).

收稿日期:2019-06-19